



Konferenzband

Energetische Biomassenutzung

Neue Technologien und Konzepte
für die Bioenergie der Zukunft



**Energetische
Biomassenutzung**



Energetische Biomassenutzung

Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms
„Energetische Biomassenutzung“

BAND 9

Konferenzband **Energetische Biomassenutzung**

Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft

05. - 06. November 2012

Herausgegeben von
Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

Gefördert vom



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Ein Förderprogramm der



DIE BMU
KLIMASCHUTZ-
INITIATIVE

Koordiniert vom



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Wissenschaftlich
begleitet vom



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 BMU-Förderprogramms

„Energetische Biomassenutzung“

www.energetische-biomassenutzung.de

Bildnachweise

Titel: agnion, Barbara Thomas/pixelio, U. Dreiucker/pixelio, DBFZ

Rücken: alle DBFZ

Layout & Herstellung

Steffen Kronberg

Angela Gröber

Druck

Osiris Druck, Leipzig

Förderung

Erstellt mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums

für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin (BMU)

ISSN 2192-1806

© 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 2013

Inhaltsverzeichnis

Einführung - Energieträger mit Zukunft	7
Die Position der Bioenergie aus Sicht der Politik	9
Welchen Beitrag kann Biomasse zur nachhaltigen Bioenergienutzung leisten? – Technologische Herausforderungen	12
Neue Wege für biogene Reststoffe im internationalen Kontext	16
Bioenergie und Naturschutz – Risiken und Chancen	18
Bioenergieforschung aktuell & 2020 – Was kann Bioenergie leisten? Beitrag des Förderprogramms zur Energiewende	22
Saubere Luft - Emissionsminderung in Kleinfeuerungsanlagen	25
BIO-E-HOOVER: Integrierter elektrostatistischer Staubabscheider zur Emissionsminderung bei Biomasseheizkesseln – Auf dem Weg zur Marktreife Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen	25 36
Reduzierung von NO _x -Emissionen durch Brennstoffstufung bei der thermischen Verwertung von Alternativen zum Brennstoff Holz	51
Ansätze zur Optimierung von Einzelraumfeuerstätten	60
Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse- Kleinfeuerungen	70
Sensorik und Abgas-Katalyse zur Reduktion der Emissionen von Klein- holzfeuerungsanlagen	80
Feldmessungen zum Emissionsverhalten von Biomassekleinfeuerungsanlagen	91
Emissionsminderung mit dem Carola-Abscheider bei Kleinfeuerungsanlagen	103
Entwicklung von Toxizitätstests für die Bewertung von Feinstaubemissionen aus der Holzverbrennung	110
Mehr Effizienz in Biogasanlagen	119
Entfernung von Nährstoffüberschüssen bei der Vergärung stickstoffreicher Substrate	119
Verbesserung der Durchmischung in Biogasreaktoren	126
Bedarfsangepasste Stromproduktion in Biogasanlagen	136
Flexible Biogasproduktion in der Direktvermarktung	146
MultiSens – Multipositionssensorik und lanzenbasierte Probenahme zur Optimierung und Flexibilisierung von Biogasprozessen	152


Effekte von Enzymen im Biogasprozess – Stand und erste Ergebnisse des Verbundvorhabens BiogasEnzyme	163
Vergleichende Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren – Mikrobio- logische, verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung und Optimierung	173
Kombinierte Wärmelieferung aus einer Biogasanlage und einem Biomasseheizwerk	187

Alternative Rohstoffe - Reststoffe, organische Abfälle, etc. 196

Grünlandenergie Havelland – Konzepte zur energetischen Nutzung von Gras	196
Grünlandenergie Havelland – Untersuchung zum Zerkleinerungs- und Pelletier- verhalten von Heu	208
Aufbereitung und energetische Nutzung von holzigem Landschaftspflegematerial	219
Deutschlandweite Berechnung von Humusbilanzen zur Bestimmung des Getreidestrohpotenzials – Einfluss von veränderten Produktionsbedingungen	230
Hydrothermale Carbonisierung biogener Reststoffe am Beispiel der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH	239
Erzeugung von Bioagglomeraten auf der Basis ligninhaltiger Ablaugen der Papier- und Zellstoffindustrie	247
Ermittlung der Reaktionskinetik unterschiedlicher, torrefizierter Biomassen	265
Konversion fettsäurebasierter Abfallsubstanzen in sauerstofffreie flüssige und gasförmige Kraftstoffkomponenten durch Cracken an mikroporösen Katalysatoren	276
Landesweite Biomasseberechnung von Gehölzen auf OpenSource-Basis	287

Strom von morgen - Biomethan & Biomassevergasung 296

Ein neuartiges System für die Entschwefelung von Biogas	296
BioSyn – Biomassevergasungsprozess zur Produktion eines teerfreien Synthesegases	305
Potenziale von Mikrogasturbinen bei der Kopplung mit atmosphärischen Festbettvergasern	315
Optimierung der dezentralen SNG-Erzeugung durch die Heißgasreinigung von Synthesegas	326
Experimentelle Untersuchung der Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomassesorten bei der AER-Biomassevergasung	338
Meilenstein bei der elektrischen Effizienz – der TurboHPR	349



Energieträger mit Zukunft

Daniela Thrän

Bioenergie ist der Allrounder unter den erneuerbaren Energien: Strom, Wärme, Mobilität oder ein Ausgleich für den fluktuierenden Sonnen- und Windstrom. Die Bioenergie hat damit auch eine tragende Funktion für das Gelingen der Energiewende. Biomasse trug im Jahr 2011 bereits zu 67 Prozent zur Endenergiebereitstellung aus erneuerbaren Energien bei, ihr Anteil an der Wärmeversorgung mit regenerativen Quellen lag sogar bei über 90 Prozent. Als ein Energieträger der Zukunft muss Bioenergie noch besser, noch effizienter, noch nachhaltiger werden.

Wege dazu will seit dem Jahr 2009 das Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufzeigen und erforschen. Es geht darum, praxisnahe Technologien zu fördern und den Weg zur Marktreife zu unterstützen. Einblick in die 77 Vorhaben gab es auf der zweitägigen Statuskonferenz Anfang November in Berlin. Die Dokumentation dieser Veranstaltung mit mehr als 200 Teilnehmern halten Sie nun in den Händen.

Die Bedeutung der Bioenergie für die Energiewende betonte die Referatsleiterin Dr. Karin Freier in ihrem Eröffnungsvortrag. Sie verwies aber auf die Notwendigkeit, mit der begrenzten Ressource Biomasse effizient umzugehen. Auch gelte es, Entwicklungen wie den Zuwachs beim Maisanbau für Biogas kritisch zu begleiten. Die Nutzung von alternativen Rohstoffen bildet vor diesem Hintergrund einen Schwerpunkt des Förderprogramms und bestimmte die Diskussionen auf der Konferenz. Details waren in den Fachforen zu erfahren, die sich den Themen Emissionsminderung in Verbrennungsanlagen, der Effizienz in Biogas-Anlagen, alternativen Rohstoffen und der Verstromung von Biomethan und Fragestellungen zur Biomassevergasung widmeten.

Im Einzelnen ging es dabei etwa um die Verringerung von Feinstaubemissionen in Heizkesseln. Möglichkeiten zeigt hier etwa die Katalysatorversuchsanlage „KATI“ am Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) auf. Auch Partikelabscheider, wie sie das Projekt CCA am Karlsruher Institut für Technologie erforscht, erweisen sich als praktikabler Weg, Emissionen in Holzkesseleln zu reduzieren. Abgase, vor allem Stickstoff, spielen bei der thermischen Nutzung von nicht holzartiger Biomasse wie etwa Rapskuchen eine wesentliche Rolle. Ein Projekt des Fraunhofer UMSICHT zeigt Möglichkeiten auf, diese zu reduzieren.

Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit des Rohstoffes Biomasse liegt ein Schwerpunkt der geförderten Forschungsvorhaben auf der Effizienz bei der Biomasse-Konversion. So beschäftigt sich ein Projekt am Fraunhofer IKTS in Dresden mit der besseren Durchmischung der Substrate in Biogasanlagen. Schlecht durchmischte Fermenter nutzen die eingesetzten Rohstoffe nicht komplett aus. Ein besserer und gesteuerter Einsatz von Rührwerken kann helfen, die Energieausbeute zu erhöhen. Ein ehemals als verheißungsvoll diskutierter Weg, der

Einsatz von Enzymen, hat dagegen nicht die Wirkung. Enzyme bringen keine Erhöhung der spezifischen Biogasbildung, wie ein Vorhaben am DBFZ gezeigt hat. Für mehr Effizienz mittels Daten will das Projekt MultiSens der TU Berlin sorgen. Mit Mess- und Regeltechnik wird hier der Biogasprozess analysiert und optimiert.

Die Nutzung alternativer Rohstoffe, etwa von Landschaftspflegematerialien, Bioabfällen oder Stroh für Bioenergie wird in der Zukunft eine immer größere Rolle spielen. Einerseits, um Konflikte um Anbauflächen aus dem Weg zu gehen, andererseits, um etwa den Interessen des Naturschutz entgegen zu kommen. Das BMU-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ hat sich daher diesen Fokus gesetzt.

Verschiedene Vorhaben untersuchen Handlung, Umwandlung in Zwischenprodukte und Nutzung von biogenen Reststoffen. So etwa in der Versuchsanlage der Stadtwerke Halle (Saale). Dort sollen in Kooperation mit dem DBFZ mittels Hydrothormaler Carbonisierung Bioabfälle zu einem Biomasse-Festbrennstoff (HTC) umgewandelt werden. Der Brennstoff könnte als Ersatz für herkömmliche Kohle dienen. Einen ähnlichen Weg verfolgt die Torrefizierung von Biomasse, etwa von Holzpellets für den Einsatz in Kraftwerken. Ein Projekt an der Universität Darmstadt im Rahmen des Förderprogramms untersucht die Brenneigenschaften verschiedener torrefizierter Biomasse-Brennstoffe im Hinblick auf eine Eignung für den Einsatz in Kraftwerken.

Thermisch nutzen lassen sich auch Pellets auf der Basis von Gras. Diese stellen Brennöfen wegen des Schwefel- und Aschegehaltes allerdings vor Herausforderungen. Mit einer optimalen Zerkleinerungstechnik lassen sich physikalisch-mechanische Eigenschaften für eine energetische Nutzung herstellen. Mit den Möglichkeiten der Nutzung von ligninhaltigen Ablaugen, einem Reststoff der Zellstoffindustrie, befasst sich die BTU Cottbus. Statt der direkten und ineffizienten Verbrennung des Stoffes sollten mit Hilfe eines Agglomerationsverfahrens Granulate mit geringem Wasseranteil und hohen Brennwerten hergestellt werden.

Eine maßgebliche Rolle bei der effizienten Nutzung der Biomasse spielt die Anlagentechnik. Holzvergasungsanlagen stellen hier eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verbrennungsanlagen dar. Das gewonnene Synthesegas lässt sich zur Strom- und Wärmeproduktion nutzen. Forschungsbedarf besteht noch im punkto Gasaufbereitung beziehungsweise bei der Reinigung und dem Einsatz in Turbinen oder Gasmotoren. Auch dies wird im Rahmen des Förderprogramms erforscht.

Im Vorangegangenen konnten nur exemplarisch einige Punkte aus den Foren der Statuskonferenz dargestellt werden. Zur vertieften Lektüre sei daher diese Dokumentation empfohlen. Sie bietet Antworten auf die Frage, wie die Bioenergienutzung in Zukunft aussehen könnte und welche Rolle sie beim Gelingen der Energiewende spielen kann.

Dass der Bioenergie als grundlastfähige und flexible Energieform auch in Zukunft eine große Bedeutung zukommt, wurde bei der abschließenden Podiumsdiskussion auf der Statuskonferenz deutlich. Sie sollte aber effizient, nachhaltig und im Einklang mit dem Naturschutz genutzt werden. Eine dauerhafte Verbesserung der energetischen Umwandlung von Biomasse ist nur durch eine zielgerichtete und kontinuierliche Forschung auf dem Gebiet möglich. Dafür bieten die im Rahmen des Programmes geförderten Vorhaben wichtige Aufschlüsse.



Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän
Bereichsleiterin Bioenergiesysteme am DBFZ, Leiterin der Programmbegleitung des
BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“

Die Position der Bioenergie aus Sicht der Politik

Karin Freier, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Die Bundesregierung hat im Sommer 2011 die Energiewende beschlossen. Tragende Elemente sind der Ausstieg aus der Atomenergie sowie die Etablierung von erneuerbaren Energien als künftige Säule der Energieversorgung. Bis zur Jahrhundertmitte soll eine saubere, bezahlbare Energieversorgung in Deutschland etabliert werden. Der Anteil der erneuerbaren Energie an der Energieversorgung, also Strom und Wärme, soll dabei bis zum Jahr 2050 auf 60 Prozent steigen, so sieht es das Energiekonzept der Bundesregierung vor.

Tabelle 1: Klimaziele im Energiekonzept der Bundesregierung

Jahr	Klima	Erneuerbare Energien		Energieeffizienz		
	Treibhausgase (im Vgl. zu 1990)	Strommarkt	Gesamt (Endenergie)	Primärenergie	Energieproduktivität	Gebäude (Modernis.)
2020	- 40 %	mind. 35 %	18 %	- 20 % Strom: -10 %	Erhöhung auf 2.1 %/a	Verdopplung 1 % => 2 %
2030	- 55 %	mind. 50 %	30 %			
2040	- 70 %	mind. 65 %	45 %			
2050	- 80 % bis - 95 %	mind. 80 %	60 %	- 50 %		

In naher Zukunft wird es darum gehen, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), bisher der Garant für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland, auf die Ziele der Energiewende auszurichten und weiterzuentwickeln. Mit dem neuen EEG soll an die Stelle der isolierten Betrachtung einzelner Erneuerbarer Energien und ihres quantitativen Ausbaus eine Gesamtbetrachtung der Energiewende und ihrer Wirkzusammenhänge treten. Bundesumweltminister Altmaier hat dazu im Oktober 2012 einen Verfahrensvorschlag gemacht. Dieser zielt darauf ab, einen Konsens mit allen Akteuren über die Ziele der Energiewende herzustellen. Ein Element dabei ist der von Bundesumweltminister Altmaier ins Leben gerufenen EEG-Dialog mit Vertretern aus der Wind-, Solar und Bioenergiebranche.

Ein erstes Dialogtreffen fand bereits im Jahr 2012 statt, weitere, unter anderem zum Thema Biogas, im Februar und März 2013.

Ein wichtiges Instrument für den gegenseitigen Austausch mit der Branche ist die Plattform Erneuerbare Energien. In dieser Plattform suchen Bundeswirtschaftsministerium und Bundesumweltministerium gemeinsam mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft nach Lösungen zu Fragen der Energiewende. Zu den Themen, mit denen sich die Plattform in den verschiedenen Arbeitsgruppen beschäftigt, gehört etwa die Frage, wie der Ausbau der erneuerbaren Energien besser mit dem Ausbau der Stromnetze harmonisiert werden kann. Auch soll die Plattform nach Möglichkeiten suchen, die Ausbauziele der 16 Bundesländer besser aufeinander abzustimmen und so eine regionale Harmonisierung und Angleichung der Geschwindigkeiten beim Ausbau der Erneuerbaren zu erreichen. Auf der Agenda der Plattform stehen auch der kosteneffiziente Ausbau der erneuerbaren Energien sowie ihr Zusammenspiel mit den fossilen Energien.

Für die Bioenergie ergeben sich in naher Zukunft spezielle Herausforderungen. Da sind zum einen die steigenden Kosten für die Stromerzeugung aus Biomasse. Deren Anteil an der gesamten Stromeinspeisung ist mit 27 % (2012) über die letzten Jahre konstant geblieben, die Vergütungszahlungen für Strom aus Bioenergie sind demgegenüber im gleichen Zeitraum jedoch deutlich, von 2,6 Milliarden auf 4,764 Milliarden Euro gestiegen. Pro Kilowattstunde ist für die kommenden Jahre von einer durchschnittlichen EEG-Vergütung für Biomasseanlagen von über 17 Cent pro Kilowattstunde auszugehen. Die Differenzkosten, also die Differenz aus den Vergütungszahlungen für Bioenergieanlagen gemäß EEG und dem Erlös aus dem Verkauf des Stroms an der Börse, sind seit dem Jahr 2008 ebenfalls deutlich gestiegen. Die Kosten im Rahmen zu halten, muss daher ein zentrales Thema für die Bioenergie sein.

Tabelle 2: Die EEG-Umlage ist seit 2008 von 1,12 ct/kWh auf 3,56 ct/kWh (2012) gestiegen und wird 2013 5,28 ct/kWh betragen.

	2008	2011	2012
Anteil an der EEG-Umlage	33 %	24 %	26 %
Anteil an EEG-Stromeinspeisung	27 %	25 %	27 %
Vergütungszahlungen (Mio. €)	2.699	4.250	4.764

Auch den Themen Nachhaltigkeit und Nutzungskonkurrenzen muss sich der Bioenergiesektor stellen. Die starke Zunahme von Anbauflächen für Biogaspflanzen, insbesondere Mais, als Konsequenz des EEG 2009, ist ein zentrales Konfliktfeld bei der Stromerzeugung aus Biomasse. Regionale Nutzungskonkurrenzen durch den Maisanbau sind bereits in den letzten EEG-Erfahrungsbericht eingeflossen und im novellierten EEG 2012 berücksichtigt worden. In Zukunft müssen bei der Erzeugung von Bioenergie verstärkt alternative Pflanzen und Reststoffe zum Einsatz kommen. Denn: Biomasse bleibt auch in Zukunft eine begrenzte Ressource, der Beitrag der Bioenergie zur Stromerzeugung kann nicht unbegrenzt steigen. Nach dem BMU-Langfristszenario steigt die Stromerzeugung aus Biomasse bis zum Jahr 2040 auf maximal 59 Terrawattstunden im Jahr 2040.

Das EEG hat beim bisherigen Ausbau der erneuerbaren Energien eine wesentliche Rolle gespielt und die Erwartungen mehr als erfüllt. Allerdings kann es den weiteren Ausbau nicht mehr adäquat begleiten. Ein Grund sind bestehende Systemfehler, die zum Teil Fehlallokationen und Überförderungen verursachen und so die Marktintegration der erneuerbaren Energien erschweren sowie vermeidbare Mehrkosten verursachen. Ein weiteres Problem: Das EEG ist nur auf einen quantitativen, nicht aber einen qualitativen Ausbau ausgelegt. Dieser ist im Zuge des Aufbaus eines funktionierenden Gesamtenergiesystems mit hohen Anteilen an Strom aus erneuerbaren Energien aber nötig. Es geht darum, den Ausbau der Erneuerbaren künftig regional besser zu koordinieren und stärker mit dem Ausbau der Stromnetze zu synchronisieren. Auch das Zusammenspiel mit den konventionellen Energien wird künftig, bei Erneuerbaren-Anteilen von mehr als 25 %, eine wachsende Rolle spielen. Erforderlich ist daher eine grundlegende Reform des EEG, die über die bisherigen Reformen hinausgeht.

Das EEG muss in Zukunft den Rahmen bilden für den stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien und für deren rasche Marktfähigkeit. Gleichzeitig muss ein neues Gesetz den Stand des Netzausbaus und die regionale Verteilung der erneuerbaren Energien im Blick haben.

Der Vorschlag des Umweltministers zur Reform des EEG sieht aus diesem Grund vor, künftig einen Anteil von 80 % erneuerbare Energien am Strommix für das Jahr 2050 gesetzlich zu fixieren und das Nahziel für 2020 – mit Blick auf den bereits erreichten Ausbaustand – von derzeit 35 maßvoll auf etwa 40 % zu erhöhen. Der Ausbau soll möglichst in gleichmäßigen Schritten erfolgen. Denkbar ist zudem, analog zur Photovoltaik, spezifische Grenzen für das Auslaufen der Förderung bei Wind- und Bioenergie festzuschreiben. Ein künftiges EEG muss immer auch das Ziel der Marktfähigkeit für die erneuerbaren Energien im Auge behalten.

Für den gesamten EEG-Prozess streben wir eine grundlegende Debatte und ein konsensuales Verfahren an. Als Podien für fachliche Diskussion zur künftigen Ausgestaltung der Erneuerbaren-Förderung können die Plattform Erneuerbare Energien und der EEG-Dialog dienen. Ich rufe alle Vertreter der Bioenergiebranche auf, diese Angebote zu nutzen.

Welchen Beitrag kann Biomasse zur nachhaltigen Bioenergienutzung leisten? – Technologische Herausforderungen

Armin Vetter, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

Welches Potenzial die Bioenergie zur Energieversorgung in Deutschland leisten kann, haben zahlreiche Studien gezeigt, etwa im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe. Rund 23 % des Energiebedarfes in Deutschland könnte demnach durch Anbaubiomasse und Reststoffe 2050 gedeckt werden.

Zentrales Element eines nachhaltigen Anbaus von Biomasse ist eine ausgeglichene Humusbilanz. Bei einer zu hohen Zufuhr an organischem Dünger drohen Stickstoffausträge in die Atmosphäre und Hydrosphäre. Demgegenüber führt eine zu geringe Zufuhr an organischen Substanzen zu einer Verschlechterung des Bodengefüges, und des Nährstoff- und Wasserspeichervermögens.

Je nach Eigenschaften der Biomasse bieten sich unterschiedliche Konversionspfade an: Raps zum Beispiel wird über die physikalisch-chemische Konversion zu Biodiesel verarbeitet. Getreide, Mais und Halmgut hingegen eignen sich eher für den biochemischen Konversionspfad. Hier entsteht durch Vergärung Ethanol, Biogas und Biomethan. Aus Stroh und Heu, sowie holzartiger Biomasse, wie Waldrestholz und Holz aus Kurzumtriebsplantagen entsteht über die thermochemische Konversion durch Verbrennung Wärme und Strom, als auch über die Vergasung, neben Wärme und Strom, Biomethan und BtL (Biomass-to-liquid).

Reststoffe spielen für eine nachhaltige Bioenergieversorgung eine entscheidende Rolle. Eine Übersicht der in Deutschland angefallenen Reststoffmengen und ihrer Nutzung im Jahr 2011 zeigt noch ein nicht ausgeschöpftes Potenzial. So werden nur rund 11 % der jährlich anfallenden 12,2 Millionen Tonnen Schweine- und Rindergülle zur Energieproduktion genutzt, und nur 2,6 % der in Deutschland pro Jahr anfallenden Mengen an Festmist.

Wirtschaftsdüngernutzung

(Quelle: Thüringen: TLL 2012; Deutschland: bioreact 2010)

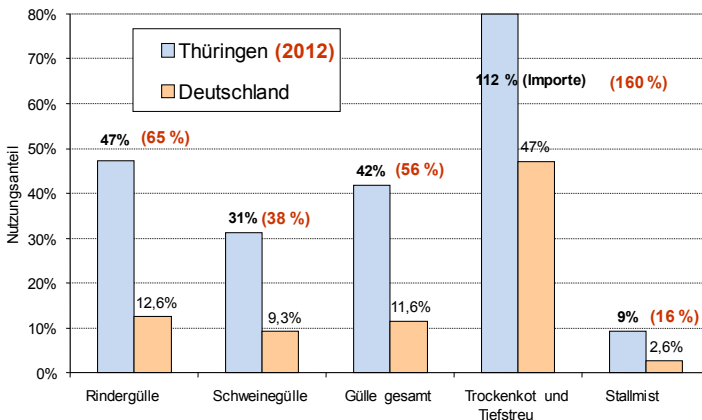


Abbildung 1: Reststoffnutzung in Deutschland und Thüringen. Quelle: TLL/Dr. Reinhold 2012.

Nach Frankreich verfügt Deutschland über das größte Strohpotenzial innerhalb der EU. Pro Jahr fallen im Schnitt 25,8 Millionen Tonnen an. Ein Teil dieses Strohs muss zur Humusbildung auf den Feldern verbleiben, es bleibt dennoch eine ausreichende Menge, die sich energetisch nutzen lässt. Folgende Grafik zeigt die Strohpotenziale in Deutschland.

Ergebnisse regionales Strohpotenzial bei ausgeglichener Humusbilanz nach verschiedenen Methoden

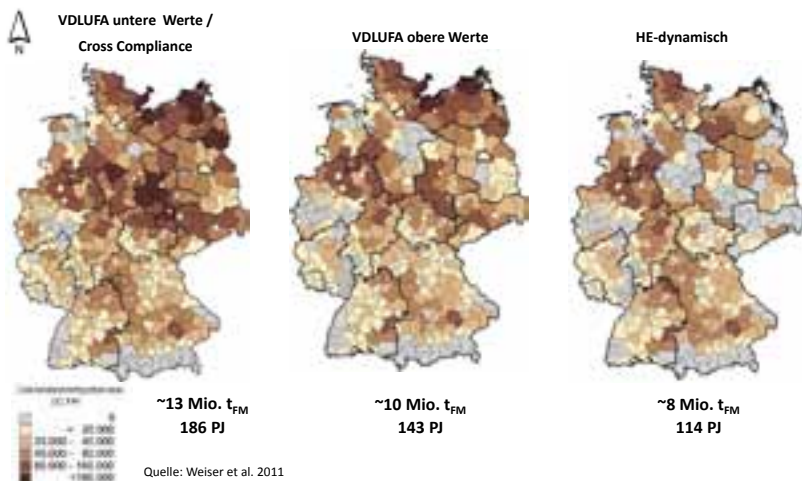


Abbildung 2: In den Humusbilanzen (hier dargestellt auf Landkreisebene) wurde der Saldo aus dem Humusverlust und der -zufuhr berechnet. Dabei kamen drei Methoden zum Einsatz: VDLUFA oberer/unterer Wert, die vom Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten entwickelt wurde. Die Humusbilanzierung nach den unteren Werten der VDLUFA-Methode in Verbindung mit einer festgelegten Humus-Reproduktion von 100 Kilogramm Humus-Kohlenstoff pro Tonne Stroh werden als Nachweis für die Einhaltung der Cross-Compliance-Auflagen bezüglich des Humuserhaltes genutzt. Die Humuseinheiten- oder HE-Methode wurde um den Bezug zum Ertrag herstellen zu können, auf der Grundlage des Stickstoffhaushalts abgeleitet. (Quelle: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (Hrsg.): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 02), Leipzig 2011, S. 15.)

Ein Beispiel für die energetische Nutzung von Stroh ist das in dieser Form und Größenordnung im Bau befindliche erste deutsche Strohheizkraftwerk im Emsland. Dort sollen aus etwa 75.000 Tonnen Stroh pro Jahr rund 56.000 Megawattstunden Strom und 215.000 Megawattstunden Wärme gewonnen werden. Zwischen 80 und 90 % der Primärenergieausnutzung sollen erreicht werden.

Die thermische Nutzung von Stroh birgt jedoch auch Herausforderungen, etwa die relativ kalium- und chlorreichen Brennstoffe sowie der niedrige Ascheschmelzpunkt, die die Öfen

durch Korrosion angreifen kann. Auch die Feinstaubemissionen liegen höher als etwa bei der Holzverbrennung. Zudem bedarf es einer gut abgestimmten Logistikkette. Es gilt in der Zukunft Verbrennungs- und Vergasungstechniken für unterschiedliche Leistungsbereiche zu entwickeln, welche die technologischen Herausforderungen kostengünstig und effizient gewährleisten.

Allein eine Verbesserung des Korn-Strohverhältnisses um 0,1 % könnte die jährlichen Strohmenge in Deutschland um 4,7 Millionen Tonnen erhöhen, sodass bei ansteigendem Bedarf der Humusersatz gewährleistet ist. Der Einsatz von zusätzlichen organischen Düngern zur Humusproduktion ist dagegen mit Kosten verbunden. Eine weitere Variante ist der Einsatz von Humusmehrern in der Fruchtfolge, etwa Winter- und Sommerzwischenfrüchten bzw. mehrjähriges Ackerfutter.

Um neben Mais weitere Energiepflanzen für die Biogasproduktion ökonomisch effektiv zu gestalten, empfehlen sich zwei Wege, die sich aus Sicht der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft ergänzen sollten. Eine Forcierung der Forschung zu Energiepflanzen in der gesamten Wertschöpfungskette – von der Züchtung über die Anbauverfahren, die Logistik-, Lager- und Aufbereitungskette bis zur Biogasproduktion. Nötig ist zudem eine Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und der Biomasseverordnung. Folgende Tabelle zeigt, welche Erträge (Trockenmasse, Methan) verschiedene alternative Energiepflanzen im Vergleich zum Mais erbringen. Es handelt sich um Anbaustandorte des EVA-Projektes – Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands.

Tabelle 1: Trockenmasse¹, Methanhektarerträge² u. Deckungsbeiträge³ unterschiedlicher Anbaualternativen für die Biogaszeugung frei Siloplatte (gerundet) für EVA-Regionen
Blau markiert jeweils der vorzüglichste Wert, orange markiert der zweitbeste Wert (bei TM und MHE Bezug nur auf Einzelkulturen)

	Höhenlagen Südost (Bayern)			Lößstandorte der ostdeutschen Ackerebene (Thüringen)			Trocken-Warme diluviale Böden des Ostdeutschen Tieflands (Sachsen)		
	TM	MHE	DB	TM	MHE	DB	TM	MHE	DB
	[dt TM/ha]	[m ³ CH ₄ /ha]	[€/ha]	[dt TM/ha]	[m ³ CH ₄ /ha]	[€/ha]	[dt TM/ha]	[m ³ CH ₄ /ha]	[€/ha]
Mais HF	178	5200	520	146	4200	310	128	3700	280
Sorghum (b.) HF	140	3400	50	132	3200	-60	120	2900	-20
Sorghum (b.x.s.) HF	133	3200	110	129	3100	40	104	2500	10
Wintertriticale GP	111	3300	260	135	4000	330	71	2100	0
Winterroggen GP	112	2900	200	126	3300	170	67	1800	-60
Ackerfutter HNJ	137	3500	340	111	2800	90	90	2300	90
Roggen + Mais	192	5600	200	177	5100	-40	136	3900	-50
Roggen + Sorghum	196	5200	150	168	4400	-120	122	3200	-200

Abkürzungen: HF= Hauptfrucht, HNJ= Hauptnutzungsjahr (Etablierungskosten umgelegt), GP = Ganzpflanzenutzung, TM = Trockenmasseertrag, MHE = Methanhektarertrag, DB = Deckungsbeitrag; 1=Quelle der Daten: Delphi-Befragung Energiepflanzenexperten; 2=Gerundete Erwartungswerte mit 10 % Silierverlusten bezogen auf Methanertrag, Ackerfutter Hauptnutzungsjahr: zusätzlich 10% Bröckelverluste). Unterstellte Relationen der Gasausbeuten nach Herrmann et. al, 2010; Referenz: Gasausbeute Mais: 321 m³/t oTM; 3=Entspricht in etwa der Direkt- und Arbeitsleistungskostenfreien Leistung nach KTBL. Quelle: TL/Strauß, C.; Vetter, A. 2012

Trotz grundsätzlich guter Eigenschaften für die energetische Nutzung bestehen je nach Fruchtart differenzierte Herausforderungen bei Anbau, Transport und Konversion der Biomasse, bei der Zuckerrübe etwa in Bezug auf Transport, Reinigung von Störstoffen und Silierung oder bei der Durchwachsenden Silphie in Bezug auf die Bestandsetablierung und die Biogasausbeute.

Auch Dauergrünland bietet Potenzial für die energetische Nutzung. Die Energiegewinnung kann zudem zum Erhalt von artenreichen Flächen beitragen, die ohne eine regelmäßige Nutzung verbuschen würden. Allerdings sind Biomassen von Grünlandflächen nur eingeschränkt zur Verbrennung oder zur Vergärung geeignet. Eine Option wäre hier z. B. die Mitverbrennung bzw. die Mitvergärung in Kombination mit etablierten Bioenergieträgern in relativ kleinen Anteilen (< 20 %).

Kurzumtriebsplantagen spielen in Deutschland bisher noch eine untergeordnete Rolle, es bestehen sowohl technologische als auch ackerbauliche Herausforderungen. Es gilt hier, die Flächen zu erweitern und die Bereitstellungsketten für verschiedene Umtriebszeiten von der Ernte, über Transport und Lagerung bis hin zur energetischen Nutzung zu optimieren.



Neue Wege für biogene Reststoffe im internationalen Kontext

Theo Verleun, DSM, Niederlande

Die Welt steht vor großen Herausforderungen: Im Jahr 2050 werden schätzungsweise neun Milliarden Menschen auf diesem Planeten leben. Die Nachfrage nach Nahrungsmitteln wird um 70 % steigern, die nach Kalorien sich verdreifachen. Der Bedarf nach Wasser wird in den kommenden Jahren um 30 % steigen, die Zahl der Menschen, die in Ländern mit knappen Wasservorräten leben, wird auf 1,8 Milliarden geschätzt.

Dabei verschwenden wir schon heute viele Ressourcen: Ein Drittel des in der Bewässerung verwandten Wassers geht verloren, zudem landet gut 50 Prozent der weltweiten Ernte ungenutzt im Abfall.

Ohne technische Innovationen wird die Menschheit zehn Erden brauchen, um sich zu ernähren. Innovationen in der Landwirtschaft und der Biotechnologie könnten es aber möglich machen, höhere Ernten auf denselben Flächen zu erzielen. Auf diese Weise ließe sich bis zur Jahrhundertmitte der weltweite Nahrungsbedarf decken und in Europa die Hälfte des herkömmlichen Kraftstoffes durch Biokraftstoffe ersetzen. Rund 20 % des herkömmlichen Plastiks könnten bis 2050 durch Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen ersetzt werden.

Als Unternehmen wollen wir den Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung begleiten. DSM hat in den letzten hundert Jahren einen Strukturwandel von einem Minenunternehmen zu einem Anbieter von Werkstoffen und Chemie unternommen. Als Unternehmen streben wir ein nachhaltiges Wachstum an. Dazu gehört es etwa unseren Energieverbrauch bis 2020 um ein Fünftel zu senken und in demselben Zeitraum ein Fünftel weniger Kohlendioxid-Emissionen zu verursachen.

Wir glauben daran, dass Biomasse eine Antwort auf kommende Herausforderungen wie Klimawandel und wachsende Weltbevölkerung geben kann. Ein Beispiel sind technische Entwicklungen wie etwa der Einsatz von Enzymen zur Produktion von Biokraftstoffen: Es geht um eine grüne industrielle Revolution.

Um diesen Weg zu ebnen bedarf es adäquater rechtlicher Rahmenbedingungen, etwa eines einheitlichen europäischen Standards für nachhaltige Produkte. Fehlanreize, etwa für das Verbrennen von Biomasse in Kohlekraftwerken, sollten aus unserer Sicht beseitigt werden.

Um den wachsenden Bedarf an Energie und an Kalorien zu decken, müssen wir Reststoffe aus der Industrie und aus der Landwirtschaft besser nutzen. Wir brauchen mehr Effizienz in der globalen Landwirtschaft. Hierzu sind Erfolge etwa in der Züchtung von Pflanzen notwendig. Außerdem bedarf es vom Anbau bis zum fertigen Produkt einer Zusammenarbeit verschiedener Unternehmen und Branchen (Abb. 1).

Emerging value chain → partnerships needed

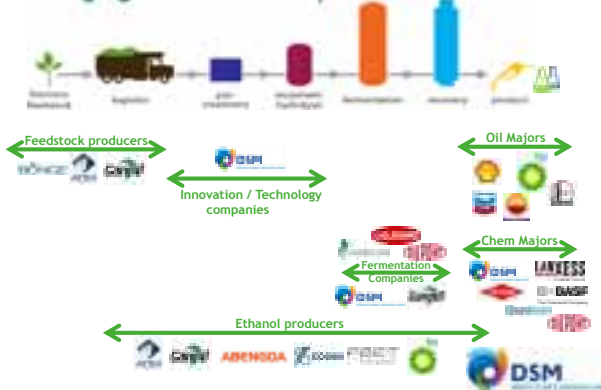


Abbildung 1: Darstellung der Kooperationen innerhalb einer Wertschöpfungskette.

Produkte wie Ethanol aus Zellulose, Biodiesel, industrielles Biogas oder auch Basis-Chemikalien auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen sind keine Vision, sondern schon Realität. DSM investiert zusammen mit POET, den ersten amerikanischen Hersteller von Biokraftstoff zweiter Generation – Bioethanol rund 250 Millionen Dollar in eine Produktionsanlage für Ethanol in Emmetsburg im US-Bundesstaat Iowa. Dort sollen pro Jahr 80 Millionen Liter Ethanol auf Getreidefasern produziert werden.

Wir sehen auch Möglichkeiten, die Biogasproduktion auszubauen, genug Nachfrage und auch Substrate, vor allem aus Rest- und Abfallstoffen aus der Industrie und Landwirtschaft, sind vorhanden und der Markt für Biogasenzyme und Prozessoptimierung entwickelt sich zunehmend. Um aus den verfügbaren Rohstoffen mehr Energie zu gewinnen, wird es in Zukunft notwendig sein, den Biogasprozess noch effizienter zu machen und eine professionelle Biomethanproduktion und -verfahren zu etablieren und zu optimieren. Biogas darf nicht mehr als zufälliges Nebenprodukt der Abfallbeseitigung betrachtet werden. Ein Bereich, in dem wir ebenfalls großes Potenzial für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe sehen, ist die Chemiebranche. Viele Grundchemikalien, wie Adipin-Säuren zur Herstellung von Kunststoffen, werden aus Mineralölen hergestellt. In Zukunft könnten immer mehr Chemikalien auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden. Wir wollen in diesem Jahr in Italien eine Anlage zur Herstellung von Biosuccinum eröffnen, ein biomass-basierter Ausgangsstoff zur Herstellung von Kunststoffen. Im Vergleich zur herkömmlichen Adipin-Säure verursacht Biosuccinum rund zehn Mal weniger Kohlendioxid-Emissionen. Wir arbeiten daran, die Produktionsanlagen von einem Demonstrationslevel auf eine kommerzielle Basis zu heben. Ziel ist die Entwicklung von regionalen Bioraffinerien.

Aus unserer Sicht ist es möglich, den Übergang von einer fossilen zu einer biobasierten Wirtschaft zu ebnen. Dieser Übergang muss auf verantwortungsvolle und nachhaltige Weise erfolgen. Eine enge Zusammenarbeit aller Partner entlang der gesamten Wertschöpfungskette und Verarbeitung von Biomasse ist in jedem Fall erforderlich. Die biobasierte Wirtschaft bietet aus unserer Sicht große Chancen für die Landwirtschaft, die Wissenschaft und die Biotechnologie.

Bioenergie und Naturschutz – Risiken und Chancen

Kathrin Ammermann, Bundesamt für Naturschutz (BfN)

Durch die Beschlüsse zum Atomausstieg und zur Energiewende ist der Ausbau der Erneuerbaren zur tragenden Säule unserer Energieversorgung geworden sowie der Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele. Doch trotz zahlreicher Vorteile gilt es auch die Risiken beim Ausbau der Erneuerbaren Energien zu thematisieren. Es besteht ein breiter Konsens darüber, dass die Energiewende stattfinden soll. Relevant ist jetzt die Frage: Wie wollen wir die Energiewende in Zukunft gestalten? Die aktuellen Entwicklungen liefern den Rahmen, um über die Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung erneut nachzudenken. Der Naturschutz muss dabei angemessen berücksichtigt werden.

Im vergangenen Jahr wurden in Deutschland insgesamt 8,68 Petajoule an Endenergie verbraucht. Die Erneuerbaren Energien stellten einen Anteil von 12,2 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Im Gegensatz zu ihren Anfängen hat sich das Portfolio der Erneuerbaren Energien heute längst zu einer bunten und vielfältigen Mischung entwickelt. Den größten Anteil beim Verbrauch an Erneuerbaren Energien stellte die Biomasse mit 8,2 %. Damit fungiert sie unter den erneuerbaren Energien als zentraler Energieträger. Vor allem aus Biogas gewonnener Strom steht derzeit im Zentrum vieler Diskussionen. Insgesamt 14,2 % des gesamten Öko-Stroms wurden 2011 aus Biogas gewonnen. Demgegenüber ist das Thema Biokraftstoff in den Hintergrund gerückt, auch Wärmebereitstellung wird wenig öffentlich diskutiert. Vor dem Hintergrund, dass in privaten Haushalten zur Wärmeerzeugung der größte Teil der Bioenergie aus Festbrennstoffen (Waldholz) gewonnen wird, ist dies der Bedeutung nicht angemessen. Gleichwohl steht Biogas stark im Vordergrund, unter anderem wegen des deutlichen Anstiegs der Anbaufläche für Energiepflanzen – insbesondere Mais – auf über 2,1 Millionen Hektar. Dies entspricht einem Anteil von 18 % der gesamten landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland. Die Anbaufläche ist in den vergangenen Jahren so deutlich gewachsen, dass diese Entwicklung von verschiedener Seite kritisiert wird.

Aus Perspektive des Naturschutzes steht jedoch weniger die Art der Energieerzeugung im Vordergrund, sondern die Entwicklung auf der Fläche. Vor diesem Hintergrund ist der Anstieg der Anbaufläche für Energiepflanzen, die steigende Intensität landwirtschaftlicher Nutzung und die starke Dominanz einiger Anbausubstrate kritisch zu betrachten. Problematisch ist vor allem regional der Anbau von Mais. Etwa 2,6 Millionen Hektar des Rohstoffs sind allein im Jahr 2011 angebaut worden. Tendenz steigend. Etwa 80 % der in Biogasanlagen eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe besteht aus Mais.

Der Anstieg der Bioenergie ist nicht der einzige Grund für die erweiterten Mais-Anbauflächen, nur etwa 30 % des verfügbaren Mais landen in Biogasanlagen, der Großteil des Mais wird im Futter- und Lebensmittelbereich verwendet. Gleichwohl haben die Vergütungssätze des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) regional zu einer erheblichen Zunahme der Maisanbauflächen geführt. Hohe Förderungen, Fehlentwicklungen, die Klimaschutzmotivation sowie die Auswirkungen auf die biologische Vielfalt, das Landschaftsbild und den Naturhaushalt machen eine Anpassung der derzeitigen Regelungen notwendig.

Im Jahr 2011 wurde im Zuge der sog. Naturbewusstseinsstudie, eine von BMU/BfN durchgeführte repräsentative Befragung der Bevölkerung, auch ein Fragenblock zu den Veränderungen der Landschaft durch die Energiewende aufgenommen. Die aktuellen Ergebnisse

zeigen, dass die Befragten Landschaftsveränderungen insgesamt als positiv bewerteten. Selbst Biogasanlagen, die sonst eher durch ein Akzeptanzproblem gekennzeichnet waren, erhielten von der Mehrheit der Befragten (68 %) ein positives Votum. Veränderungen der Landschaft durch Maisanbau wurden ebenfalls mehrheitlich als positiv bewertet (63 %). Deutlich weniger Akzeptanz als Windkraftanlagen (87 %) erlangten Hochspannungsleitungen (42 %). Am wenigsten akzeptierten die Befragten Holzeinschlag in den Wäldern (35 %). Die Studie bescheinigte insgesamt auf dieser eher abstrakten Ebene eine große Akzeptanz für die Erneuerbaren Energien. Dieses Akzeptanzbild gilt es zu erhalten, weiter zu fördern und vor allem auch vor Ort zu erreichen.

Chancen und Risiken

Die Auswirkungen des Biomasseanbaus müssen räumlich differenziert und regionalisiert betrachtet werden. Hierbei können sowohl Chancen als auch Risiken konstatiert werden. Eine Chance birgt beispielsweise der Anbau erweiterter Fruchtfolgen, wodurch vielfältige Kulturen auf die Felder gebracht werden können. Nachteilig sind hingegen verengte Fruchtfolgen oder gar deren Aufgabe sowie die Tendenz zu großen, von den energie-reichsten Pflanzen dominierte Monokulturen. Ebenso können Zweikultur-Nutzungssysteme einerseits zur Diversifizierung beitragen und das Erosionsrisiko mindern, andererseits werden durch den häufigen Maschineneinsatz die im Acker brütenden Vögel gestört bzw. vernichtet und diese Kulturen verlangen in der Regel einen intensiven Herbizideinsatz. Ähnlich verhält es sich bei der Nutzung des Grünlandes: Einerseits kann der Aufwuchs extensiver Grünländer energetisch verwertet werden, andererseits führt die Nutzung der Brachflächen, die vorher Tieren und Pflanzen vorbehalten war, oder auch der regional bedeutende Grünlandumbbruch zum Verlust an Lebensräumen und damit an biologischer Vielfalt. Der bereits genannte Maisanbau ist ebenfalls bei den Risiken zu nennen. Mit dem sog. „Maisdeckel“ wurde im EEG 2012 bereits reagiert. Ziel war es, den Maisanbau für die Biogasverwendung zu reduzieren. Die letztliche Ausgestaltung des EEG lässt jedoch vermuten, dass dies nicht in dem Maße gelingt, wie ursprünglich angedacht. Dabei ist eine Reduzierung dringend nötig: Bei einem Anbau von über 40 % Mais in manchen Landkreisen kann eine dreigliedrige Fruchtfolge nicht mehr eingehalten werden. Zudem ergeben sich durch die erweiterten Anbauflächen Flächenkonkurrenzen, Pachtpreise steigen und Grünland wird umgebrochen. Das wiederum führt zum Verlust von Lebensraum sowie zum Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in Boden und Gewässer.

Der jährlich erscheinende Bericht zu Vögeln in Deutschland (Wahl et al.) erhebt mit Bezug auf die Biodiversitäts- und Nachhaltigkeitsstrategie unter anderem den sog. Agrarvögel-Indikator. Agrarvögel sind in besonderem Maße gefährdet und dieser Trend verschlechtert sich seit Jahren.

Zukünftig sollte daher die Nutzung alternativer Rohstoffe, etwa von Landschaftspflegematerialien, Bioabfällen oder Stroh (in angemessenen Mengen) für Bioenergie in Zukunft eine deutlich größere Rolle spielen. Einerseits, um Konflikten um Anbauflächen aus dem Weg zu gehen, andererseits, um etwa den Interessen des Naturschutzes entgegen zu kommen. In zahlreichen Projekten und Initiativen wird derzeit nach naturverträglichen Alternativen zum Mais, bzw. vielfältigen Fruchtfolgen gesucht, die ähnlich hohe Erträge bringen und mit weniger Einsatzstoffen angebaut werden können. Der Forschungsverbund „EVA“ erprobt standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen, in anderen Projekten wird die Energiegewinnung aus Wildpflanzen untersucht (z.B. Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau). Abgeschlossen ist inzwischen ein Projekt, das Maßnahmen zur

Etablierung einer artenreichen Agrarlandschaft erprobt hat. Das BfN selbst untersucht die „Synergien von Grünlandpflege und Klimaschutz“ und erprobt naturschutzkonforme Grünland-Managementsysteme samt der energetischen Verwertung des anfallenden Materials. Es gibt viele positive Ansätze, jedoch gelingt deren Umsetzung derzeit nur sehr vereinzelt. Für eine erfolgreiche und nachhaltige Entwicklung der Bioenergie ergeben sich für die Zukunft verschiedene Forderungen. Priorität sollte die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen haben, hingegen sollten die Flächen für den Anbau intensiver Biogassubstrate nicht erweitert werden. Die Grenze an intensiver Anbaukultur für Bioenergie ist vielerorts erreicht.

Bioenergie spielt im Mix der Erneuerbaren Energien eine wichtige Rolle. Zukünftig gilt es jedoch ihre Stärken (z. B. Ausgleich der fluktuierend einspeisenden Energiequellen) deutlicher zu fördern. Priorität muss dabei die Frage haben: Wie können die Vorteile von Bioenergie mit dem gegenwärtigen Portfolio von Flächen und Anlagen besser genutzt werden? Die Orientierung an regionalen Potenzialen (sowohl hinsichtlich der Energienutzung, z.B. Wärmesenken, als auch hinsichtlich Substratverfügbarkeit und Gärrestverwendung) sollte maßgeblich sein.

Eine aktive Steuerung der räumlichen Verteilung von Anbauflächen und Anlagen hat in den vergangenen Jahren deutlich gefehlt. Dies könnte sich durch die Vorstöße – wie sie aktuell diskutiert werden – ändern. Aus Naturschutzsicht sollte dies angestrebt werden. Zudem sollten künftig deutlich mehr alternative Anbaukulturen in die Anlagen gebracht werden, dabei sollte nicht allein der Energieertrag zählen. Wichtig ist, dass die Diskussion über die vorzüglichste Verwendung von Biomasse nicht allein auf das EEG beschränkt bleibt. Wärmebereitstellung und der Anbau von Gehölzen auf Äckern gehören genauso zum Thema Bioenergie wie die Waldholznutzung und die Herstellung von Biokraftstoff.

Notwendig ist auch die rechtzeitige Definition von Randbedingungen für die „zweite Generation“ von Anlagen. Große Potenziale der Bioenergie liegen darin, Rest- und Abfallstoffe intensiver zu nutzen. Dies kann durch eine bessere Verwertung von Landschaftspflegematerial in Biogasanlagen gelingen. Zwar sind Landschaftspflege-Projekte wegen ihres erforderlichen maßgeschneiderten Designs nicht immer einfach, mit mehr Kommunikation und Aufwand ist es jedoch möglich, diese zusätzlichen Potenziale zu erschließen.

Holzfeuerung hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen und wird auch weiterhin deutlich zunehmen. Bei voraussichtlich zunehmendem Holzimport (z.B. Pellets) bedarf es im europäischen Rahmen verbindlicher Nachhaltigkeitskriterien. Auf der Grundlage der existierenden Nachhaltigkeitsanforderungen für flüssige Biokraftstoffe sollten Ergänzungen vorgenommen werden sowie Lücken geschlossen werden. So fehlt im Kontext von Flächen, die für die Bioenergieproduktion nicht genutzt werden sollten, Wald mit hoher Bedeutung für die biologische Vielfalt. Bei einer Übertragung auf holzartige Biomassen ist der Rahmen für ein nachhaltiges Waldmanagement zu schaffen, in dem sowohl der Schutz von Biodiversität und Nährstoffhaushalt als auch der Boden- und Wasserschutz berücksichtigt werden. Hier gibt es bereits weitreichende Ansätze in Deutschland sowie Zertifizierungsverfahren, an die angeknüpft werden kann.

Nicht zu vergessen ist die Weiterentwicklung der Treibhausgasbilanzierung. Für naturverträgliche Kurzumtriebsplantagen sollten Kriterien für die Standortwahl, die Anlagen und den Umtrieb definiert werden. Zudem ist es unerlässlich, durch Kaskadennutzung und effiziente Verwertung Nutzungskonkurrenzen in der Holzverwertung zu reduzieren.

Die Ressource Biomasse ist erneuerbar, trotzdem sollte sparsam mit ihr umgegangen und die effizientesten Einsatzmöglichkeiten gefunden werden. Dabei gilt es, neue Maßstäbe für Effizienz zu definieren. Ein Effizienz-Begriff, der nur Leistung und Kosten abbildet, führt zu Konflikten mit den Zielen zum Erhalt der biologischen Vielfalt. Die Bioenergienutzung birgt also für den Naturschutz Chancen und Risiken. Die Chancen sind bislang jedoch nur unzureichend ausgeschöpft. Es überwiegen negative Folgen, z. B. einer intensiven Biomasseerzeugung, da finanzielle Anreize, insbesondere durch das EEG, zwar beim Ausbau der Bioenergie erfolgreich sind, jedoch nicht bei der Ausgestaltung des Anbaus. Die Potenziale von Bioenergie müssen daher in Zukunft gezielter und naturverträglicher genutzt werden.

Literatur

Wahl, J.; Dröschmeister, R.; Langgemach, T.; Sudfeldt, C. (2011): Vögel in Deutschland – 2011. DDA, BfN,LAG VSW, Münster. URL: http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/monitoring/VID2011_72dpi.pdf (Stand: 18.02.2013)

Bioenergieforschung aktuell & 2020 – Was kann Bioenergie leisten?

Beitrag des Förderprogramms zur Energiewende

Daniela Thrän, DBFZ/UFZ

Die Herausforderungen der Energiewende und des weltweiten Klimaschutzes können nur mit einer nachhaltigen Energieversorgung verwirklicht werden. Biomasse soll hier einen wichtigen Beitrag leisten, da sie einer der wenigen erneuerbaren Energiequellen ist, die verlässlich produzieren und im Hinblick auf bedarfsgerechte Strombereitstellung Fluktuationen von Wind und Sonne ausgleichen kann. Zur Förderung der Forschung und Entwicklung im Bioenergiesektor rief das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative im Jahr 2008 das Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ ins Leben. Mit insgesamt 48 Millionen Euro unterstützt das Förderprogramm bis voraussichtlich 2015 Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur praxistauglichen Weiterentwicklung wettbewerbsfähiger Technologien, systemflexibler Anlagenkonzepte und Produkte für eine nachhaltige und effiziente Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse, hier vor allem aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Nach nunmehr vier Jahren Programmlaufzeit forschen insgesamt 77 Vorhaben bzw. 183 Projektpartner an verschiedensten Aspekten der Bioenergie.

Höhepunkt eines jeden Jahres ist die Statuskonferenz des Förderprogramms. Die Programmteilnehmer nutzen das Jahrestreffen zum Erfahrungsaustausch, zur Präsentation von Ergebnissen und zum gemeinsamen Diskurs über dringende Fragen der Bioenergienutzung. Dabei generiert die Forschergemeinschaft einen nachhaltigen Output für die Weiterentwicklungen auf dem anwendungsorientierten Forschungsfeld der Bioenergie und für den Klimaschutz. Denn das Besondere der Bioenergiebereitstellung ist, dass die Erfolgsfaktoren für den Klimaschutz entlang der gesamten Bereitstellungskette liegen. In der Identifizierung geeigneter Anbauflächen, der Biomassebereitstellung mit geringen Aufwendungen und ohne direkte Konkurrenzen, der Konversion in hocheffiziente Bioenergieträger sowie emissionsarmen Umwandlung und bedarfsgerechten Substitution von fossilen Energieträgern liegen große Chancen aber auch Risiken für den Klimaschutz. Um die Erfolgsfaktoren der Bioenergie für den Klimaschutz gestalten zu können, muss man die Nutzungspfade jedoch zunächst erst einmal verstehen, entwickeln und bewerten können.

Verstehen

Ungefähr 10.000 Bioenergieanlagen produzieren in Deutschland Strom und Wärme sowie Kraftstoffe aus Biomasse, davon befeuern 14 Mio. Kleinfeuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe deutsche Haushalte. Die Schaffung einer soliden Datenbasis bildet die Grundlage jeder Weiterentwicklung. Beispielsweise geben Emissionsmessungen an Praxisanlagen Aufschluss über Schwachstellen und Optimierungspotenziale. Die Vergleichbarkeit der Messwerte ist dabei häufig eingeschränkt. Daher ist es für Projekte, die sich im Programm mit der Minderung von Emissionen beschäftigen, besonders wichtig die Zielgrößen so gut wie möglich unter vergleichbaren, reproduzierbaren und allgemein anerkannten Methoden zu ermitteln. Hierzu wurden in den vergangenen Jahren im Programm bereits zahlreiche Messworkshops in den Bereichen Biomasseverbrennung, Holzvergasung und

Biogas durchgeführt. Als Ergebnis der gemeinsamen Arbeit von Programmteilnehmern stehen erste Versionen der Messmethodensammlungen „Biogas – Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich“ und „Feinstaub – Methodenvorschläge zur Feinstaub erfassung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe“ zur Verfügung, die stetig weiterentwickelt werden.

Eine konsistente Datenbasis ist aber auch zur Einordnung der Rohstoffbasis erforderlich. So stellen Programmteilnehmer für verschiedene biogene Rest- und Abfallstoffe vielfältige Basisinformationen zur Verfügung. Ein Beispiel: Im Projekt „Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung“ (FKZ: 03KB021), welches im Förderprogramm von 2009-2012 lief, wurde ermittelt, dass unter Berücksichtigung der Humusbilanz jährlich mindestens 8 Mio. t Stroh für die energetische Biomassenutzung zur Verfügung stehen.

Entwickeln

Das Förderprogramm gestaltet die Zukunft der Bioenergie vor allem durch die Entwicklung neuer Prozessschritte, integrierter Konzepte, Technologien sowie Emissionsminderungsansätze. Hier haben die Forschungsprojekte bereits vielversprechende Pilot- und Demonstrationsprojekte auf den Weg gebracht. So wurde und wird über hydrothermale Carbonisierung aus Rest- und Abfallstoffen Biokohle hergestellt, eine innovative dezentrale Holzvergasungsanlage (Heatpipe-Reformer) mit Kraft-Wärme-Kopplung und Nachwärmeversorgung gebaut, ein Verfahren zur Nutzung von hoch lignozellulosehaltigen Reststoffen zur Biogaserzeugung, und zur direkten Umwandlung pflanzlicher und tierischer Altfette und -öle zur Erzeugung von Diesel- und Benzinkraftstoffen entwickelt, um nur einige Beispiele zu nennen. Daneben ist es natürlich unerlässlich bereits etablierte Verfahren hinsichtlich Emissionsminderung, Prozessablauf und Effizienz weiter zu optimieren. Damit befassen sich allein 31 Vorhaben im Förderprogramm.

Bewerten

Eine effiziente und nachhaltige Bioenergiebereitstellung ist das primäre Ziel der Forschung und Entwicklung im Programm. Ob und wie das erreicht werden kann, hängt vor allem von der Frage ab, was Effizienz und Nachhaltigkeit bedeutet und mit welchen Indikatoren dies abgebildet werden kann. Ein erster Schritt im Programm ist hier das „Methodenhandbuch zur stoffstromorientierten der Klimagaseffekte“, welches in einem intensiven Diskussionsprozess von Programmteilnehmern erarbeitet wurde. Es bietet eine durchgängige Dokumentations- und Methodenbasis für wesentliche Kalkulations- und Bewertungsverfahren ausgewählter energetisch-ökonomisch-ökologischer Analysen an und unterstützt die Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten.

Bei den gewählten Annahmen im Methodenhandbuch werden die gegenwärtigen Anforderungen an eine nachhaltige Bioenergienutzung berücksichtigt. Es ist im momentanen Bearbeitungsstand jedoch kein Werkzeug für die vollständige Bewertung zur Nachhaltigkeit von Bioenergiesystemen. Für die Weiterentwicklung der aktuellen Ausgabe in Richtung eines Bewertungswerkzeuges für Bioenergiesysteme ist die Berücksichtigung weiterer Parameter, wie z. B. der Humusbilanzierung, iLUC, der Nahrungsmittelsicherheit, der Wertschöpfung und der Ressourcenverfügbarkeit erforderlich und soll mittelfristig angegangen werden.

Gestalten

Ausgehend vom „Verstehen“ auf der Basis von Potenzialabschätzungen, Monitoring- oder Messprogrammen, dem „Entwickeln“ neuer Verfahren, Konzepte und Emissionsminderungsansätze, sowie dem „Bewerten“ von Technologien und Verfahren eröffnen sich diverse Gestaltungsmöglichkeiten und Handlungsfelder im Förderprogramm. Damit uns die Entwicklung und Optimierung klimafreundlicher Bioenergietechnologien und die Gestaltung einer nachhaltigen Bioenergieversorgung gelingt, ist die Vernetzung vieler verschiedenst relevanter Akteure erforderlich. „Gestalten“ heißt auch nachhaltige Rohstoffe und effiziente Konversionsverfahren gezielt zu verbinden. Potenzial liegt vor allem in der kontinuierlichen Verbesserung der Brennstoffausnutzung. So werden im Förderprogramm z. B. Pellets aus biogenen Reststoffen durch Torrefizierung (Torrefaction – FKZ: 03KB043) für den Einsatz in Kraftwerksfeuerungen optimiert oder auch die Bereitstellung von Kraft- und Brennstoffen in thermo-chemischen Anlagen aus biogenen Rest- und Abfallstoffen erprobt (Biowaste-to-liquid – FKZ: 03KB010).

Nicht zuletzt im Kontext der Energiewende kommt der flexiblen Bioenergiebereitstellung eine zentrale Rolle im stationären Bereich zum Ausgleich anderer Maßnahmen der Strom- und Wärmebereitstellung zu (z. B. zunehmend KWK bei Heizsystemen für gedämmte Gebäude und bedarfsgerechte Strombereitstellung). Ferner bedarf es einer Weiterentwicklung der Bioökonomie. So sollte die Produktion von Materialien, Chemikalien und Energie aneinander gekoppelt sein, wie das Beispiel Bioraffinerien zeigt. Stoffkreisläufe müssen nachhaltig erhalten und Umweltbelange angemessen integriert werden. Nutzungskaskaden und die effiziente Verwertung der Rohstoffe steigen dabei in Ihrer Relevanz. Projektbeispiele im Förderprogramm, wie die Kombination von Verfahren zur energetischen Nutzung von Biertreber (Demotreber – FKZ: 03KB075) oder die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von stofflich und energetisch nutzbaren Bioagglomeraten auf der Basis von Lignin (LignoBioFuel – FKZ: 03KB058) zeigen auf, wie Stoffe, die energetisch genutzt werden sollen, vorher eine stoffliche Nutzung erfahren. Weitere Möglichkeiten reichen von neuen Holzprodukten, der Entwicklung von speziellen Zwischenprodukten, die chemisch genutzt werden können oder der Herstellung von grünem Wasserstoff auf Basis der Rückstände der Biodieselproduktion. Die Kaskadennutzung kann sich durchsetzen, wenn es einen Markt Vorteil für biomassebasierte Produkte gäbe. Ein Reststoff ist auch nur dann sinnvoll, wenn er am Ende des Lebensweges genutzt wird. Der Fokus sollte jedoch primär darauf liegen, den Anfall von Reststoffen zu vermeiden.

Nach vierjähriger Laufzeit legt das Förderprogramm nun erste Ergebnisse vor. Mittlerweile wurden in Zusammenarbeit mit der Programmbegleitung insgesamt neun Handlungsempfehlungen und Leitfäden erarbeitet, drei Handbücher zur Harmonisierung von Mess- und Bewertungskriterien, sowie zwei kompilierte Abschlusspublikationen, in denen die Ergebnisse bereits abgeschlossener Vorhaben präsentiert werden. Durch den interdisziplinären Austausch und die intensiven Diskussionen auf der diesjährigen Statuskonferenz wurde ein weiterer Beitrag für eine nachhaltige Energieversorgung durch Bioenergie geleistet. Ich freue mich auf die Herausforderungen für die kommenden Jahre.

Hinweis zur Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ sind abrufbar unter:

<http://www.energetische-biomassenutzung.de/de/downloads/veroeffentlichungen.html>

BIO-E-HOOVER: Integrierter elektrostatischer Staubabscheider zur Emissionsminderung bei Biomasseheizkesseln - Auf dem Weg zur Marktreife

Alexander Berhardt*¹, Prof. Dr. Ferenc Lezsovits², Dr. Bodo Groß¹

¹ IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergieSysteme)

² Budapest University of Technology and Economics,
Department of Mechanical Engineering

Adresse: IZES gGmbH, Altenkesselerstraße 17 Geb. A1, 66115 Saarbrücken,

*E-Mail: berhardt@izes.de

Abstract

Die Zielsetzung des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines elektrostatischen Staubabscheidesystems für Biomassezentralheizkessel, bestehend aus einer Abscheideeinheit sowie einer Kontrolleinheit. Die größte Besonderheit dabei ist die Integration der Abscheideeinheit in einen bereits in Serie produzierten Biomassekessel. Im Rahmen des Vorhabens wird als Entwicklungsumgebung modellhaft für die Hackschnitzelkessel des Herstellers BOKOMPAKT ein Kessel mit 50 kW thermischer Feuerungsleistung genutzt. Die Abscheidestrecke soll vollständig in die Nachheizflächen integriert und im Rahmen eines Feldtestes betrieben, getestet und optimiert werden. Darauf aufbauend wird zusätzlich ein universell nachrüstbares Modul entwickelt und im Rahmen eines Feldversuchs mit einem Stückholzkessel des Herstellers HOVAL getestet. Weiterhin soll eine kompakte Bauweise realisiert werden. Die Abscheideeinheit soll sich jedoch insbesondere für rechteckige Geometrien bei gleichbleibend hoher Abscheideleistung eignen, um den Vorgaben der derzeit aktuellen Fassung der 1. BImSchV entsprechen zu können. Nach neun-monatiger Entwicklungszeit stehen nun erste Erfahrungen und Ergebnisse zur Verfügung, die nachfolgend beschrieben werden.

Das Projekt BIO-E-HOOVER „Entwicklung, Integration und Test eines universell einsetzbaren elektrostatischen Staubabscheiders für biomassebefeuerte Zentralheizkessel zur Reduzierung von Feinstaubemissionen“ mit Forschungskennzeichen FKZ: D/2 – 14.2.1.1 – LFFP 10/43 wird innerhalb des Saarländischen Landesforschungsförderungsprogramm (LFFP) mit Mitteln der Staatskanzlei des Saarlandes gefördert (Referat T/1: Landesforschungsförderung GWK, Koordinierungsstelle T und W Projekte).

Schlagwörter: Sekundärmaßnahme zur Staubemissionsminderung bei Biomasseheizkesseln (bis 100 kW), Integrierter Elektrostatischer Staubabscheider, Biomassekessel, Feinstaubminderung

Vorhabensbeschreibung und Ziele

Aufbauend auf den Ergebnissen vorangegangener Arbeiten sollen der bisher erreichte technische Entwicklungsstand des kompletten elektrostatischen Staubabscheidesystems sowie den daraus erhaltenen Erfahrungen in enger Zusammenarbeit mit den Herstellern BOKOMPAKT und HOVAL weiterentwickelt und in deren Biomassezentralheizkessel integriert werden. Das Abscheidesystem wird für Feuerungsleistungen bis etwa 100 kW ausgelegt. Die Übertragung der Ergebnisse auf weitere Hersteller, bzw. unterschiedliche Kesselgeometrien ist möglich und ein wesentlicher Bestandteil des Verwertungsplans der Partner.

Technische Ziele: In technischer Hinsicht muss eine Anpassung des Systems, bestehend aus der eigentlichen Abscheideeinheit (Abscheidestrecke) und der Versorgungs- und Kontrolleinheit, auf die unterschiedlichen Anforderungen der beiden Kessel durchgeführt werden. Die Geometrie der Elektroden der Abscheideeinheit muss so angepasst werden, dass einerseits die Integration in einen (beliebigen) Biomassekessel möglich ist und andererseits, im Falle einer nachgeschalteten Lösung sowohl die Integration in einen vorhandenen Kamin als auch als Add-On Lösung zwischen Kessel und Kamin erfolgen kann. Die Integration muss auf die vorhandenen Gegebenheiten des Kessels, wie beispielsweise dessen strömungsmechanische Eigenschaften angepasst werden und darf den Kessel in seinem Betriebsverhalten nicht einschränken. Weiterhin müssen die Hochspannungsversorgung und deren Kontrolleinheit an die Betriebscharakteristik des jeweiligen Kesseltyps, wie beispielsweise an das Regelverhalten der Kesselsteuerung angepasst werden. Dazu ist die Entwicklung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen beiden Steuerungen vorgesehen. Durch diese Verknüpfung der Funktionsteuerung des Abscheiders mit der Kesselsteuerung, inklusive einer „Selbstüberwachungsfunktion“ zur deutlichen Verminderung von Spannungsüberschlägen, werden mögliche Fehler- und Gefahrenquellen durch bzw. für potentielle Nutzer minimiert. Im Falle der Kessel der Firma BOKOMPAKT wird das Abscheidesystem in die Nachheizfläche integriert. Aufgrund der Geometrie der Nachheizfläche und dem damit verbundenen begrenzten Bauvolumen, welches für die Abscheidestrecke zur Verfügung steht, wird aus jetziger Sicht eine Abscheidestrecke mit mehreren, parallel geschalteten Elektroden angestrebt.

Eine weitere besondere Herausforderung besteht in der Gestaltung der elektrischen Anschlüsse der Hochspannungselektroden, die zur Vermeidung von Spannungsüberschlägen temperatur- und kurzschlussfest durch die Kesselwandung geführt werden müssen.

Als Brennstoffe werden im Rahmen des Feldversuchs verstärkt „Nichtholztreibstoffe“ (z. B. Miscanthus-Trester-Briketts) eingesetzt. Diese verursachen, bei gleicher Feuerungstechnik bzw. Feuerraumgeometrie, höhere Staubemissionen, wodurch die Einsetzbarkeit des Staubabscheiders sehr wahrscheinlich auch bei einem Einsatz von emissionstechnisch besseren Holzbrennstoffen, wie beispielsweise Holzpellets, Holzhackschnitzel oder Stückholz, gewährleistet sein wird. Mittels des Feldtests soll, außer der grundsätzlichen Funktionalität, insbesondere auch die Betriebssicherheit des Staubabscheidesystems im alltäglichen Einsatz untersucht und optimiert werden. Dazu wird im Rahmen des Vorhabens, sowohl für die integrierte als auch für die nachgeschaltete Abscheidevariante, eine automatische Abreinigungsvorrichtung entwickelt, steuerungstechnisch ebenfalls in die Abscheidesteuerung integriert und im Betrieb erprobt.

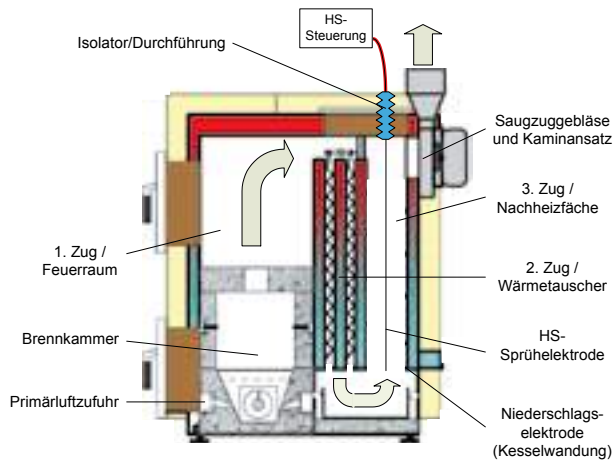


Abbildung 1: Vereinfachtes Schema des Biomassekessels mit integriertem Staubabscheider (Quelle: Abgeändert von BIOKOMPAKT GmbH, 2010, [1]).

Wissenschaftliche Ziele: In wissenschaftlicher Hinsicht sollen durch ein umfangreiches Monitoringprogramm die erzielten Erfolge des Vorhabens dokumentiert und evaluiert werden. Die Optimierungsmöglichkeiten sowohl der Kontroll- als auch der Abscheideeinheit sollen anschaulich dargestellt werden und dazu beitragen, ein wirtschaftlich und technisch marktfähiges Produkt zu entwickeln. Mit Hilfe von computergestützten Simulationen für bspw. die Strömungstechnik oder das elektrische Feld sollen die Messergebnisse modellhaft dazu beitragen, den möglichen Einfluss des Abscheiders auf den Betrieb des Kessels zu identifizieren und zu qualifizieren. Aus dieser Basissimulation und dem zugrunde gelegten Modell soll im Weiteren ein universelles Werkzeug zur Beschreibung des Abscheidesystems und dessen Geometrie für weitere Biomassekessel entwickelt werden. Aus dieser mathematischen Beschreibung des Systems können nach eingehender Analyse gegebenenfalls weitere Optimierungspotentiale quantifiziert werden. Insofern ist eine genaue Kenntnis des dem Abscheidesystem zu Grunde liegenden theoretischen Wissens selbstverständlich und unabdingbar.

Wirtschaftliche Ziele: Am Ende des Vorhabens sollen voll integrationsfähige und funktionsstüchtige Abscheidesysteme zur Verfügung stehen, welche im ersten Schritt durch die beiden beteiligten Hersteller eingesetzt und vermarktet werden. Im Anschluss an die Laufzeit des Vorhabens sollen als Teil des Verwertungsplans, bei entsprechender Nachfrage, die Abscheidesysteme zur Verwendung in Biomasseheizkesseln anderer Hersteller, insbesondere im Hinblick auf die novellierte 1. BImSchV vom März 2010, angepasst werden. Weiterhin soll das Abscheidesystem, bei Bedarf und technischer Machbarkeit, auf weitere Anwendungsgebiete angepasst werden.

Stand der Entwicklung

Um die oben genannten technischen Ziele erreichen zu können, wurde im ersten Schritt die Anpassung der Abscheidestrecke und damit die Ausführung der Elektrodengeometrie untersucht. Dabei schließt die Elektrodengeometrie sowohl die technische Ausführung der Sprühelektrode, als auch der Niederschlags-elektrode mit ein. Die Auslegung bzw. Anpassung der beiden Elektroden ist ein entscheidender Beitrag zur Entwicklung eines funktionierenden Staubabscheiders. Nach White (White 1969, [2]) hängt die Wanderungsgeschwindigkeit ω der Teilchen, die letztendlich den Abscheideprozess ermöglicht, direkt vom zwischen beiden Elektroden angelegten elektrischen Feld ab (bzw. der dadurch auf die Teilchen wirkenden elektrischen Kraft). Mit E_0 als der Aufladefeldstärke, E_p als der Niederschlagsfeldstärke, r als dem Teilchenradius und η als der Gaszähigkeit (hier für Luft), gilt im vereinfachten Fall mit Vernachlässigung der Störfaktoren für Teilchen $> 1\mu\text{m}$ (White 1969, S. 144 [3]):

$$\omega = \frac{E_0 * E_p * r}{2 * \pi * \eta} \quad (1)$$

Folgend fließt die Wanderungsgeschwindigkeit über die von Deutsch (Deutsch 1922, S. 335, [4]) aufgestellte und von White (White 1969, S. 154, [5]) weiterentwickelte Formel zur Bestimmung des theoretischen Abscheidegrades ein:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\left(\frac{A}{V}\right) * \omega} \quad (2)$$

Mit A als Niederschlagsfläche und V als Gasvolumendurchsatz errechnet sich der theoretische Abscheidegrad eines Elektroabscheiders ε . Der Abscheidegrad, als zentrales Bewertungskriterium der Funktionsfähigkeit eines elektrostatischen Staubabscheiders, ist somit abhängig von der Wanderungsgeschwindigkeit der Staubteilchen, bzw. vom elektrischen Feld. Die Art und Ausprägung des elektrostatischen Feldes wird zudem über die eingestellte elektrische Spannung, sowie von deren Polarität und zeitlichen Änderung, bestimmt. Die elektrische Feldstärke in einem Plattenelektroabscheider mit Sprühdrahtelektrode und ohne Staubeintrag errechnet sich nach Troost (Troost 1954, [6]), und Weber/Brocke (Weber/Brocke 1973, [7]) zu:

$$E_G = \sqrt{\frac{8 * i * d_{Ga}}{b_0 * h_D}} \quad (3)$$

Die elektrische Feldstärke E_G ist somit abhängig vom Abstand zwischen Sprüh- und Niederschlags-elektrode d_{Ga} , vom Abstand der Sprühelektroden untereinander h_D (bei Sprühelektrodenanzahl > 1) und vom fließenden Ionenstrom i , der wiederum von der eingestellten Spannung U abhängt. Die Ionenbeweglichkeit b_0 geht hier als Konstante mit in die Gleichung ein. Werden Staubpartikel in das elektrische Feld eingebracht, ändert sich das elektrische Feld nach Lowe und Lucas (Lowe/Lucas 1953, [8]) über die dann auftretenden Staubaumladungen, die infolge der gewollten und für den Betrieb des Elektroabscheiders nötigen Staubionisation auftreten. Um jedoch die für die Auslegung des Elektroabscheiders, auf optimale Funktionalität hin, zu bestimmenden Parameter der Elektrodengeometrie zu identifizieren, genügt eine vereinfachte Betrachtung.

Erste theoretische Überlegungen bezüglich der optimalen Elektrodengeometrie wurden über die Berechnung von elektrischen Feldstärkelinien durchgeführt. Die angelegte Hochspannung entspricht einer Gleichspannung und erzeugt somit ein statisches elektrisches Gleichfeld. Da das elektrische Feld ein wirbelfreies Quellenfeld ist, bei dem die Feldlinien senkrecht ein- und austreten, folgt dessen Ausbildung einer genau festgelegten Symmetrie. Demnach würde ein für die Ionisation von Partikeln perfekt geeignetes elektrostatisches Feld in alle räumlichen Richtungen der Abscheidefläche ein gleichmäßiges Feld an Äquipotentiallinien ausbilden. Ein Rohr mit zentrierter Sprühelektrode besitzt somit die für diesen Zweck optimal geeignete Geometrie. Daher muss bei der im Forschungsvorhaben vorliegenden rechtwinkligen Geometrie, welche sozusagen eine Mischung aus Platten- und Röhrenabscheider darstellt, ein Kompromiss zwischen, für das elektrische Feld optimaler räumlicher Symmetrie und den vorhandenen geometrischen Strukturen geschaffen werden. Bei der Wahl der Elektrodengeometrie wurde immer zuerst der Fall der einfachsten verfahrenstechnischen Umsetzung betrachtet. Die so gefundene Elektrodengeometrie bzw. das daraus resultierende elektrostatische Feld zur Ionisation der Staubpartikel, muss daraufhin auf dessen Eignung zur Erfüllung der notwendigen Abscheidewirkung getestet werden. In Abbildung 2 sind dazu Feldliniendiagramme zu sehen, die aus unterschiedlichen Elektrodenkonfigurationen resultieren.



Abbildung 2: Darstellung der Feld- und Äquipotentiallinien des elektr. Feldes für unterschiedliche Elektrodenkonfigurationen (Quelle: Gezeichnet mit der Open-Source Software „2-D Electrostatics Applet“ [9]).

Der Test auf Erfüllung der an die Elektrodenkonfiguration gestellten Abscheidekriterien wird anhand von Laborversuchen durchgeführt. Dazu wurde ein Modell mit rechteckiger Geometrie aufgebaut, siehe dazu Abbildung 3. Anhand dieses Modells können Versuche zur Eignung der verschiedenen Elektrodenkonfigurationen bei vereinfachten Bedingungen durchgeführt werden, die im Kessel nicht oder nur unter sehr hohem Aufwand realisiert werden könnten. Im Gegensatz zum direkten Feldtest im Kessel können im Modell in erster Näherung an die realen Abscheidegrade, Kriterien wie Abgastemperatur, Art der Partikel oder räumliche Erreichbarkeit der Nachheizfläche vernachlässigt werden. Die größte Herausforderung besteht dabei in der Anpassung der im Modell herrschenden Staubbelastungen und Strömungen an die im Kessel auftretenden Bedingungen. Dies kann jedoch wegen den zuvor beschriebenen vereinfachten Bedingungen (vor allem Temperatur) nur bedingt erreicht werden. Als Testaerosol dient *Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat* (DEHS), eine ölige Suspension, deren *Most Penetration Particulate Size* (MPPS) nach Zerstäubung bei 0,1 - 0,2 μm liegt (Topas GmbH 2008, [10]). Diese Partikelgröße entspricht in etwa dem zu erwartenden Massenverteilungsmaximum an Feinstaubbelastung bei Verbrennung von Biomasse (Oberberger et al. 2005, [11]).

Bei dem aufgebauten Modell handelt es sich um einen im Inneren mit leitfähigem Material ausgekleideten Holznachbau der Nachheizfläche des Kessel BOKOMPAKT ECO 50 im Maßstab 1:1. In der Nachheizfläche des Kessels sind bei Volllast Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 0,6 m/s bei einem Betriebsvolumendurchsatz von etwa 200 m³/h zu erwarten (BOKOMPAKT GmbH 2008, [12]). Daraus ergibt sich, dass aufgrund der identischen hydraulischen Querschnitte auch im Abgasrohr des Modells über den dort verwendeten Lüfter eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa 2,7 m/s einzustellen ist. Die maximal mögliche Länge der Sprühelektrode und die verfügbare Zeit zur Ionisation bzw. zur Abscheidung, unterliegen folglich den gleichen Beschränkungen wie sie bei späterer Integration in den Kessel vorzufinden sind. Die in Abbildung 3 sichtbaren Durchführungen der Hochspannungselektrode durch den Deckel in die Nachheizfläche sind Eigenentwicklungen und erfüllen bereits die erforderlichen elektrischen Isolationsbedingungen für den späteren Betrieb im Kessel.

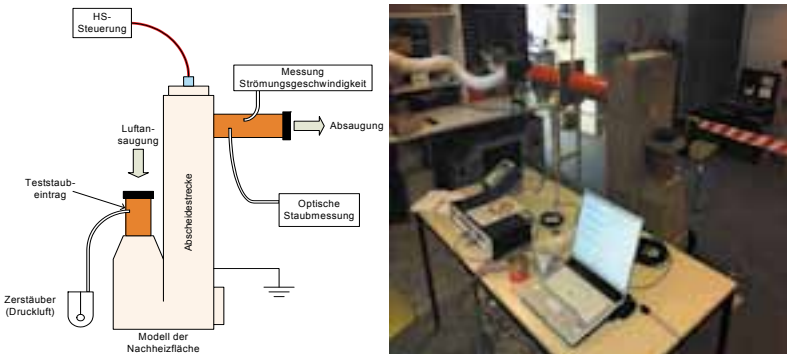


Abbildung 3: Schematischer und realer Versuchsaufbau zur Überprüfung verschiedener Elektrodengeometrien (Quelle/Urheber: IZES gGmbH).

Die Staubbelastung wird über das optische Laserphotometer DustTrak II 8531 Aerosol Monitor der Firma TSI bestimmt. Dazu werden zur Beurteilung der Versuchsergebnisse nicht die absoluten Werte in mg/m³ herangezogen, sondern relative Abscheidewerte bestimmt, welche einen hinreichend genauen Rückschluss auf die spätere Verwendbarkeit der aktuell getesteten Elektrodenkonfiguration zulassen. Für jede Messreihe wurde ein Bezugswert bestimmt, der über einen längeren Zeitraum ohne angelegte Spannung und bei voller Staubbelastung ermittelt wird. Pro Elektrodenkonfiguration wird eine Messreihe durchgeführt, bei der ab einer eingestellten Spannung von 10 kV jeweils nach fünfminütiger Messzeit die Spannung in 2 kV Schritten bis 30 kV erhöht wird. Einzig veränderter Parameter ist somit die angelegte Hochspannung. Die im eigenen Haus entwickelte Hochspannungsversorgungs- und Kontrolleinheit kann Spannungen von 0 bis 30 kV und Ströme bis zu 2 mA (und somit 60 Watt Leistung) bereitstellen. Bei auftretenden Überschlägen werden diese über die Arc-Detect Funktion erkannt und die Steuereinheit schaltet die Spannung sofort ab. Nach dieser Abschaltung regelt die Steuerung selbständig die Spannung wieder Schritt für Schritt bis zum, gegenüber dem eingestellten Wert, nächst niedrigerem Spannungswert, bei dem kein Überschlag mehr auftritt. Diese Funktion erfüllt bereits erste Anforderungen an die Betriebssicherheit des elektrostatischen Abscheiders und stellt gleichzeitig die Verwendbarkeit der Messergebnisse trotz Überschlags sicher. Während des gesamten Versuchs werden Staubbelastung, Spannung, Strom und Strö-

mungsgeschwindigkeit in zehn-sekündiger Auflösung geloggt. Über diese Daten kann dann die Abscheideleistung bzw. die Funktionalität der jeweiligen Elektrodenkonfiguration bestimmt werden. Jede Messreihe wurde mindestens dreimal reproduziert.

Ergebnisse

Die aus den ersten theoretischen Überlegungen, auf Grundlage der elektrischen Feldlinien, gefundenen unterschiedlichen Elektrodenanordnungen wurden im Modell getestet. Die Anordnungen unterscheiden sich einerseits in der Elektrodenanzahl, es wurden eine, zwei und drei Elektroden getestet, andererseits in der technisch/mechanischen Ausführung. Es wurden eine frei schwebende, eine am Modellboden befestigte, eine zwischen den Elektroden befestigte und eine in Kammern aufgeteilte Anordnung getestet. In den folgenden Abbildungen werden exemplarisch die Messergebnisse bezüglich der erreichten Abscheidegrade über der angelegten Hochspannung dargestellt. Die hier aufgeführten Diagramme zeigen lediglich einen zusammenfassenden Auszug aus den vielzähligen Versuchsdurchführungen.

In Abbildung 4 sind die relativen Abscheidegrade in Abhängigkeit der Spannung für eine, zwei und drei Elektroden zu sehen. Die Elektroden wurden am unteren Ende mit einem elektrisch nicht leitenden Gewicht gespannt. Wie zu erwarten war, wird mit der steigenden Anzahl an Elektroden ein ebenso steigender Abscheidegrad erreicht. Auffällig ist, dass die Abscheidewirkung asymptotisch gegen die 100 %-Grenze läuft, wobei die Steigerung der Abscheidung mit steigender Elektrodenanzahl kleiner wird. Eine markante Steigerung der Abscheideleistung ist mit weiter steigender Elektrodenanzahl folglich nicht zu erwarten. Eine maximale Anzahl von drei Sprühelektroden ist mit einer Abscheiderate von etwa 73 % ausreichend. Die negativen Abscheideraten unterhalb der Koronaeinsetzspannung sind über die im Toleranzbereich schwankenden Staubbelastungen und der bereits beschriebenen Bestimmung des relativen Bezugswertes zu erklären.

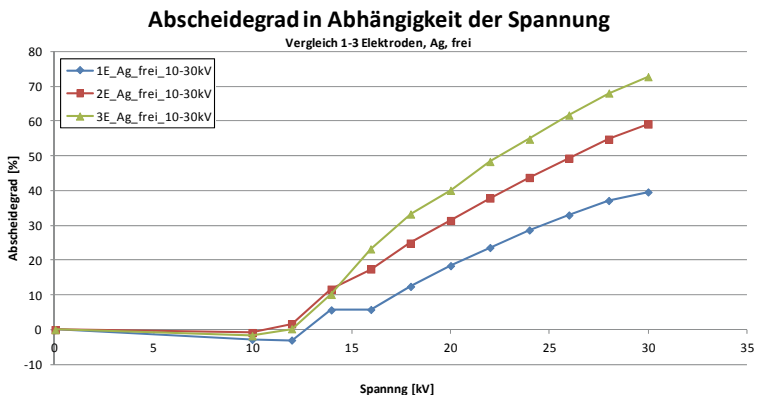


Abbildung 4: Abscheidegrade der Versuche mit jeweils 1, 2 und 3 Silberdrahtelektroden in frei hängender Ausführung.

Abbildung 5 zeigt die Abscheiderate für zwei Elektroden in den vier unterschiedlichen Anordnungen. Auch hier entspricht das Ergebnis den Erwartungen indem die frei aufgehängte Elektrodenanordnung den schlechtesten Abscheidegrad hat. Die verbundene Anordnung, bei der die Elektroden (wenn mehr als eine Elektrode verwendet wurde) über nichtleitendes Material miteinander starr fixiert wurden, zeigt wie auch die feste Anordnung gegenüber der freien Anordnung kleine Abscheidegradverbesserungen. Angeregt durch die Luftströmung und verstärkt durch die auch zwischen den Elektroden wirkenden elektrostatischen Kräfte, kann eine nahezu gleichmäßige oszillatorische Schwingung der frei aufgehängten Elektroden beobachtet werden. Dies hat zur Folge, dass der feldfreie Raum zwischen den Elektroden, der sich über die abstoßende Wirkung gleich gepolter Gleichspannungen ausprägt, einen zeitlich änderbaren Raum darstellt, in dem über die ausbleibende Ionisierung der Staubpartikel, eine Abscheidung verhindert wird.

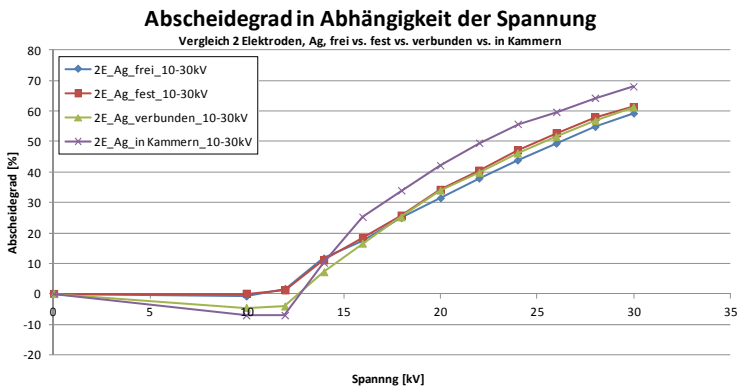


Abbildung 5: Abscheidegrade der Versuche mit 2 Silberdrahtelektroden in den vier unterschiedlichen Ausführungen.

Bei detaillierter Betrachtung der gemessenen Ströme kann dieser beschriebene Effekt der Oszillation der Elektroden insofern bestätigt werden, dass bei freier Elektrodenanordnung ein ebenso oszillatorischer Verlauf des Stromes zu beobachten ist, der sich über die immer wieder auftretenden Näherungen und Abstoßungen der Sprühelektrode an die Niederschlagelektrode erklären lässt. Dagegen weist die feste Anordnung eine eher glatte Stromkurve auf, woraus sich der etwas höhere Abscheidegrad, durch das Ausbleiben der Energieaufwendung für die Oszillation der Elektroden, erklärt. Die Anordnung der Elektroden in Kammern, bei der zwischen die einzelnen Elektroden zusätzliche elektrisch leitende Platten eingezogen wurden, hat somit den mit Abstand höchsten Abscheidegrad, da dort einerseits eine höhere Abscheidefläche bereit gestellt wird und andererseits die zuvor beschriebenen Effekte zwischen den Elektroden ausbleiben.

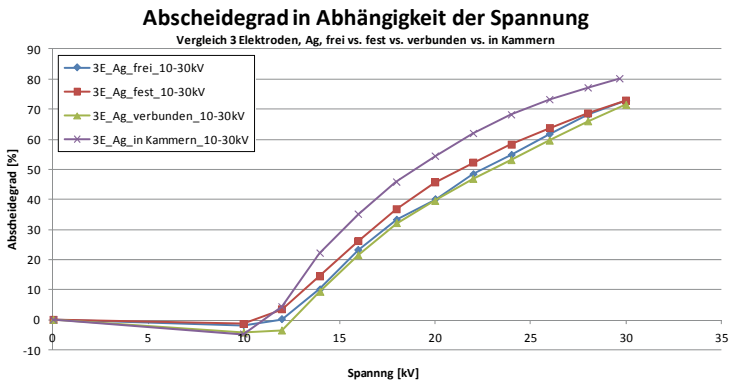


Abbildung 6: Abscheidegrade der Versuche mit 3 Silberdrahtelektroden in den vier unterschiedlichen Ausführungen.

In Abbildung 6 ist das Ergebnis der zu Abbildung 5 simultan durchgeführten Versuchsreihen, hier jedoch mit dem Unterschied von drei anstatt zwei verwendeten Elektroden, dargestellt. Die aus Abbildung 5 abgeleiteten Erläuterungen lassen sich hier nach genauer Auswertung der Messergebnisse ebenso anwenden und damit bestätigen. Dadurch, dass bei der Verwendung von drei Elektroden in Kammer-Anordnung eine zusätzliche Platte gegenüber der Zwei-Elektrodenanordnung eingefügt wurde und sich damit nicht nur die Sprühelektrodenfläche sondern auch die Niederschlagsfläche vergrößert, sind hier in etwa 10 % höhere Abscheidegrade zu beobachten. Diese Steigerung des Abscheidegrads ist im Falle der drei Elektroden in freier, verbundener und fester Anordnung mit einem nur leicht gesteigerten Stromfluss gegenüber zwei Elektroden zu erreichen. Zwei Elektroden in Kammer-Anordnung weisen ebenfalls nur einen gegenüber zwei Elektroden in freier, verbundener und fester Anordnung leicht gesteigerten Stromfluss auf. Bei der Kammer-Anordnung von drei Elektroden hingegen, steigt der Strom steil bis zur maximalen Leistungsgrenze der Hochspannungsversorgung an.

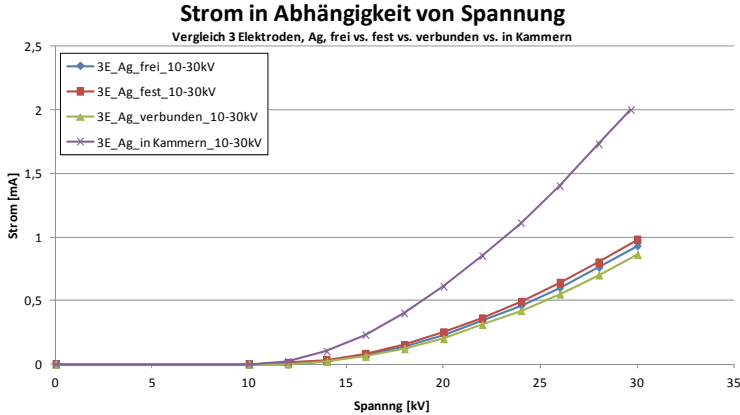


Abbildung 7: Strom-Spannungs-Charakteristik der Versuche mit 3 Silberdrahtelektroden in vier Ausführungen.

In Abbildung 7 ist dazu die Spannungs-Strom Charakteristik der vier unterschiedlichen Anordnungen der drei Elektroden dargestellt. Nach Townsend (Townsend, 1915 [13]) fließt der Radius und damit der Abstand der Niederschlags Elektrode von der Sprühelektrode, im Nenner quadratisch in die Näherungsgleichung zur Bestimmung des Stromflusses im Elektroabscheider mit ein. Neben weiteren wichtigen Abhängigkeiten des Stroms wie beispielsweise der Ionenbeweglichkeit, der Temperatur und der Spannung, ist dieser Abstand für die Ausprägung des Ionisierungsstroms prägend und erklärt den dargestellten, auffällig steilen Stromanstieg. Zwar erreichen drei Elektroden in Kammern höhere Abscheidewirkungen, aber zwei Elektroden in derselben Anordnung stellen die verfahrenstechnisch einfachere Lösung dar. Gleichzeitig lässt die Kammer-Anordnung von zwei Elektroden über die zuvor beschriebene Strom-Spannungs-Charakteristik, eine weitere Stromflusstigeigerungen bis zur Leistungsgrenze zu, was bei im Kessel auftretender tatsächlicher Feststoffpartikelbelastung wahrscheinlich benötigt wird. Aus den dargestellten Ergebnissen kann folglich die Anordnung von zwei Elektroden in einzelnen Kammern als die momentan vielversprechendste Elektrodengeometrie abgeleitet werden.

Ausblick

Die hier vorgestellten, bereits abgeschlossenen Laborversuche lassen erste Aussagen über geeignete Elektrodengeometrien zu. Die somit bestimmten vielversprechendsten Anordnungen werden während der Heizperiode 2012/2013 auf ihre Praxistauglichkeit hin in Feldversuchen getestet. Wie bereits beschrieben, herrschen im Biomassekessel für die technische Auslegung der Abscheidestrecke wesentlich anspruchsvollere Bedingungen als diese im Laborversuch nachgestellt werden können. Aus diesem Grund wird die Heizperiode 2012/2013 hauptsächlich dazu verwendet, den Laboraufbau in die Praxis zu überführen und Optimierungspotentiale zu identifizieren, welche beispielsweise die Herausforderung der Beherrschung von Temperatur und Rußablagerungen erfüllen können. Erste Versuche werden aktuell mit zwei Elektroden durchgeführt. Während der Bearbeitung der gefundenen Optimierungspotentiale in den Sommermonaten zwischen den Heizperioden 2012/2013 und 2013/2014 sollen parallel erste rechnergestützte Modellbildungen und

Simulationen das Re-Design der Ausführung des Staubabscheidesystems unterstützen. In der Heizperiode 2013/2014 sollen dann entsprechende Feldtests mit dem überarbeiteten Abscheidesystem durchgeführt sowie gleichzeitig die notwendigen sicherheitstechnischen Zulassungen erwirkt werden, so dass ab Anfang 2015 ein verkaufsfertiges Produkt zur Verfügung steht.

Literatur

- [1] Abgeändert mit Grafik aus: BOKOMPAKT Heiztechnik GmbH: Biomasseheizung Type AWK / ECO mit Brennstoffförderung „Mini, Standard, Industrie“ für Hackgut bis 60 mm Länge und sonstige körnige Biomasse, Waldhausen, 2010.
- [2] H.J. White: Industrial Electrostatic Precipitation. Leipzig, 1969, S. 142-177.
- [3] H.J. White: Industrial Electrostatic Precipitation. Leipzig, 1969, S. 144.
- [4] W. Deutsch: Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. Ann. der Physik, Volume 373, Issue 12, (1992), S. 335-344.
- [5] H.J. White: Industrial Electrostatic Precipitation. Leipzig, 1969, S. 154.
- [6] N. Troost: A new approach to the theory and operation of electrostatic precipitators for use on pulverized-fuel-fired boilers. Proc. Inst. Electric. Engng. Vol. 101 (1954), Heft 82, S. 369-383.
- [7] E. Weber, W. Brocke: Band1 Feststoffabscheidung. München, Wien 1973, S. 309-427.
- [8] H. J. Lowe, D. H. Lucas: The physics of electrostatic precipitation. Brit. J. Appl. Phys. Issue S2 (1953), S. 40.
- [9] Paul Falstad: 2D Electrostatics Applet. URL: <http://www.falstad.com/emstatic/index.html> (Stand: 08.10.2012).
- [10] Topas GmbH: Auszug aus dem Sicherheitsdatenblatt DEHS, (2008). URL: http://www.topas-gmbh.de/dateien/prospekt/dehs_prspd.pdf (Stand: 02.10.2012)
- [11] I. Obernberger, T. Brunner, G. Bärnthaler: Aktuelle Erkenntnisse im Bereich der Feinstaubemissionen bei Pelletsfeuerungen. (Stuttgart, 2005), URL: <http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-FeinstaubemissionenPellets-Stuttgart-2005-10-18.pdf> (Stand: 02.10.2012)
- [12] BOKOMPAKT Heiztechnik GmbH: Technische Anlagendokumentation Eco 50. Waldhausen, 2008.
- [13] J. S. E. Townsend: Electricity in Gases. New York, 1915, S. 374-378.

Wärme aus Holz - Feinstaubemissionen

Ingo Hartmann*, Frank Döhling, Volker Lenz, Torsten Schröder, Justus von Sonntag,
Tobias Ulbricht

Adresse: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
*E-Mail: ingo.hartmann@dbfz.de

Abstract

Im vom BMU geförderten Projekt „Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen“ wurden Maßnahmen und Einflüsse zu Staubemissionen aus Holzfeuerungen untersucht. Experimente zu Brennstoffeigenschaften, Verbrennungsprozessen und Abscheidern sowie Nutzereinflüssen wurden gekoppelt mit Staubanalysen. Ausgewählte definiert generierte Staubproben wurden für die Entwicklung von biologischen Testsystemen genutzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch technische Weiterentwicklung ein weiteres Absenken der Schadstoffemissionen an Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen möglich ist und zukünftig weiter verfolgt werden muss. Insbesondere Emissionen aus Einzelraumfeuerungen sind zusätzlich starken Nutzereinflüssen unterworfen, so dass sowohl Informationskampagnen als auch technische Ansätze für die Verringerung von Nutzereinflüssen grundlegend bearbeitet und untersucht wurden.

Die Arbeiten zur Toxikologie zeigen neue Ansätze zur Wirkungsweise von Staubemissionen in biologischen Systemen auf und heben die Bioverfügbarkeit von Staubbestandteilen als wichtigen Parameter hervor. Die Grundlagen für die Anwendung von Bioassays wurden erarbeitet und sind für zukünftige Minderungsmaßnahmen weiterzuentwickeln.

Schlagwörter: Biomasse, Holzfeuerungen, Emissionsminderung, Feinstaub

1 Einleitung

Im Wärmesektor hatte die Biomasse 2010 einen Anteil von über 92 % am erneuerbaren Endenergieverbrauch [1]. Unter Berücksichtigung der Entwicklungen der letzten Jahre wird die thermische Nutzung von Holz zur Wärmebereitstellung in Feuerungsanlagen kleiner Leistung auch in den nächsten Jahren eine überragende Rolle spielen. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien in nennenswerter Größenordnung werden neben den Treibhausgasemissionen auch andere umweltrelevante Effekte mehr und mehr diskutiert. So werden die Emissionen an klassischen Luftschadstoffen und hier insbesondere die Staubemissionen aus Biomassekleinf Feuerungsanlagen (Nennwärmeleistung < 1 MW) intensiv diskutiert. Als eine Konsequenz daraus wurde die Novellierung der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsgesetzes (1. BImSchV) im März 2010 abgeschlossen. Damit erfolgt eine stufenweise und deutliche Verschärfung der Grenzwerte für die Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO) und Staub (PM) [2].

Das Ziel des Projektes Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen (FKZ: O3MAP144) war es, zu einem vertieften Verständnis der Zusammenhänge bei der Feinstaubbildung in Kleinf Feuerungsanlagen zur energetischen Nutzung von Holz und deren toxikologischen Wirkung beizutragen. Deshalb wurden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Versuchstechnische Identifizierung von Minderungsmaßnahmen bezüglich Brennstoff, Nutzer, Feuerung und Sekundärmaßnahmen
- Vertieftes Verständnis der Aerosolzusammensetzung, atmosphärischen Alterung und toxikologischen Wirkung
- Identifizierung von Ansätzen zur Entwicklung und Verbesserung der Mess- und Bewertungsmethoden
- Entwicklung wirtschaftlich und ökologisch abgewogener Minderungsstrategien

Zur Erfüllung des Ziels waren neben theoretischen Recherchen umfangreiche experimentelle Erprobungen durchzuführen, um einerseits den Stand der am Markt erhältlichen Techniken zu erkunden. Andererseits wurden erkannte Verbesserungsansätze soweit erprobt werden, dass eine weitere Entwicklung zusammen mit der Industrie zukünftig ermöglicht wurde. Die gesammelten Erkenntnisse sollen direkt dazu beitragen, die Wärmebereitstellung aus Holz ökologisch verträglicher zu machen. Die Ergebnisse wurden und werden sowohl auf Tagungen, im Internet als auch als Druckschriften veröffentlicht. Die Bearbeitung der Fragestellung wurde auf Holzbrennstoffe beschränkt, da diese bisher den weit überwiegenden Anteil an eingesetzten Biomassen zur Wärmeerzeugung aus festen Stoffen ausmachen. Bei der Erfassung der tatsächlich in Kleinf Feuerungsanlagen genutzten Holz mengen wird auf die im Rahmen anderer Projekte am DBFZ gewonnenen Ergebnisse zurückgegriffen.

Die umfangreiche Aufgabenstellung untergliederte sich in sieben Arbeitspakete (AP) und erforderte die Einbindung weiterer Forschungseinrichtungen (vgl. Abbildung 1).








	DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH	Frank Döhling, Dr. Ingo Hartmann, Dr. Volker Lenz, Torsten Schröder, Andre Schwenker, Dr. Justus von Sonntag, Tobias Ulbricht, Nadja Weller
	Technologie- und Förderzentrum (TFZ)	Dr. Hans Hartmann, Claudia Schön, Peter Turowski
	Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der TU Hamburg Harburg (Analytik)	Dr. Joachim Gerth, Joachim Wiese
	Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der TU Hamburg Harburg (Ökotoxikologie)	Dr. Wolfgang Ahlf, Iris Gutiérrez, Birte Hegemann
	Universität Konstanz	Prof. Dr. Daniel R. Dietrich, Susanne Guggel
	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Sonja Mülhopt, Dr. Hanns-Rudolf Paur
	Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V. (IFT)	Dr. Olaf Böge, Ricarda Gräfe, Prof. Dr. Alfred Wiedensohler

Abbildung 1: Projektteam und -partner des vom DBFZ koordinierten BMU-Vorhabens.

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse des Projektes dargestellt. Eine vollständige Darstellung der Erkenntnisse inklusive eines Maßnahmenkataloges erfolgt im Beiratsbericht, der Ende 2012 veröffentlicht wird.

2 Mechanismus der Staubbildung

Bei der Verbrennung von fester Biomasse entstehen mit Aerosolen belastete Abgase. Die Menge und Zusammensetzung hängen von den Brennstoffeigenschaften, der Reaktionsführung, der Verbrennung und dem Nutzerverhalten ab. Da Biomasse stets mineralische Bestandteile enthält, werden durch die bei der Holzverbrennung vorherrschenden Glutbetttemperaturen von über 1.000 °C die mineralischen Bestandteile zunächst verdampft (siehe Abbildung 2).

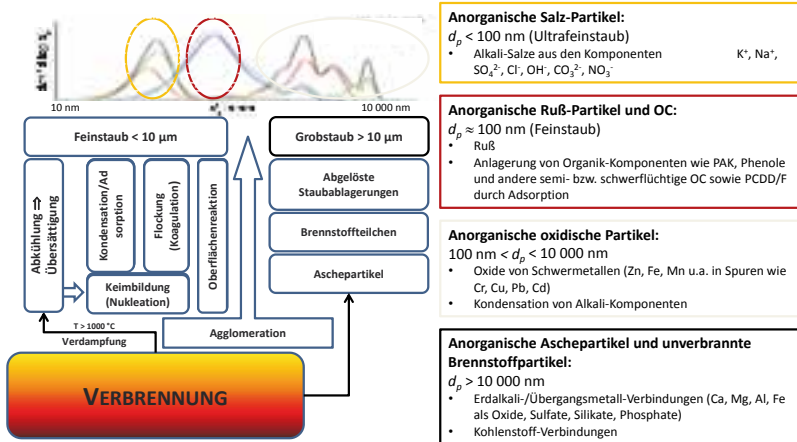


Abbildung 2: Vereinfachtes Schema zur Staubbildung bei der Holzverbrennung.

Durch Abkühlung der Abgase erfolgt eine Übersättigung mit einhergehender Keimbildung (Nukleation) sowie Kondensation. Durch Adsorption erfolgt während der Abkühlung Oberflächenwachstum sowie mit steigender Verweilzeit Agglomeration.

Zusätzlich zu den mineralischen Aerosolen bestehend aus Salzen und Oxiden werden bei hohen Temperaturen und lokalem Sauerstoffmangel primäre Rußpartikel gebildet. Die Vorgänge Nukleation, Kondensation, Oberflächenwachstum durch chemische Reaktionen/Adsorption und Agglomeration laufen ebenfalls bei der Rußpartikelbildung ab. Die primären Rußpartikel werden dabei durch Anwachsen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen durch Pyrosynthese gebildet. Je unvollständiger eine Verbrennung abläuft, desto mehr kohlenstoffreiche Rußpartikel werden gebildet. Ruß wirkt wie ein Adsorbens für gasförmige organische Moleküle, die damit am Ruß gebunden werden.

Auch können grobe Aschepartikel aus der Glutbettzone mitgerissen werden, die einen erheblichen Anteil an der Gesamtstaubmasse haben können.

Die Staubemissionen aus Holzfeuerungen bestehen somit aus Mischungen von Salzen, Oxiden und Ruß sowie schwerflüchtigen organischen Verbindungen.

3 Verdünnungstunnelprüfstand zur Emissionsmessung

Zur Messung der Einflüsse der Brennstoffeigenschaften stand der für das Projekt entwickelte und aufgebaute Vollstromverdünnungsprüfstand des DBFZ zur Verfügung. Das Ziel dieses Versuchsaufbaus ist es, schwerflüchtige kondensierbare und adsorbierbare Abgasbestandteile in der Staubmasse mit zu erfassen, da diese im Unterschied zur herkömmlichen Heißgasmessung im Abgaskanal in der Atmosphäre zur Partikelmasse beitragen.

Die aus der Verbrennung stammenden gasförmigen Bestandteile werden im senkrechten Abschnitt des Abgassystems aus dem unverdünnten Rohgas (Heißgasmessung) entnommen und einem geeigneten Gasanalysator (Heißgasmesssystem MCA der Fa. Dr. Födisch AG mit Thermo-FID [Fa. M&A] und O₂-Analysator [paramagnetisch, Oxymat 6 der Fa. Siemens]) zugeführt.

Am oberen Ende des senkrechten Rohrs wird über die Zufuhr von gefilterter und kalter Luft durch die raumlufttechnische Anlage (RLT-Anlage) das heiße Abgas verdünnt und abgekühlt. Im horizontalen Rohrabschnitt – dem eigentlichen Verdünnungstunnel – werden ebenfalls die gasförmigen Abgaskomponenten entnommen und analysiert. Schließlich werden die Abgase über den Schornstein abgeleitet, wobei der installierte Abgassauger für einen konstanten Unterdruck (Zug) im Verdünnungssystem sorgt.

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte mit Ausnahme der Gesamtstaubmessung kontinuierlich. Auch wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen und die Raumtemperatur kontinuierlich erfasst.

Die Entnahme von partikelförmigen Emissionen erfolgte diskontinuierlich im Rohgas und im verdünnten Abgas während des stationären Betriebs mit einer Sonde der Fa. Paul Gothe Messtechnik. Die gravimetrische Bestimmung der Gesamtstaubmenge erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2066, Blatt 1 nach dem Prinzip der isokinetischen Entnahme eines Teilvervolumenstroms aus dem Hauptabgasstrom. Um ausreichende Mengen für die Staubanlyse im Vollstromverdünnungstunnel zu gewinnen, wurde das vom TFZ entwickelte Planfilterhaltersystem für 150 mm Planfilter verwendet und das Probenahmeverfahren dafür speziell angepasst. Die Bedingungen für Probenahmeprozedur wurden gemeinsam mit dem TFZ einheitlich definiert. Pro Versuch wurde ein 150 mm großer Planfilter aus dem Verdünnungstunnel zur Analyse und Charakterisierung der Feinstäube geteilt und an die Projektpartner geschickt. Je ein 30°-Segment wurde zur EC/OC- und PAK-Analyse (16 EPA-PAK) ausgewählt. Das übrig bleibende große Reststück wurde nochmals halbiert und zur Analyse der anorganischen Komponenten genutzt. Dabei wurden die beiden kleinen Teilstücke direkt nach der Teilung tiefgefroren versendet, das große Reststück ohne thermische Behandlung äquilibriert und bis zur Versendung tiefgekühlt (-18 °C) aufbewahrt.

4 Einfluss der Brennstoffeigenschaften der Holzhackschnitzel mit variiertem Aschegehalt

Stellvertretend aus den umfangreichen Untersuchungen zu den Brennstoffeinflüssen auf die Verbrennungsemissionen werden nachfolgend die Ergebnisse zu den Holzhackschnitzel-Experimenten (Fichte) mit unterschiedlichen Aschegehalten diskutiert. Für diese Untersuchungen wurde ein handelsüblicher Kessel der Firma ETA Heiztechnik GmbH mit 70 kW Nennleistung (Typ: ETA Hack 70) eingesetzt. Dieser wurde mit einem auf einer Plattformwaage befindlichen HHS-Vorratsbehälter (Fa. ETA) betrieben, so dass eine Brennstoffmassenstrommessung erfolgen konnte. Die Wärmeauskopplung erfolgte mit einer speziellen Wärmeregelseinheit, die eine exakte Erfassung des Wärmestroms über Temperaturdifferenzmessung sowie Volumenstrommessung ermöglichte. Die am Verdünnungstunnelprüfstand des DBFZ standardmäßig installierten Geräte (Wärmeleistungsmessstation, Plattformwaage) ermöglichen die stufenlose Anforderung von Wärmeleistung und die Ermittlung des dabei erzielbaren Wirkungsgrades des Prüfkessels.

Für die Ermittlung des Ascheinflusses wurden Holzhackschnitzel (HHS) aus Fichte (FHHS) mit einer Größe von G50 und einem Wassergehalt von 8,2 Ma.-% als Ausgangsmaterial verwendet. Zur Einstellung unterschiedlicher Aschegehalt wurde feineres Rindenmaterial mit 10, 20 und 30 Ma.-% zugesetzt, dass vorher abgeseibt wurde, da die sehr feinkörnigen Bestandteile als nicht typische Rindenbestandteile identifiziert wurden. Die brennstofftechnischen Eigenschaften der FHHS und der abgeseibten Rinde wurde analysiert und in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Mischungseigenschaften wurden aus den Anteilen der

FHHS bzw. der Rinde errechnet und sind ebenfalls in der Tabelle 1 als Chargen mR-R10, mR-R20 und mR-R30 zu finden (entspricht 10, 20 und 30 Ma.-% Rindenanteil).

Tabelle 1: Brennstofftechnische Eigenschaften der untersuchten HHS mit unterschiedlichen Aschegehalten

Werte	FHHS	mR-R10	mR-R20	mR-R30	Rinde	Werte	FHHS	mR-R10	mR-R20	mR-R30	Rinde
Asche	0,3	3,7	7,0	10,4	33,8	Na	40	139	239	338	1.034
H_u	18.456	17.998	17.540	17.083	13.878	S	69	117	166	214	552
C	501.500	490.570	479.640	468.710	392.200	Si	596	10,4 56	20.317	30.177	99.200
H	66.300	63.050	59.800	56.550	33.800	Zn	9,2	14	18	23	54
N	3.100	3.100	3.100	3.100	3.100	Pb	1,4	1,9	2,5	3,1	7,1
Si/K	0,7	10	16	21	34	Cd	0,2	0,3	0,4	0,4	0,9
Aerosolbildner (K+Na)/ (Ca+Si)	0,69	0,10	0,07	0,05	0,04	Cr	2,4	10	18	26	81
Cl	0,0	29	58	87	290	Cu	1,0	2,4	3,9	5,3	16
Al	0,0	461	922	1.383	4.611	Mg	92	179	265	352	959
Ca	691	1.345	1.999	2.652	7.229	Mn	342	346	350	354	382
Fe	21	762	1.502	2.243	7.427	Ni	0,9	1,9	3,0	4,0	11
K	842	1.049	1.257	1.464	2.915	P	47	72	97	122	296
						As	0,1	0,2	0,2	0,3	0,8

Aschegehalt in Ma.-%; Heizwert H_u in kJ/kg_{TS}; Elemente in mg/kg_{TS}
 Aerosolbildner: Summe der Elemente S, Cl, K, Na, Zn, Pb in mg/kg_{TS}

Durch die Zumischung der Rinde wurde einerseits der Anteil an Aerosolbildner erhöht. Andererseits stieg dabei das Verhältnis von Si/K von 0,7 der Ausgangs-HHS auf 21 (bei mR-R30) an.

In Abbildung 3 sind die Emissionen und Kohlenmonoxid (CO) und Staub in Abhängigkeit vom Aschegehalt dargestellt.

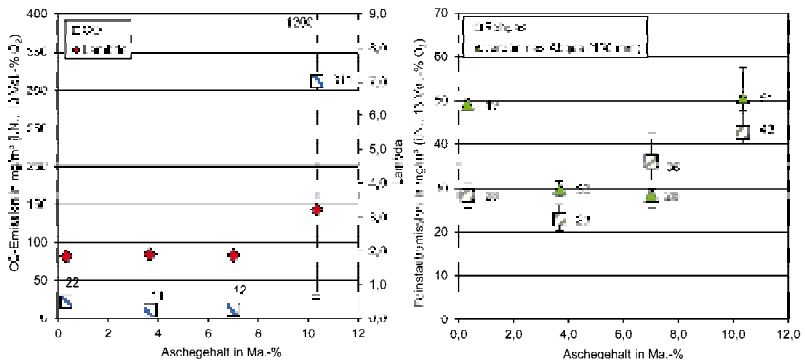


Abbildung 3: CO-Emissionen sowie Sauerstoffüberschuss (Lambda) im Rohgas sowie Staubemissionen im Rohgas und verdünnten Abgas bei unterschiedlichen Aschegehalten.

Die Ergebnisse zeigten, dass der eingesetzte Kessel auch bei höheren Aschegehalten eine vergleichsweise emissionsarme Verbrennung ermöglichte. Auch bei relativ hohen Aschegehalten von ca. 4 bzw. 7 Ma.-% erfolgte kein Anstieg der CO-Emissionen, die im Mittel kleiner als $20 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$ waren. Erst bei einem Aschegehalt von 10 Ma.-% stiegen die CO-Werte deutlich auf $311 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$ an. Diese Beobachtung konnte auf im Brennraum auftretende große Aschemengen zurückgeführt werden, welche die Zuführung von Primärluft durch den Rost behinderte, so dass lokaler Sauerstoffmangel auftrat und dabei die Oxidation zu CO_2 gehemmt wurde. Trotzdem lagen auch die CO-Werte bei 10 Ma.-% Asche deutlich unter den Grenzwerten der 2. Stufe der Kleinf Feuerungsverordnung (1. BImSchV).

Bei Betrachtung der Staubkonzentrationen viel auf, dass auch bei 10 Ma.-% Asche kein deutlicher Anstieg im Vergleich zum Ausgangsbrennstoff FHHS – beide Werte lagen bei etwa $50 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$ – erfolgte. Die geringsten Staubwerte wurden bei einem Aschegehalt zwischen 4 und 7 Ma.-% gemessen. Signifikante Unterschiede zwischen Rohgas und Verdünnungstunnel wurden lediglich beim Ausgangsmaterial FHHS mit dem geringsten Aschegehalt von 0,3 Ma.-% erhalten. HHS mit Aschegehalten über 3 Ma.-% sind am Markt kaum verfügbar. Eine Einordnung nach Norm DIN EN 14961-4 ist nur mit Aschegehalten kleiner als 3 Ma.-% möglich.

Nicht alleine der Aschegehalt beeinflusst die Emissionen bei der Verbrennung. Vielmehr bestimmt die Zusammensetzung des mineralischen Anteils der Brennstoffe das Emissionsverhalten. Auch bei einem hohen Aschegehalt können vergleichsweise geringe Staubemissionen erhalten werden, da das Verhältnis von Aerosolbildnern (K, Na, Cl, S) zu ascheeinbindenden Elementen (Si, Ca, Al) entscheidend ist. Vereinfacht kann das Verhältnis von Si zu K im Brennstoff für eine Vorabschätzung der zu erwartenden Staubemissionen genutzt werden. Je höher Si/K, desto stärker werden Silikate bei der Verbrennung gebildet, die eine Rostascheeinbindung der Aerosolbildner unterstützen.

Insbesondere die Schwankungsbreite der CO- und Staub-Konzentrationen zeigte am Beispiel der hier gezeigten Ergebnisse, dass ein hoher Ascheanteil jedoch zu einem instabilen Kesselbetrieb führen kann. Die CO-Messwerte bei HHS mit 10 Ma.-% Ascheanteil wiesen eine sehr hohe Streuung auf. In der Spitze wurde CO mit $1.200 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$ dabei emittiert (Mittelwert: $311 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$, Minimum: kleiner $50 \text{ mg/m}^3_{\text{i.N.,13\%O}_2}$). Auch bei den Staubkonzentrationen wurde eine Zunahme der Schwankungsbreite mit steigendem Aschegehalt beobachtet. Ausgehend von dieser Beobachtung sollte also nicht nur der Emissionsmittelwert sondern auch die Stabilität des Kesselbetriebs als Kriterium für zulässige Brennstoffeigenschaften genutzt werden. Ein hoher Aschegehalt führt zu einer starken Ansammlung von inerten Verbrennungsrückständen und ggf. zur Schlackebildung im Brennraum, wodurch die Verbrennung gestört und damit der stationäre Kesselbetrieb verhindert werden kann. Die starke Asche- und Schlackebildung erfordert zudem häufige Reinigungen und Wartungen an der Feuerungsanlage. Aschegehalte über 3 Ma.-% sind deshalb in jedem Fall zu vermeiden.

Bei Einsatz einer ausgereiften Kesseltechnologie zeigte sich, dass die Brennstoffeigenschaften einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Emissionen haben, wenn bestimmte Intervalle der Eigenschaftswerte eingehalten werden. Der Stand der Technik der Bestandsanlagen ist qualitativ schlechter als der für diese HHS-Untersuchungen eingesetzte Kessel einzuschätzen. Somit ist neben der Definition von Eigenschaftsintervallen in Brennstoffnormen die Entwicklung und Optimierung von am Markt verfügbarer robuster Kesseltechnologie ein wesentlicher Faktor für die emissionsarme Verbrennung von Holz mit nach Norm zulässigen variablen Brennstoffeigenschaften in Kleinanlagen.

Die Messungen mit HHS zeigten aber auch, dass die strengen Grenzwerte der 1. BImSchV mit HHS selbst bei hoher Verbrennungsqualität den Einsatz von Abgasnachbehandlungstechniken erfordern. So sollten HHS-Feuerungen im kleinen Leistungsbereich mittel- bzw. langfristig mit Staubabscheidern ausgerüstet werden. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit von wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen. Aus den Ergebnissen zur Marktbeobachtung von Abscheidersystemen kann geschlussfolgert werden, dass derzeit nur wenige zugelassene Aggregate zur Verfügung stehen. In den nächsten Jahren, verbunden mit einem Anwachsen des Marktes, sind auch gezielte Weiterentwicklungen und Produktzulassungen sowie ggf. eine Angebotskonsolidierung zu erwarten. In wenigen Jahren sollten entsprechende funktionsfähige Aggregate für Feuerungsanlagen unter 100 kW verfügbar sein.

5 Einfluss des Nutzerverhaltens auf Emissionen

Bei automatisch beschickten Holzfeuerungsanlagen ist der Einfluss infolge unsachgemäßer Bedienung durch den Betreiber gering. Vor allem handbeschickte Holzfeuerungen werden in vielen Fällen nicht korrekt betrieben. Die größten nutzerseitigen Emissionsminderungspotenziale stellen neben dem Anfeuervorgang und dem optimalen Nachlegezeitpunkt die richtige Scheitgröße und Befüllmenge dar.

Während in verschiedenen Handlungsempfehlungen die Zielsetzung beschrieben wird, möglichst schnell hohe Temperaturen zu erreichen, zeigen andere Untersuchungen, dass für eine staubarme Verbrennung ein moderater und damit nicht zu schneller und kontinuierlicher Anstieg der Abgastemperaturen anzustreben ist. Somit sind systematische Untersuchungen hinsichtlich des moderaten Anfeuerns bei stetig-stabilem Abbrand für eine staubarme Verbrennung von Stückholz notwendig. Bei Einzelraumfeuerstätten (ERF) für Stückholz wurde zum Beispiel der Einfluss von unterschiedlichen Scheitgrößen untersucht. Weiterhin wurde der Einfluss des Nachlegeverhaltens bei Scheitholzfeuerungen betrachtet. Hinsichtlich des Nachlegeverhaltens ist neben dem aus emissionstechnischer Sicht günstigsten Nachlegezeitpunkt auch die optimale Nachlegemenge für die unterschiedlichen Feuerungsanlagen zu ermitteln. Weiterhin sind Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Reinigung des Kaminzuges auf die Emissionen notwendig.

Bei ERF liegen Hinweise vor, dass der untere Abbrand (Sturzbrand) emissionsärmer verläuft. Ist bei diesen Feuerungen das Prinzip des oberen Abbrandes realisiert, sollte ein Anzünden von oben erfolgen. Weiterhin besteht die Notwendigkeit, für die unterschiedlichen Feuerungsanlagen die jeweils günstigste Form des Anfeuermoduls hinsichtlich der Scheitanordnung zu ermitteln.

Die Ergebnisse der aktuellen Messungen und auch die Diskussion mit dem Projektbeitrag zeigten, dass es schwierig ist, allgemeingültige Aussagen zu treffen, die für die hohe Vielfalt der im Betrieb befindlichen ERF gleichermaßen gelten. Allein der Nutzer bestimmt bei der derzeit verfügbaren Technik, wie gut die Feuerung betrieben wird und dabei hohe Staubemissionen erzeugt oder vermieden werden.

Um ein vertieftes Verständnis zu entwickeln, welchen Einfluss ein Betreiber einer Feuerungsanlage auf die Bildung vermeidbarer Emissionen ausübt, wurde eine Versuchsreihe mit ausgewählten freiwilligen Probanden im Labor durchgeführt. Die Ausgangssituation ist der Umstand, dass in der novellierten 1. BImSchV begrüßenswerter Weise die Notwendigkeit der Beratung bzw. der Unterrichtung von Feuerstättenbetreibern aufgenommen worden ist. Dadurch kann mittels gezielter Aufklärung Einfluss auf die Bildung gesundheitsgefährdender Emissionen genommen werden. Die vorangegangenen Recherchen über vor-

handene Informations- und Schulungsmaterialien für den Endkunden zeigten, dass bereits eine Vielzahl an Materialien zu diesem Thema existiert. Ob diese Materialien bekannt sind bzw. bei möglichen Betreibern für Aufklärung gesorgt haben, sollte anhand von weiterführenden Probandentests untersucht werden.

Die Probandentests im DBFZ-Technikum erfolgten mit einem handelsüblichen hochwertigen Stückholzkaminofen, der auf einer Normprüfdecke mit Abbrandwaage aufgebaut wurde. Die CO- und O₂-Konzentrationen im Abgas wurden mit einem Abgasmesskoffer der Firma EHEIM (Visit07) erfasst.

Sowohl für die Anheizphase als auch für den regulären Betrieb enthält die Anleitung des Kaminofenherstellers Angaben über die jeweilige Einstellung der Luftklappen sowie des temperaturgesteuerten Luftreglers. Für den Anheizvorgang bei Betrieb mit Holz wird vom Hersteller empfohlen, die Primärluft vollständig zu verschließen und auch während des gesamten Betriebes geschlossen zu halten. Die Primärluft ist nur für den Betrieb mit Braunkohlenbriketts zu öffnen. Die Sekundärluft ist während des Anheizvorganges und auch bei normalem Betrieb vollständig offen zu lassen. Der Temperatur-Luft-Regler ist auf eine vorgegebene Stufe einzustellen. In der Anleitung wird darüber hinaus das Anheizen von oben empfohlen.

Bei der Auswahl der Teilnehmer ist darauf geachtet worden, dass sich diese jeweils zur Hälfte in einer Gruppe der erfahrenen - und einer Gruppe der ungeübten Betreiber zuordnen ließen. Die Zuordnung erfolgte hierbei durch die persönliche Einschätzung der eigenen Kenntnisse beim Umgang mit Biomassefeuerungen. Mit einem Teilnehmerfeld von 18 Personen konnten jeweils neun Personen einer der Gruppen zugeordnet werden. Der Ablauf der Experimente wurde so festgelegt, dass jeweils ein Versuch am Vormittag und einer am Nachmittag stattfinden konnte. Vor Versuchsbeginn wurde die Kaminofenfeuerung abgekühlt und gereinigt, so dass zu jedem Versuchsbeginn die gleichen Ausgangsbedingungen gegeben waren. Für jeden der durchgeführten Versuche wurde ein Protokoll angefertigt. Zusätzlich zu dem praktischen Umgang mit dem Kaminofen wurden die Teilnehmer befragt.

Bezüglich der Befragung und auch der Probandenversuche konnte festgestellt werden, dass trotz der persönlichen Einordnung der Hälfte der Befragten als unerfahrene Nutzer die Mehrheit der Teilnehmer ein akzeptables Wissen zum Umgang mit der Feuerstätte hatte. Die starke Streuung bei den Fragen zur Luftregelung und auch hinsichtlich der Abhilfemöglichkeiten bei unregelmäßigem Flammenbild zeigte aber auch, dass hierfür Lösungen erarbeitet und kommuniziert werden müssen. Das Ziel sollte sein, dass jeder Feuerstätten-Betreiber eine allgemeingültige Standardlösung für die wichtigsten Fragestellungen vorliegen hat. Diese Standardlösungen sollten für die Mehrzahl der Feuerungsanlagentypen gleich sein. Alle weiteren Informationen (wie z.B. der Umgang mit automatisierten Verbrennungsluftregelungen) sind zusätzliches Wissen, welches über Bedienungsanleitung oder weiterführende Literatur kommuniziert werden sollte.

Im Projektkonsortium und mit dem Projektbeirat wurde diskutiert, ob beratende und aufklärende Maßnahmen tatsächlich zu einer signifikanten Staubminderung führen können. Aus den Messungen am TFZ ging zudem hervor, dass eine Verallgemeinerung der messtechnisch ermittelten optimalen Betriebsbedingungen schwierig ist, da sich die Feuerungstechniken in der Funktionsweise durchaus unterscheiden können. Eine Anlagengruppe repräsentativ für alle ausgeführten Anlagen anzunehmen, ist daher nicht möglich und wenig sinnvoll. Die Vielzahl der verschiedenen Prinzipien ist zudem vergleichsweise hoch und auch teilweise regional unterschiedlich. Diese Feststellung bestätigt die aus den Probandentests erhaltenen Erkenntnisse, dass die vom Betreiber zu beeinflussenden Parame-

ter einerseits auf wenige beschränkt und andererseits in einer Form kommuniziert werden müssen, die vom Betreiber verstanden und beachtet wird. Alle nicht leicht verständlichen weiteren nutzerseitig beeinflussbaren Bedingungen für hohe Verbrennungsemissionen müssen schon vorher eliminiert oder durch geeignete Maßnahmen auf ein Mindestmaß reduziert werden. Das bedeutet, dass den bedienerseitigen Einflussgrößen auf zwei sich grundsätzlich unterschiedlichen Wegen begegnet werden sollte. Es wird empfohlen, einerseits kommunikative Maßnahmen (Schulungen, Infomaterial, Betreibereinweisungen) zum richtigen Umgang mit der Feuerung zu ermöglichen und andererseits technische Maßnahmen in der Praxis zu verwenden, die den Nutzereinfluss weitestgehend begrenzen.

6 Feuerungsseitige Minderung von Emissionen

Die Arbeiten im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass die in der 1. BImSchV festgesetzten Grenzwerte für Gesamtstaub von $20 \text{ mg/m}^3_{i.N.,13\%O_2}$ nur von modernen vollautomatischen Holzpelletfeuerungen bei Einsatz von standardisierten ENPlus-Holzpellets sicher eingehalten werden können. Einzelraumfeuerstätten sowie Stückholz- und Hackschnittkessel müssen jedoch bei Beginn der 2. Stufe der 1. BImSchV ggf. mit Sekundärmaßnahmen zur weiteren Schadstoffreduzierung ausgerüstet werden.

Die durchgeführten Recherchen zur Feuerungstechnik und -optimierung führten dazu, dass zwei moderne Pelletkessel und eine neuartige Einzelraumfeuerstätte im Rahmen von Technikumsexperimenten näher untersucht wurden. Weiterhin wurden durch Literaturrecherchen der aktuelle Stand der Technik und die derzeit erreichbaren Emissionswerte hinsichtlich Staub, CO, VOC sowie NO_x ermittelt. Es wurden dabei feuerungstechnische Einflussgrößen und die Wirkungen experimentell untersucht.

Bekannte und in der Fachwelt anerkannte Grundsätze zur primärseitigen bzw. feuerungstechnischen Emissionsreduzierung werden nachfolgend aufgezählt und mit den theoretischen und experimentellen Erkenntnissen aus dem Projekt „Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen“ erweitert bzw. präzisiert.

Gleichmäßigkeit der Brennstoffdosierung: Die Zufuhr des Brennstoffes in die primäre Reaktionszone muss kontinuierlich oder zumindest quasikontinuierlich in einem großen Leistungsbereich ohne große Schwankungen und möglichst ohne markante Pulse erfolgen. Dabei darf die Brennstoffdosierung keine größeren Störungen des Glutbettes hervorrufen.

Glutbetteinheitlichkeit: Durch die Form des Rostes bzw. der Brennermulde oder des Brennertopfes soll ein gleichmäßig hohes und möglichst ungestörtes Glutbett gewährleistet werden. Das definierte Schüren des Feuers soll durch bewegliche Elemente erfolgen, um durch eine gleichmäßige langsame Bewegung des Glutbettes eine ausreichend hohe Reaktionsrate des entstehenden Gemisches aus Restkoks und Asche sicherzustellen. Dabei soll eine mechanische Trennung von unbrennbarer mineralischer Asche und Restkoks/Glut und ggf. eine Zerkleinerung größerer Glutstücke bewirkt werden, so dass die aus der Gasphase reagierenden Oxidations- und Vergasungsmittel besser zur reaktiven Oberfläche gelangen können. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Bewegungen im Glutbett nicht zu stark oder ungleichmäßig sind, um eine Aufwirbelung von größeren brennbaren Partikeln zu vermeiden.

Homogenität der Primärluftzufuhr: Die zur Zersetzung und Vergasung notwendigen gasförmigen Oxidations- und Vergasungsmittel sollen in der primären Reaktionszone möglichst gleichmäßig und ohne Erzeugung großer Turbulenzen dem reagierenden Glutbett zur Verfügung gestellt werden. Die Aufwirbelung von Asche und teil- bzw. unverbrannter Feststoffe durch lokale Spitzen der Strömungsgeschwindigkeiten ist zu vermeiden.

Ascheaustragskontinuität: Die bei der Biomasseverbrennung anfallende ausgebrannte und noch heiße mineralische Asche ist in regelmäßigen Abständen aus der primären Verbrennungszone zu entfernen. Die Zeitintervalle des Ascheaustrages sind hinsichtlich dem Aschegehalt und der Aschezusammensetzung des Brennstoffes zu optimieren. Idealerweise sollte durch die Konstruktion einer geeigneten Rostgeometrie und durch eine speziell angepasste Mechanik ein kontinuierlicher Ascheaustrag im Unterschied zu einem punktuellen Ascheaustrag erfolgen.

Unterstöchiometrie in der Primärzone (Glutbett): Die definierte unterstöchiometrische Luftzugabe in der primären Reaktionszone zur pyrolytischen Zersetzung und Feststoffvergasung unter Bildung ausreichend großer Mengen von flüchtigen brennbaren C1- und C2-Kohlenwasserstoffen sowie CO ist sicher zu stellen. Hierfür ist insbesondere ein definierter und regelbarer Zuluftweg in Verbindung mit einer ansonsten luftdichten Konstruktion notwendig.

Zonierung durch Luftstufung: Eine ausreichende Luftstufung zwischen Primär- und Sekundärreaktionszone ist durch örtlich voneinander getrennte Primär- bzw. Sekundärlufteinlässe vorzusehen. Die möglichst vollständige Verbrennung der noch nicht oxidierten Brenngase zu CO_2 und H_2O (Totaloxidation) bei einem Restsauerstoffanteil im Abgas von etwa 6 Vol.-% ist zu gewährleisten. Dazu sind der Einsatz geeigneter Sensoren und eine gut einstellbare Sekundärluftzufuhr notwendig. Außerdem ist durch die Gestaltung des Übergangs von Primär- zu Sekundärzone eine Rückdiffusion des Sauerstoffs auszuschließen.

3-T-Regel: In der Verbrennungszone ist durch entsprechende Auslegung eine ausreichend hohe aber nicht zu große Verweilzeit bei möglichst hohen Temperaturen und möglichst guter Vermischung von Brenngasen mit dem Oxidationsmittel Sauerstoff einzustellen. Hierfür wird die 3-T-Regel als Faustformel angewandt: „Time (Verweilzeit): $\tau \approx 0,5$ s; Temperature: $T > 850$ °C; Turbulence: $\text{Re} > 2.300$ “. Mit sinkender Verbrennungstemperatur muss eine entsprechend höhere Verweilzeit realisiert werden.

Hohe Verbrennungseintrittstemperatur: Die für die Verbrennung benötigte Sekundärluft definiert den Beginn der Sekundärreaktionszone. Deshalb ist zur Erzielung großer Oxidationsgeschwindigkeiten eine möglichst hohe Gasphasentemperatur (möglichst größer 1.000 °C) der gasförmigen Reaktionsmischung bei Eintritt in die Reaktionszone sicherzustellen.

Homogene Sekundärlufteindüsung: Die Eindüsung der Sekundärverbrennungsluft muss eine gute Vermischung von Oxidationsmittel und Brenngasen ermöglichen und darf keine lokale Flammeauskühlung hervorrufen. Die Geometrie der Sekundärlufteinlässe ist dementsprechend auszulegen und erfordert eine in-situ-Vorwärmung des Sekundärluftstromes durch indirekte Wärmeübertragung zwischen Primärreaktionszone und Sekundärluft.

Kein Flammenanschlag: Durch Auslegung und entsprechende geometrische Gestaltung der Verbrennungszone ist ein Anschlagen von Flammen an den kalten Reaktorwänden möglichst zu vermeiden, um eine lokale starke Auskühlung der Reaktionszone mit einhergehender Auslöschung der Flamme zu verhindern.

Kein Flammenabriss: Trotz einer möglichst hohen Turbulenz zur Erzielung einer guten Durchmischung in der Verbrennungszone ist ein Abreißen der äußeren Flammenbereiche zu vermeiden, weil dies zu einer lokalen Auskühlung der Reaktionszone bzw. zu einer vorzeitigen Auslöschung der Flamme führen kann.

Automatischer Ascheaustrag aus der Verbrennungskammer: Die bei der Verbrennung von aschehaltiger Biomasse entstehenden mineralischen Aerosole werden je nach Ausführung und Gestaltung der Wärmeübertrager an den inneren Flächen des Wärmeübertragers angelagert. Um die Bildung größerer Beläge oder Flocken und den möglicherweise damit einhergehenden Wiedereintrag bereits abgeschiedener Staubpartikel zu verhindern, müssen die Wärmeübertrager in regelmäßigen Abständen automatisch gereinigt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass bei der Abreinigung kein Wiedereintrag der Partikel in den Abgasstrom erfolgt.

Abgasrückführung (AGR): Um bei der Nutzung von asche- und/oder stickstoffreichen Brennstoffen in automatischen Feuerungen eine Umsetzung mit reduzierten Emissionen an Staub und Stickoxiden zu erzielen, kann eine Abgasrückführung eingesetzt werden. Dadurch wird die Sauerstoffkonzentration des Verbrennungsluftzustroms in die Primärreaktionszone herabgesetzt, weil zur Primärluft mit 21 Vol.-% O₂ eine bestimmte Menge an Abgas mit Sauerstoffkonzentrationen von 6,5 bis 10 Vol.-% zugemischt wird. Die AGR soll bei entsprechender Anpassung der Regelungsparameter dazu führen, dass es bei unterstöchiometrischer Fahrweise in der Primärreaktionszone zu einer Reduzierung des Sauerstoff/Brennstoff-Verhältnisses kommt, wodurch eine Kühlung des Glutbettes durch Herabsetzen der Reaktionstemperatur in der Primärzone erfolgen kann. Dieser Effekt kann die Verflüchtigung mineralischer Aschebestandteile verhindern. Um gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeiten in der Primärzone beizubehalten und in der Sekundärzone mehr Sauerstoff zur Verfügung zu stellen, müssen Primär- und Sekundärluft getrennt und unabhängig voneinander regelbar sein.

Sturzbrand: Der Einsatz einer Feuerung mit nach unten gerichteter Flamme – sogenanntes Unterbrandprinzip oder Sturzbrandprinzip – kann vor allem bei Stückholz eine feinstaubreduzierte Verbrennung ermöglichen. Bei Stückholzkesseln ist der Einsatz des Unterbrandes Stand der Technik, wobei die Kessel als sogenannte Stückholzvergaserkessel am Markt angeboten werden. Aber auch vereinzelt bei Stückholzkaminöfen (zwei Hersteller bekannt) wird das Sturzbrandprinzip genutzt. Zudem werden in Europa lediglich von einem einzigen bekannten Hersteller Pellet- und Hackschnitzelkessel mit Sturzbrand im Nennleistungsbereich von 10 bis 70 kW angeboten.

Die emissionsreduzierende Wirkung kann durch die bessere Zonierung der Temperaturprofile im Glutbett begründet werden. Die Primärluft wird dabei in gleicher Richtung der Reaktionsfront im Glutbett geführt, so dass mit steigender Verweilzeit im Glutbett die Gastemperatur steigt. Vor allem bei automatisch beschickten Feuerungen kann durch die Art der Zuführung des Brennstoffes – der Brennstoff wird nicht direkt im Gegen- oder

Querstrom zu der Flammenfront dem Glutbett zugeführt – eine ungestörtere Reaktionsfront im Glutbett ermöglicht werden.

Ein weiterer Grund für geringere Emissionen an CO und VOC wird in der katalytischen Wirkung der bei der Biomasseverbrennung gebildeten heißen mineralischen bzw. oxidischen Aschen gesehen. Zudem kommen die Brenngase intensiv mit den glühenden Brennstoffpartikeln in Kontakt. Die bei der Zersetzung und Vergasung des Feststoffes entstehenden organischen flüchtigen Spezies werden an der Oberfläche der heißen Asche oder dem reagierenden Restkoks weiter zersetzt und dabei in reaktive C1- und C2-Gasphasenspezies überführt, die bei ausreichend hohen Temperaturen und definierter Zumischung von Verbrennungsluft schnell zu den Zielprodukten der vollständigen Verbrennung (CO₂, H₂O) oxidiert werden.

7 Sekundäre Maßnahmen der Emissionsminderung

Neben der Verbesserung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Feuerungen können Emissionen zusätzlich auch durch verschiedene Sekundärmaßnahmen gemindert werden. Diese haben bei Verwendung von Holzbrennstoffen vor allem bei der Nachrüstung von bestehenden Anlagen und bei der Entwicklung sogenannter „Nullemissions-Feuerungen“ Bedeutung. Für ökologisch interessierte Kunden können Sekundärmaßnahmen eine sinnvolle Ergänzung zu brennstoffseitig und feuerungsseitig optimierten und richtig betriebenen Holzfeuerungsanlagen sein, um Staubemissionsmengen um 1 mg/m³_{i.N.,13%O₂} zu erzielen und damit staubseitig das Emissionsniveau eines Ölkessels zu erreichen. Insofern war es das Ziel, den Stand der Wissenschaft und Technik bei Abscheiden für Kleinf Feuerungsanlagen zu erfassen, darzustellen und zukunftsweisende Entwicklungsansätze aufzuzeigen.

Eine umfassende Marktrecherche ergab, dass im Bereich der holzbefeuerten Kleinanlagen hauptsächlich elektrostatische Abscheider zum Einsatz kommen. In den letzten Jahren kamen Katalysatoren bzw. katalytisch aktive Filter hinzu, welche an ERF eingesetzt werden können. Die Hauptwirkung der Katalysatoren zielt auf die Reduzierung gasförmiger Schadstoffe ab. Auch ein katalytisch unterstützter Abbau von an Katalysatoroberflächen angelagerten Rußbestandteilen wird häufig diskutiert. In Bezug auf Staub erfolgt bei Katalysatoren meist eine Tiefenfiltration, wobei eine zunehmende Beladung des Katalysators mit Staub die Wirksamkeit des Katalysators verringert. Somit ist eine Staubabscheidung auf dem Katalysator nicht erwünscht. Zudem erfolgt durch Staubablagerungen auf dem Katalysatorträger ein Anstieg des Druckverlustes, so dass sicherheitsrelevante Aspekte beim Betrieb an Kleinf Feuerungsanlagen berücksichtigt werden müssen.

Als eine weitere Möglichkeit zu Reduzierung der Staublast des Abgases wurden Abgaskondensationsanlagen angeboten, welche mit dem Ziel der Wärmerückgewinnung entwickelt wurden. Diese weisen jedoch im Gegensatz zu echten Nassabscheidern sehr geringe Abscheidegrade auf, so dass bei diesen Anlagen zunehmend auf das Verkaufsargument der Staubreduzierung verzichtet wird. Klassische Wäschersysteme oder filternde Abscheider sind aufgrund der notwendigen Nebenaggregate und Druckverluste kaum für Kleinanlagen zur Verbrennung von naturbelassenem Holz oder Holzpresslingen wirtschaftlich einsetzbar. Massekraftabscheider wie Zyklone eignen sich aufgrund der Trenncharakteristik nur als Vorabscheider.

Viele Entwicklungen wurden in Erwartung schärferer Staubgrenzwerte für Kleinf Feuerungsanlagen und somit eines Marktes für Nachrüstsystemen begonnen. Aufgrund der Ausgestaltung der entsprechenden Vorschrift (1. BImSchV) entfällt jedoch ein großes Markt-

segment. Der Grund hierfür ist, dass heutige ERF die Grenzwerte während der speziellen Typenprüfmessung einhalten müssen und die langen Übergangsfristen für Bestandsanlagen den Austausch der Feuerung und nicht eine Nachrüstung mit einem Abscheider wahrscheinlich machen. Ein weiteres Hindernis für die Entwicklung von Staubabscheidern für Kleinf Feuerungsanlagen waren Unklarheiten in Bezug auf die Anforderungen bei der baurechtlichen Zulassung. Diese wurden erst in den letzten zwei Jahren für Scheitholz und Holzpellets konkretisiert.

Im Rahmen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass zur Bewertung eines Abscheiders ein Kurzzeitversuch in Kombination mit einem Praxistest zielführend ist. Im Kurzzeitversuch sind Aussagen zu erreichbaren Abscheidegraden unter verschiedenen definierten Bedingungen möglich, während im Praxistest die Beurteilung der Fehleranfälligkeit und Korrosionsstabilität der Komponenten in Vordergrund steht, aber auch Fragen zum Abscheidegrad unter Praxisbedingungen beantwortet werden können.

Im Gesamtkontext konnte festgestellt werden, dass für holzbetriebene Kleinf Feuerungsanlagen Abscheidersysteme verfügbar sind, um Staubkonzentrationen im Abgas senken zu können. Diese Anlagen sind jedoch nur in engen Grenzen wirtschaftlich einsetzbar. Eine mögliche Applikation ist stark abhängig von konkreten gesetzlichen Forderungen und deren Ausgestaltung. Auch ist der Nachweis der Praxistauglichkeit schwierig und erfordert die Weiterentwicklung von den unterschiedlichen Systemen, um mittelfristig Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen wirksam reduzieren zu können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im vom BMU geförderten Forschungsvorhaben „Wärme aus Holz – Feinstaubemissionen“ wurden umfangreiche Erkenntnisse zur Abhängigkeit von Emissionen aus Holzverbrennungsanlagen für den Haushaltsbereich erarbeitet. Bestandteil der Arbeiten waren die Verbrennungsoptimierung, Abgasnachbehandlungstechniken sowie Nutzer- und Brennstoffeinflüsse. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass variable Brennstoffeigenschaften bei Einsatz von robuster und optimierter Feuerungstechnik gut ausgeglichen werden. Allerdings müssen die Feuerungen dabei regelmäßig gewartet und gereinigt werden. Ebenso konnte gezeigt werden, dass am Markt zwar teilweise geeignete Feuerungsanlagen für eine emissionsarme Verbrennung zur Verfügung stehen, aber trotzdem Anlagen mit verbesserungsfähiger Technik den Bestand dominieren. Weitere Anstrengungen bei Industrie und Forschung sind jedoch vorhanden, um in den nächsten Jahren optimierte Anlagen auch teilweise in Kombination mit Abgasnachbehandlungsverfahren überwiegend im Bestand für den Haushaltssektor zur Verfügung zu stellen.

Nicht zu vernachlässigen ist nach den Arbeiten von TFZ und DBFZ der Nutzereinfluss insbesondere bei Einzelraumfeuerungen. Durch gezielte Informationskampagnen und auch technische Weiterentwicklung sowie Brennstoffnormung sollen hier auch in Zukunft umfangreiche Maßnahmen erfolgen, um die auf dem Prüfstand erzielbaren Emissionswerte weitestgehend auch in der Praxis zu ermöglichen.

In dem Vorhaben wurden auch erstmals biologische Testsysteme gemeinsam mit Forschern der Universität Konstanz, der TU Hamburg-Harburg und dem Karlsruher Institut für Technologie für die Toxizitätsbewertung von Staubemissionen aus Holzfeuerungsanlagen entwickelt bzw. adaptiert. Dabei zeigte sich, dass die Stärke der toxikologischen Wirkung bedeutend von der Bioverfügbarkeit abhängt. Daraus lässt sich ableiten, dass die submers arbeitenden Systeme (Partikel werden in einem Medium gelöst und dabei den Bioassays zur Verfügung gestellt) die Effekte von Schadstoffen je nach Beschaffenheit der Staubpro-

ben verfälschen können. Um die Wirkungen von Schadstoffen auf den menschlichen Organismus durch Atmung besser abbilden zu können, sollten Expositionspfade stärker berücksichtigt werden. Dazu wurde die vom KIT im Rahmen des Vorhabens gebaute mobile Expositions-kammer entwickelt, an Feuerungsprüfständen von KIT und DBFZ in Betrieb genommen und mit biologischen Testsystemen bestückt. Die Ergebnisse deuten auch hier darauf hin, dass die Exposition/Deposition und die Bioverfügbarkeit entscheidende Kriterien für eine Toxikologie-Bewertung sind.

Die Ergebnisse sind für die Umsetzung und zukünftige Ableitung von Minderungsmaßnahmen wegweisend und zeigen insbesondere hinsichtlich der Toxikologie weiteren Forschungsbedarf auf. Die biologischen Testsysteme sind weiter zu entwickeln. Auch sind Detailstudien zu Einflüssen der Verbrennungsprozesse beispielsweise durch Brennstoffeigenschaften oder Feuerungsgestaltung sowie Abgasnachbehandlung voranzutreiben. Das Ziel muss es sein, die toxikologischen Erkenntnisse in den Praxisbetrieb von Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen einfließen zu lassen. Das Projektkonsortium strebt deshalb weitere Forschungsarbeiten an, um die zahlreichen Fragen mit Praxisbezug in den nächsten Jahren beantworten zu können.

Literatur

- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): Basisdaten Bioenergie Deutschland. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2011.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV).

Projektförderung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 03MAP144 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Reduzierung von NO_x-Emissionen durch Brennstoffstufung bei der thermischen Verwertung von Alternativen zum Brennstoff Holz

Martin Meiller*, Michael Jakuttis, Samir Binder

Adresse: Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg
*E-Mail: martin.meiller@umsicht.fraunhofer.de

Abstract

Die negativen Auswirkungen des Klimawandels und die Begrenztheit fossiler Energieträger zwingen verstärkt zu einem Umdenken in der Energiepolitik. Deshalb sollen für die Energie- und Wärmeversorgung der Zukunft vermehrt regenerative Quellen herangezogen werden. Durch eine intensiviertere Nutzung biogener Festbrennstoffe können fossile Energieträger teilweise ersetzt werden. Vor diesem Hintergrund hat die energetische Verwertung von Holz in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Da einer regenerativen Nutzung des Brennstoffes Holz jedoch natürliche Grenzen gesetzt sind, ist es erforderlich Alternativen zu finden und deren Einsatz zu erproben. Um diese Entwicklung voranzutreiben, ist es unerlässlich das vorhandene Brennstoffspektrum zu erweitern und bisher nicht oder anderweitig genutzte Stoffe für die Energieversorgung heranzuziehen. Viele potenzielle Brennstoffe weisen jedoch auf Grund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften erhebliche Nachteile bei der Verbrennung auf. Bei vielen potenziellen biogenen Brennstoffen liegen beispielsweise hohe Stickstoffgehalte vor, die wegen erhöhter Emissionen von Stickoxiden zu Schwierigkeiten führen. Infolgedessen ist die Nutzung vieler Stoffe zwar klimafreundlich, nicht aber nachhaltig und umweltfreundlich.

Wir haben es uns bei Fraunhofer UMSICHT am Institutsteil Sulzbach-Rosenberg zur Aufgabe gemacht eine Feuerung zu entwickeln, in der stickstoffreiche Brennstoffe verbrannt werden können, ohne hohe Mengen an Stickoxiden zu emittieren. Dies soll durch primärseitige Maßnahmen mit Hilfe des Prinzips der Brennstoffstufung erreicht werden, bei dem durch den Einsatz von Primär- und Sekundärbrennstoff gezielt unterschiedliche Verbrennungszonen geschaffen werden. So kann auf teure Sekundärmaßnahmen verzichtet und damit die dezentrale Nutzung bestimmter biogener Brennstoffe in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen ermöglicht werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Versuchsanlage im Technikum des Institutsteils Sulzbach-Rosenberg aufgebaut und optimiert. Es wurden erste Versuchsreihen mit Brennstoffmischungen aus Rapspresskuchen, der einen Anteil an Brennstoffstickstoff aufweist, und Holz in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen durchgeführt. Dabei konnten Reduktionseffekte von Stickoxiden von über 50 % erreicht werden. Als Reduktionsbrennstoff wurde Erdgas eingesetzt. In den nächsten Entwicklungsschritten soll die Reduktionsleistung weiter verbessert und gleichzeitig ein möglichst effizienter Einsatz des Reduktionsbrennstoffes sichergestellt werden.

Neben der Möglichkeit Gas als Reduktionsbrennstoff für den Abbau von Stickoxiden einzusetzen, kann der Gasbrenner auch im Verbrennungsmodus ohne die Feststofffeuerung betrieben werden. So können Phasen mit geringem Wärmebedarf zum Beispiel im Sommer abgedeckt werden. Diesen Schwachlastbetrieb gilt es im weiteren Projektverlauf zu optimieren.

Letztendlich ist es das Ziel von Fraunhofer UMSICHT die Entwicklung der Feuerung soweit voranzutreiben, dass das Feuerungskonzept zusammen mit interessierten Nutzern in die Demonstrationsphase überführt werden kann.

Schlagwörter Stickoxid-Emissionen, Dezentrale Feuerungstechnik, Brennstoffstufung, Biogene Reststoffe, Thermische Verwertung

Motivation

Die negativen Auswirkungen des Klimawandels und die Begrenztheit fossiler Energieträger zwingen verstärkt zu einem Umdenken in der Energiepolitik. Durch eine intensive Nutzung biogener Festbrennstoffe können fossile Energieträger teilweise ersetzt werden. Um diese Entwicklung voranzutreiben, ist es unerlässlich das vorhandene Brennstoffspektrum zu erweitern und bisher nicht oder anderweitig genutzte Stoffe für die Energieversorgung heranzuziehen. Mögliche Einsatzstoffe sowie deren erhöhter Stickstoffgehalt im Vergleich zu Fichtenholz zeigt Abbildung 1.

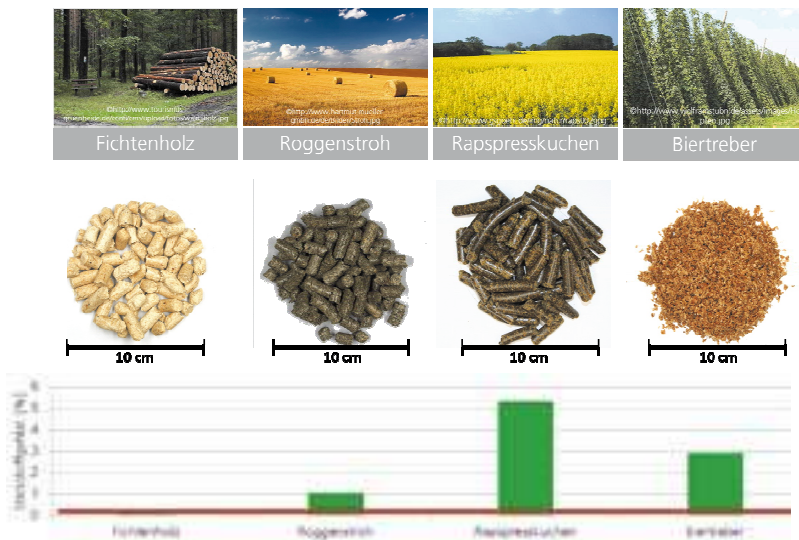


Abbildung 1: Stickstoffgehalte potenzieller biogener Brennstoffe im Vergleich zu Fichtenholz.

Hintergrund

Entstehung von Stickoxiden

Um die Emissionen eines Schadstoffes zu reduzieren, ist es von grundlegender Bedeutung, die Wege und Ursachen zu kennen, die zu dessen Bildung führen. Bei der Entstehung von Stickoxiden aus Verbrennungsprozessen sind drei Entstehungspfade ausschlaggebend (Hill/Smoot 2000):

- Thermisches NO_x
- Promptes NO_x
- Brennstoff- NO_x

Thermisches und promptes NO_x werden aus dem in der Luft enthaltenen Stickstoff gebildet und entstehen auf Grund der hohen Bindungsenergie von molekularem Stickstoff erst ab Temperaturen von über 1.100°C in relevanten Mengen. Bei der Verbrennung von Biomasse spielen diese beiden Mechanismen wegen der vergleichsweise geringen Temperaturen keine Rolle.

Brennstoff- NO_x , hingegen entsteht bei der Umsetzung des chemisch im Brennstoff gebundenen Stickstoffs. Während ein Großteil des Stickstoffs in Form flüchtiger Verbindungen aus dem Brennstoff entweicht, bleibt auch ein Teil in der Asche zurück. Der flüchtige Anteil des Brennstoffstickstoffs reagiert, abhängig von den Verbrennungsbedingungen, vor allem über die Zwischenprodukte HCN und NH_i (mit $i=1, 2, 3$) zu NO_x oder zu N_2 . Dabei ist die Gegenwart von Sauerstoff von entscheidender Bedeutung. Ist Sauerstoff in ausreichender Menge vorhanden entstehen vorwiegend Stickoxide, während bei Sauerstoffmangel die Bildung von molekularem Stickstoff bevorzugt abläuft (Koger 2009, Miller/Bowman 1989, Kaltschmitt/Hartmann 2001).

Das folgende Schaubild zeigt die Hauptreaktionswege bei der Umsetzung von chemisch gebundenem Stickstoff.

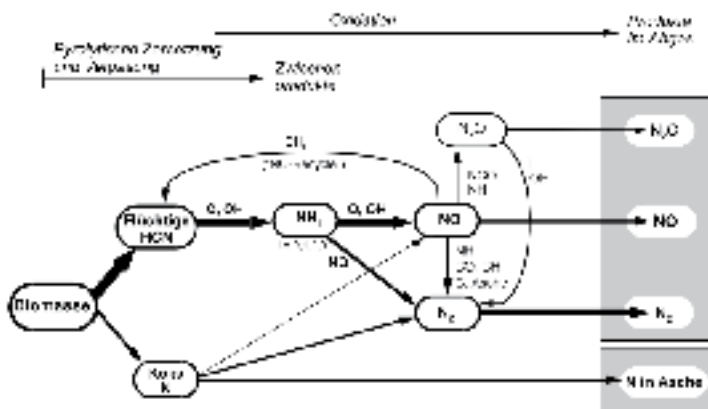


Abbildung 2: Reaktionsschema zur Umsetzung von Stickstoff in Verbrennungsreaktionen (Kaltschmitt/Hartmann 2001).

Maßnahmen zur Minderung von Stickoxid-Emissionen

Als Sekundärmaßnahmen werden Prozesse bezeichnet, die bestimmte Stoffe im Nachgang der Verbrennung aus dem Rauchgas entfernen. Im großtechnischen Bereich finden vor allem das SCR (Selective Catalytic Reduction) und das SNCR-Verfahren (Selective Non Catalytic Reduction) bei der Reduzierung von Stickstoffoxiden Anwendung. Höhere Investitionskosten für nachgeschaltete Rauchgasreinigungsanlagen fallen jedoch insbesondere bei kleineren und mittleren Anlagen, wie sie im Bereich der dezentralen Energieerzeugung üblich sind, ins Gewicht. Um auch dezentrale Feuerungen emissionsarm und wirtschaftlich betreiben zu können, ist es wichtig, kostengünstige Primärmaßnahmen zu finden, welche die auftretende Schadstoffbelastung zuverlässig auf das gewünschte Maß reduzieren.

Möglichkeiten zur primärseitigen Minderung von Stickoxidemissionen stellen Feuerungen mit gestufter Verbrennung dar, bei denen Zonen mit unterschiedlichen Reaktionsbedingungen gebildet und so Emissionen reduziert werden. In Abbildung 3 werden die Konzepte Luftstufung und Brennstoffstufung gegenübergestellt und die Unterschiede zwischen den Verfahren aufgezeigt.

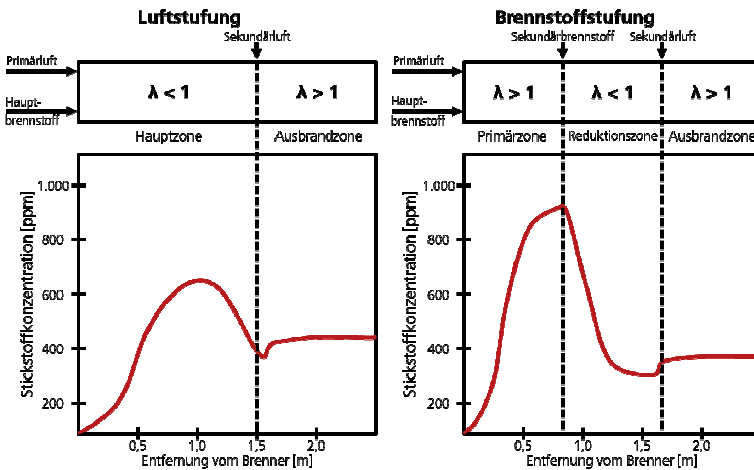


Abbildung 3: Gegenüberstellung von Luftstufung und Brennstoffstufung (Joos 2006).

Bei der Luftstufung wird der Brennraum in zwei verschiedene Zonen mit unterschiedlichen Reaktionsbedingungen eingeteilt, die sich vor allem hinsichtlich der Luftzahlen unterscheiden. In der unterstöchiometrischen Primärzone erfolgt die Entgasung und Zersetzung des Brennstoffs. Durch den Luftmangel im Primärbereich der Feuerung geht die Umwandlungsrate von Brennstoffstickstoff zu NO zurück. Die Primärluftzahl lässt sich jedoch nicht beliebig senken, da sonst die Qualität des Ausbrands leidet. Auf Grund hoher Temperaturen besteht die Gefahr, dass der Ascheerweichungspunkt überschritten wird. Dies kann den Verbrennungsprozess stören und einen vollständigen Ausbrand des Brennstoffs behindern. Insofern eignet sich die Luftstufung vor allem für Brennstoffe deren Asche hohe Versinterungstemperaturen (z. B. Holz $\sim 1.300\text{ }^{\circ}\text{C}$) aufweist. Problematisch ist jedoch der

Einsatz von Brennstoffen, die auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung einen niedrigeren Ascheschmelzpunkt haben, wie z. B. viele halmgutartige Brennstoffe (800 °C bis 900 °C).

Auch bei der Brennstoffstufung wird eine Reduktionszone geschaffen, jedoch erfolgt die Erzeugung dieser sogenannten „fetten“ Zone durch die Zuführung eines sekundären Brennstoffs. Somit kann die Verbrennung in der Primärzone mit einem Überschuss an Sauerstoff stattfinden, was die Qualität des Ausbrandes und der Verbrennung im Allgemeinen positiv beeinflusst. Im Vergleich zum Konzept der Luftstufung, bei der die Bildung von NO durch unterstöchiometrische Bedingungen in der Primärzone bereits verhindert wird, entstehen bei der Brennstoffstufung zunächst vergleichsweise höhere Konzentrationen an Stickoxiden (vgl. Abbildung 3), (Joos 2006). Durch die Zugabe des Sekundärbrennstoffs wird im Anschluss an die Hauptverbrennungszone die Reduktionszone, eine Zone mit Brennstoffüberschuss, erzeugt. Dort laufen die entscheidenden NO-Abbaureaktionen ab. Ausgangspunkt ist die sogenannte NO-Recycle-Reaktion (siehe Abbildung 2), bei der Kohlenwasserstoffradikale mit NO zu HCN reagieren. Die Radikale bilden sich aus dem zugegebenen sekundären Brennstoff. Bei ausreichender Verweilzeit in der unterstöchiometrischen Reduktionszone wird das gebildete HCN über NH-Spezies zu molekularem Stickstoff umgesetzt. NH-Radikale wiederum sind in der Lage weiteres NO abzubauen. In der Ausbrandzone erfolgt dann die Zugabe weiterer Verbrennungsluft. Dort sollen eine vollständige Verbrennung sowie eine möglichst geringe Rückoxidation von N-Spezies zu NO erfolgen (Salzmann/Nussbaumer 2001).

Neben der Art des Sekundärbrennstoffs ist vor allem das Einsatzverhältnis von Haupt- und Reduktionsbrennstoff von Bedeutung. Das Verhältnis der chemischen Energie des sekundären Brennstoffs zur insgesamt eingebrachten chemischen Energie beider Brennstoffe definieren Nussbaumer und Salzmann als Reburn-Fuel-Rate (RFR) (Salzmann/Nussbaumer 2001).

In der Primärzone soll ein vollständiger Ausbrand des Festbrennstoffs erfolgen, ohne dass dabei eine zu hohe Restkonzentration an Sauerstoff in die Reduktionszone gelangt. Hohe Sauerstoffkonzentrationen am Ende der Primärzone beeinflussen die Menge an sekundärem Brennstoff, die benötigt wird, um reduzierende Bedingungen in der Reduktionszone zu schaffen. Es gilt je höher der Restsauerstoffgehalt, desto mehr Sekundärbrennstoff wird benötigt. Aus verfahrenstechnischer Sicht ist ein hoher Anteil an sekundärem Brennstoff zwar durchaus zu begrüßen, da eine hohe Reburn-Fuel-Rate gute NO-Minderungen erwarten lässt. In der Praxis ist ein hoher Bedarf an sekundärem Brennstoff aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten jedoch nicht sinnvoll.

Weitere wichtige Faktoren, die großen Einfluss auf den Erfolg der Brennstoffstufung haben, sind die Luftzahlen in den unterschiedlichen Zonen sowie Temperatur, Verweilzeit und Durchmischung in der Reduktionszone.

Methodik

Die Versuchsanlage ist ein für Forschungszwecke umgebauter Hackgutkessel. Die Nennwärmeleistung ist mit 50 bis 190 kW und die Spitzenleistung mit 200 kW angegeben. Im Originalzustand ist die Anlage für Hackschnitzel der Größenordnung G30 bis G50 ausgelegt. Die Entaschung erfolgt über einen automatischen Stufenrost sowie einer unterhalb angebrachten Ascheaustragungsschnecke.

Für den Forschungsbetrieb des Institutsteils Sulzbach-Rosenberg von wird die Anlage grundlegend verändert und an einen Betrieb mit Brennstoffstufung angepasst. Um eine

Brennstoffstufung zu ermöglichen, erfolgt eine Erweiterung der Anlage um zwei Züge, wodurch die Verweilzeit in der Feuerung vergrößert und Raum für eine Reduktionszone geschaffen wird. Über drei Stützen kann ein mobiler Brenner angebracht werden und so die Größe der Zone sowie die Strömungsverhältnisse entsprechend variiert werden. Der Brenner ist eine Spezialanfertigung, die es erlaubt Reduktionsbrennstoff in die Feuerung zu dosieren ohne diesen direkt zu verbrennen, was eine grundlegende Voraussetzung für die Realisierung einer Brennstoffstufung darstellt.

Darüber hinaus kann die Feuerung auch allein mit Erdgas als Brennstoff betrieben werden, um so z. B. den Teillastbetrieb im Sommer abzudecken.

Neben dem Sekundär- und Primärbrennstoff können auch die Luftmassenströme gesteuert werden. In der folgenden schematischen Schnittdarstellung (Abbildung 4) durch die Anlage ist die Aufteilung in die verschiedenen Zonen zu erkennen, außerdem können die Brennstoff- und Gasströme nachvollzogen werden.

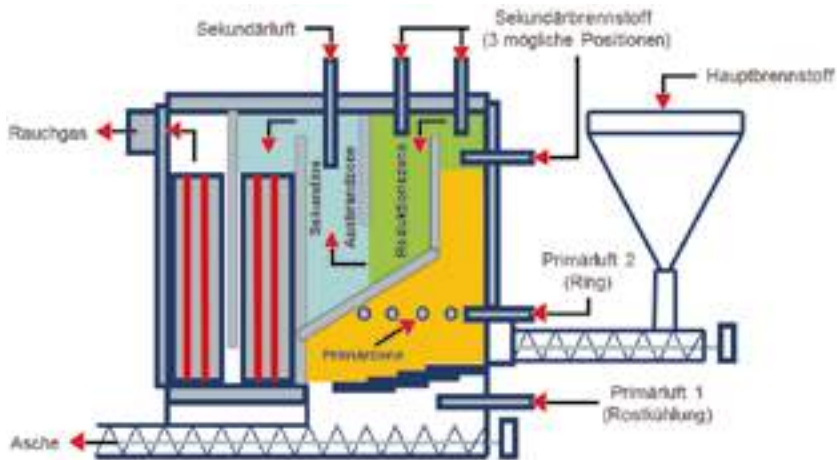


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage.

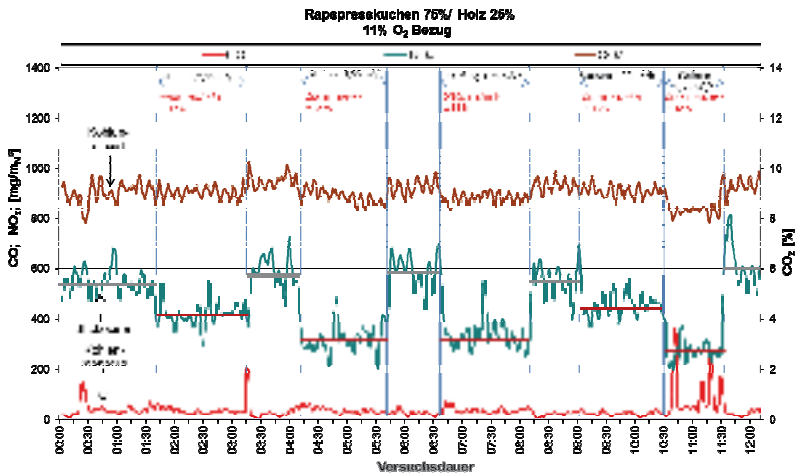
Die Feuerung ist in die messtechnischen Einrichtungen am Technikum des Institutsteils Sulzbach-Rosenberg von Fraunhofer UMSICHT eingebunden, wodurch eine Erfassung der Rauchgaszusammensetzung durch eine Emissionsmessung nach den Standards der 17. BImSchV, die Nutzung eines Flammenionisationsdetektors zur Erfassung von Kohlenwasserstoffverbindungen im Rauchgas sowie die Durchführung von Staubmessungen nach Maßgaben der VDI-Richtlinie 2.066 möglich sind. Ferner ist die Anlage mit weiterer umfangreicher Messtechnik ausgestattet, wie z. B. Lambda-Sonden sowie Messstellen für Temperaturen und Drücke.

Für die Erprobung der Feuerung und den Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Verfahrens wird Rapspresskuchen wegen seines hohen Stickstoffgehaltes von über 5 % als Versuchsbrennstoff ausgewählt. Dieser wird in verschiedenen Verhältnissen mit Holz gemischt und bei den Versuchen als Primärbrennstoff eingesetzt. Weiterhin werden bei der Pelletierung des Brennstoffs Additive zugegeben, um das Erweichungsverhalten der Asche zu beeinflussen. Als Sekundärbrennstoff kommt bei allen Versuchen zunächst Erdgas zum Einsatz, allerdings sind perspektivisch auch andere Brennstoffe wie z. B. Biogas denkbar.

Ergebnisse und Diskussion

Bei den Versuchen wird nach einer Vorlaufphase zum Aufheizen der Feuerung mit Holzpellets der gewählte Versuchsbrennstoff eingesetzt. Nach einer ausreichend langen Phase mit stabilen Versuchsbedingungen ohne Stufung wird der Brenner aktiviert und eine ca. zweistündige Versuchsphase mit Brennstoffstufung durchgeführt. Während dieser Phase bleibt die hinzugegebene Menge an Erdgas stets konstant. Nach dieser Phase mit Brennstoffstufung wird die Erdgaszufuhr wieder beendet. Das Verbrennungsverhalten gleicht sich nun wieder an den Zustand der Startphase an. Nachdem sich das Verbrennungsverhalten über eine Stunde stabilisiert hat, wird erneut Gas in die Feuerung eingebracht und der Stufungsbetrieb beginnt von neuem, wobei die Menge an Sekundärbrennstoff verändert wird. Dabei wird die Konzentration an Stickoxiden im Rauchgas kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Auf diese Weise wird der Zusammenhang zwischen der eingesetzten Menge an Reduktionsbrennstoff und der Reduktionsleistung untersucht.

In den nachfolgenden Graphen (Abbildungen 5 und 6) sind die Konzentrationen von Kohlenmonoxid, Stickoxiden, Sauerstoff und Kohlendioxid über den Versuchsverlauf dargestellt. Beispielhaft wird hier ein Versuch mit einer Brennstoffmischung, die zu 75 % aus Rapspresskuchen und zu 25 % aus Holz besteht, angeführt. Dabei wechseln sich Phasen mit Stufung sowie Phasen ohne Stufung ab, wobei deutliche Reduktionseffekte zu erkennen sind.



$\varnothing P_{\text{RPK}} = 84,3 \text{ kW}$; $\varnothing T_{\text{Brennraum}} = 983 \text{ °C}$; $\varnothing V_{\text{Rauchgas}}/t = 161 \text{ m}^3/\text{h}$; $\lambda_{\text{ges}} = 1,4 - 1,8$ N-Gehalt = 4,38%

Abbildung 5: Versuch mit einer Brennstoffmischung aus 75 Prozent Rapspresskuchen und 25 Prozent Holz.

Betrachtet man einen Abschnitt mit Stufung im Detail, so erkennt man, dass die Konzentration an Stickoxiden von $628 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ in der Phase ohne Stufung auf $406 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ in der Stufungsphase sinkt. Dies entspricht einer Reduktion von ca. 35%. Dafür werden ca. $3,95 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Erdgas als Reduktionsbrennstoff hinzugegeben, was unter den gegebenen Versuchsbedingungen einer Reburn-Fuel-Rate von in etwa 27,5 % entspricht.

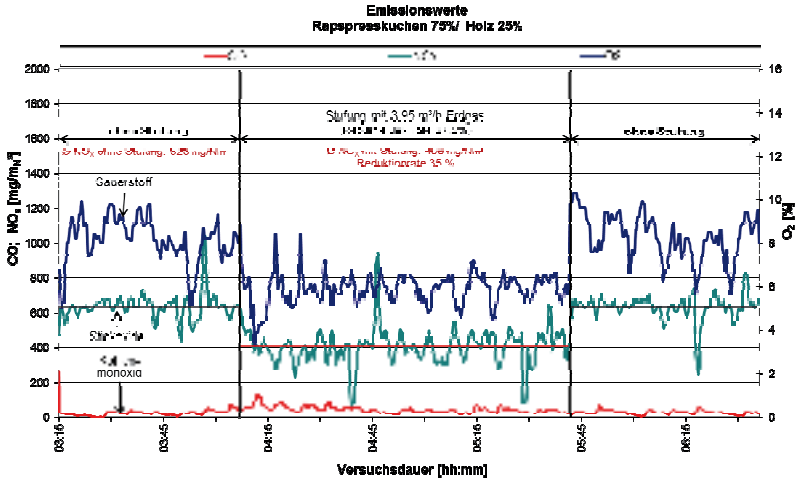


Abbildung 6: Emissionswerte bei einem Versuch mit Brennstoffstufung (Ausschnitt).

Trägt man die Ergebnisse der durchgeführten Versuche in einem Graphen zusammen, der die Reduktionsraten in Abhängigkeit von der Reburn-Fuel-Rate darstellt, so erkennt man, dass Reduktionsraten von über 50 % erreicht werden, wobei dafür jedoch eine erhebliche Menge an Sekundärbrennstoff eingesetzt werden muss. Weiterhin zeigt sich, dass eine hohe Reburn-Fuel-Rate die Reduktionsrate im Allgemeinen positiv beeinflusst (siehe Abbildung 7).

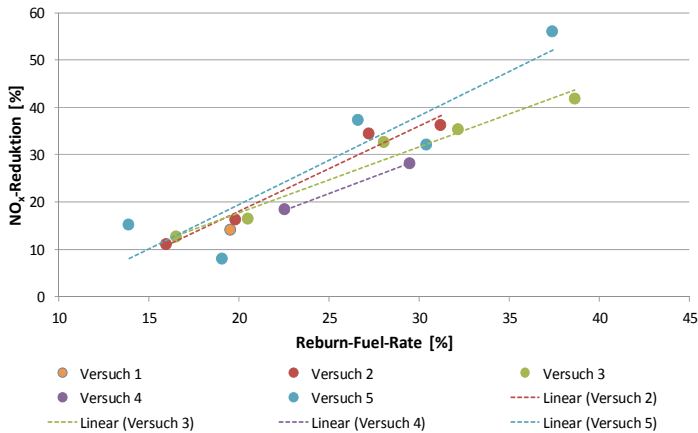


Abbildung 7: Stickoxid-Reduktion bezogen auf die Reburn-Fuel-Rate.

Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher durchgeführten Versuche zeigen, dass das Konzept der Brennstoffstufung auch auf kleinere Feuerungen übertragen und so Stickoxidemissionen reduziert werden können. Bei den Versuchen konnten Reduktionsraten von über 50 % erreicht werden. Mit der Brennstoffstufung kann die Stickoxidbelastung im Rauchgas bei der thermischen Verwertung vieler biogener Einsatzstoffe erheblich gesenkt werden. Zudem besteht die Möglichkeit den Schwachlastbetrieb z. B. in den Sommermonaten mit einem flexiblen Gasbrenner abzubilden. So vermeidet man Betriebszeiten des Biomassekessels im Teillastmodus, die häufig mit vergleichsweise schlechten Wirkungsgraden und auch mit hohen Schadgasemissionen verbunden sind. Zur Optimierung der Reduktionsraten werden folgende Punkte im weiteren Verlauf des Projekts vertieft untersucht:

- Optimierung der Reduktionsraten im Hinblick auf einen möglichst geringen Einsatz von Sekundärbrennstoffen
- Strömungstechnische Optimierung der Anlage für bessere Durchmischung zwischen Sekundärbrennstoff und Rauchgas
- Vertiefende Untersuchung des Schwachlastbetriebes
- Weitere Versuche mit anderen Primär- und Sekundärbrennstoffen zur Verbreiterung der Datenbasis
- Modellbildung in Vorbereitung einer weiteren Optimierung der Anlage hinsichtlich Automatisierung und Flexibilisierung

Auf diese Weise kann die Feuerung noch besser an die Anforderungen des Marktes angepasst werden. Dadurch steht eine wirtschaftlich interessante Lösung zur primärseitigen Stickoxid-Reduktion im kleinen und mittleren Leistungsbereich zur Verfügung.

Literatur

Hill, Smoot (2000): Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 26, 2000.

Joos, F. (2006): Technische Verbrennung – Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen. Heidelberg : Springer, 2006.

Kaltschmitt M., Hartmann H. (2001): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. Leipzig, Freising : Springer Verlag, 2001.

Koger, St. (2009): Reaktionskinetische Untersuchungen zur Umwandlung stickstoffhaltiger Gaskomponenten unter Bedingungen der Abfallverbrennung. Karlsruhe : Scientific Publishing, 2009.

Miller, J. Bowman, C. (1989): Mechanism and modelling of nitrogen chemistry in combustion. *Progressive Energy Combustion*. 1989.

Salzmann, Nussbaumer (2001): Fuel Staging for NOx Reduction in Biomass Combustion: Modelling and Experiments. *Energy and Fuels*. 15, 2001.

Ansätze zur Optimierung von Einzelraumfeuerstätten

Volker Schmatloch

Adresse: Spartherm Feuerungstechnik GmbH, Maschweg 38, 49324 Melle

E-Mail: v.schmatloch@spartherm.com

Abstract

Die Holzenergienutzung in Haushalten hat den größten Anteil an der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Dabei haben handbeschickte Einzelraumfeuerstätten wie Kaminanlagen, Kamin- oder Kachelöfen die größte Bedeutung. Solche Feuerstätten fungieren als Unterstützung für die primäre Heizung und bieten eine unabhängige Wärmeversorgung. In aller Regel dienen diese Geräte aber auch dem Wohnambiente und verknüpfen so das Angenehme eines ästhetischen Flammenspiels mit dem Nützlichen der nachhaltigen Wärmezeugung mit Holz. In der Verbindung dieser beiden Aspekte liegt einerseits der besondere Vorteil derartiger Feuerstätten, wodurch sich zum großen Teil Ihre besondere Beliebtheit begründet. Andererseits liegt darin auch die spezielle technische Herausforderung, diese Vorzüge nutzbar zu machen bei gleichzeitig geringen Abgasemissionen und guter Energieeffizienz.

Durch Optimierungen der Verbrennungstechnik erreichen moderne mit Scheitholz befeuerte Einzelraumfeuerstätten deutlich geringere Emissionen als noch vor einigen Jahren. Auch die 2010 modernisierte 1. BImSchV wird mit Ihren Anforderungen zu einer weiteren Verbesserung der auf dem Markt befindlichen Geräte beitragen. Angesichts des heute erreichten niedrigen Emissionsniveaus bei Betriebsbedingungen, wie sie für vergleichbare Emissionsmessungen erforderlich sind, gewinnen aber die Eigenschaften bei ungünstigen Bedingungen oder Fehlbedienungen zunehmend an Bedeutung.

Es gibt auf dem Markt seit einiger Zeit Ansätze, Verbesserungen auch bei nicht durch Prüfmessungen erfasste Situationen deutliche Verbesserungen zu erzielen. Dazu zählen insbesondere verschiedene Lösungen für die Steuerung der Verbrennungsluft, mit deren Hilfe Fehlbedienungen vermieden werden können. Ebenso zählen dazu Vorrichtungen zum Ausgleich ungünstiger Schornsteinbedingungen, die durch Wetterlagen, bauliche Gegebenheiten oder andere Ursachen bedingt sein können. Neuartige Ansätze können diese Techniken ergänzen, etwa zur Verbesserung des Verhaltens beim Anfeuern oder zur Staubabscheidung. Es ist das Ziel von Forschungs- und vor allem auch Entwicklungsaktivitäten, diese Technologien in markttauglichen Feuerstätten nutzbar zu machen, um reale Verringerungen des Schadstoffausstoßes im alltäglichen Betrieb von Scheitholz betriebenen Feuerstätten zu erreichen, ohne den grundlegenden Charakter dieser Geräte zu beeinträchtigen: ansprechendes Flammenbild der Naturzugfeuerstätte und effiziente Nutzung des erneuerbaren Energieträgers Holz.

Mehrere Technologien können in einer Feuerstätte vereinigt werden, um Verbesserungen in verschiedenen Situationen zu gewährleisten. Als Basis dient eine moderne Feuerstätte, die durch verschiedene Komponenten erweitert wird, um das Anfeuern zu beschleunigen und dadurch Emissionen zu senken, um ungünstige Schornsteinzugverhältnisse auszugleichen, um durch automatisierte Verbrennungslufteinstellung emissionsträchtige Fehlbe-

dienungen auszuschließen oder um Staubemissionen durch elektrostatische Partikelabscheidung zu verringern. Ein solcher Prototyp wurde vor kurzem auf der „Woche der Umwelt 2012“ in Betrieb gezeigt.

Schlagwörter: Biomasse, Einzelraumfeuerung, Partikelabscheidung, Staubemissionen, nachhaltige Wärmeerzeugung

Einleitung

Bei der Nutzung erneuerbarer Energie in Deutschland liefert die Holzenergienutzung den größten Anteil (Abbildung 1), wobei wiederum die Einzelfeuerstätten das größte Gewicht haben.

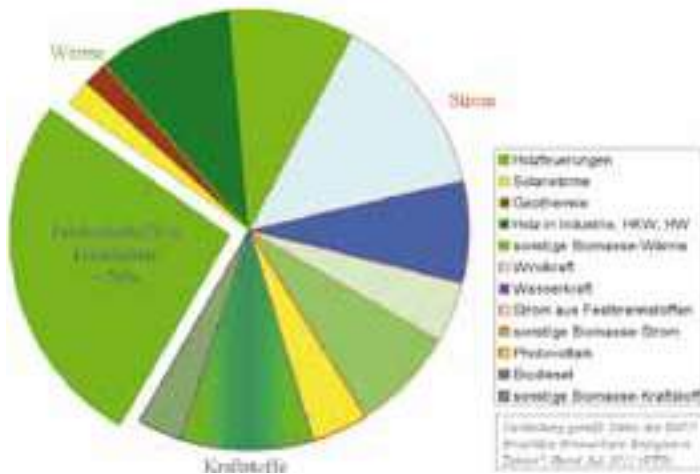


Abbildung 1: Erneuerbare Energie in Deutschland.

Aus diesem Grund erscheint es erforderlich, vermehrte Anstrengungen zur Optimierung solcher Anlagen zu unternehmen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese manuell holzbeschickten Einzelraumfeuerstätten nicht nur die Funktion der Wärmeerzeugung zu erfüllen haben, sondern auch dekorativen Zwecken und in hohem Maße dem Wohnambiente dienen sollen, durch Erzeugung eines ästhetischen Flammenspiels und durch Vermeidung mechanischer oder elektrischer Betriebsgeräusche. Daher besteht die besondere technische Herausforderung darin, diese Merkmale der handbeschickten Naturzugfeuerstätten zu erhalten und dennoch moderne Anforderungen an Verbrennungsqualität und Energieeffizienz zu erfüllen.

Im März 2010 ist eine überarbeitete 1. BImSchV in Kraft getreten und löste damit eine Regelung für den Bereich der Einzelraumfeuerstätten ab, die im Grunde aus den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts stammte. Industrie und Handwerk hatten der Rückständigkeit der Verordnung bereits seit Jahren durch die Schaffung bestimmter Qualitätsstandards, wie DIN- oder DINplus-Qualitätslabel, entgegen gewirkt und somit dazu beigetragen, dass es zu fortlaufenden Verbesserungen der Feuerstättentechnik kam (siehe Abbil-

dung 2). Die neue 1. BImSchV hat diesen Anstrengungen zweifellos einen Schub gegeben und wird durch die bevorstehende 2. Stufe der Anforderungen weitere Entwicklungen fördern [1].

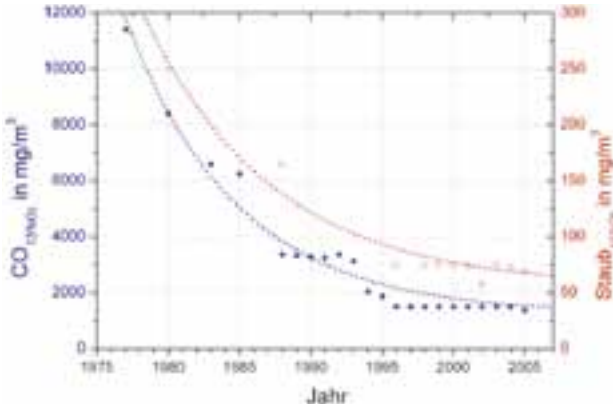


Abbildung 2: Entwicklungstrend bei der Typprüfung seit 1975

Die Überprüfung der Grenzwertanforderungen der 1. BImSchV erfolgt im Rahmen der Typenprüfung von Öfen, Einsätzen, Herden und dergleichen. Dabei ist deutlich zu betonen, dass der wesentliche Charakter einer Messung für die Typenprüfung in Ihrer Wiederholbarkeit und ihrer Vergleichbarkeit liegt. Das heißt, um sichere Aussagen anhand der Typenprüfung machen zu können, muss die Messung bei der Prüfstation mit jeweils – innerhalb der vorgegebenen Genauigkeit – gleichem Ergebnis wiederholbar sein. Zudem muss es möglich sein, auch auf einem anderen Prüfstand die Ergebnisse zu reproduzieren, ebenfalls innerhalb der vorgegebenen Genauigkeit.

Unter diesem Gesichtspunkt ist das Messverfahren genau festzulegen. Ebenso muss die Betriebsweise der Feuerung einem festgelegten Ablauf folgen. Mit diesen vorrangigen Maßgaben soll die Typenprüfung dann möglichst realistische Situationen abbilden. Gelegentlich wird Kritik geäußert, dass die Prüfstandsmessung Idealbedingungen herstellt. In mancherlei Hinsicht kann dies zutreffend sein, resultiert aber vor allem aus der einleuchtenden Notwendigkeit, reproduzierbare Prüfbedingungen zu gewährleisten. Andererseits führt diese Notwendigkeit CO- oder Partikelemissionsmessungen zu einer Vorgehensweise, die entscheidend von einem idealen bestimmungsgemäßen Betrieb abweicht, indem bei der Prüfung eine manuelle Nachregelung der Verbrennungslufteinstellung nicht zulässig ist. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb z.B. von Kaminöfen ist es üblich, die Lufteinstellung der Abbrandsituation anzupassen, etwa nach der Anheizphase die anfangs voll geöffnete Luft etwas zu drosseln.

Die Messungen der Typenprüfung dienen der Überprüfung wesentlicher Eigenschaften der Feuerstätten, vor allem aber auch einer Überprüfung der Sicherheitsaspekte. Ein wichtiger Punkt heute ist zudem die Überprüfung der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten. Die Bestimmung von Emissionsfaktoren, d.h. die Ermittlung von Emissionswerten unter allen möglichen Betriebsbedingungen, ist ein sehr weit reichender Anspruch und kann nicht zu den Aufgaben einer Typenprüfung gehören. Sehr wohl soll aber eine Feuerung, die gute

dung 2). Die neue 1. BImSchV hat diesen Anstrengungen zweifellos einen Schub gegeben und wird durch die bevorstehende 2. Stufe der Anforderungen weitere Entwicklungen fördern [1].

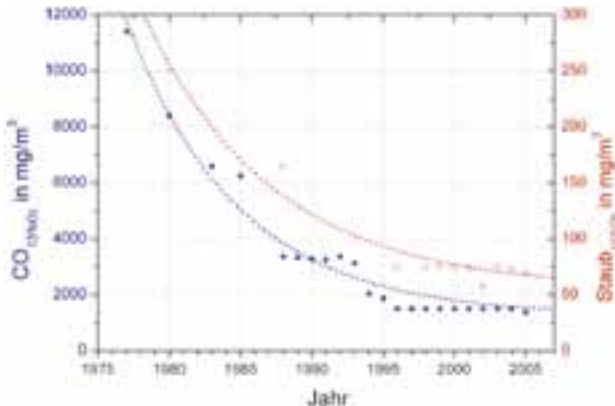


Abbildung 2: Entwicklungstrend bei der Typprüfung seit 1975

Die Überprüfung der Grenzwertanforderungen der 1. BImSchV erfolgt im Rahmen der Typenprüfung von Öfen, Einsätzen, Herden und dergleichen. Dabei ist deutlich zu betonen, dass der wesentliche Charakter einer Messung für die Typenprüfung in Ihrer Wiederholbarkeit und ihrer Vergleichbarkeit liegt. Das heißt, um sichere Aussagen anhand der Typenprüfung machen zu können, muss die Messung bei der Prüfstation mit jeweils – innerhalb der vorgegebenen Genauigkeit – gleichem Ergebnis wiederholbar sein. Zudem muss es möglich sein, auch auf einem anderen Prüfstand die Ergebnisse zu reproduzieren, ebenfalls innerhalb der vorgegebenen Genauigkeit.

Unter diesem Gesichtspunkt ist das Messverfahren genau festzulegen. Ebenso muss die Betriebsweise der Feuerung einem festgelegten Ablauf folgen. Mit diesen vorrangigen Maßgaben soll die Typenprüfung dann möglichst realistische Situationen abbilden. Gelegentlich wird Kritik geäußert, dass die Prüfstandsmessung Idealbedingungen herstellt. In mancherlei Hinsicht kann dies zutreffend sein, resultiert aber vor allem aus der einleuchtenden Notwendigkeit, reproduzierbare Prüfbedingungen zu gewährleisten. Andererseits führt diese Notwendigkeit CO- oder Partikelemissionsmessungen zu einer Vorgehensweise, die entscheidend von einem idealen bestimmungsgemäßen Betrieb abweicht, indem bei der Prüfung eine manuelle Nachregelung der Verbrennungslufteinstellung nicht zulässig ist. Bei bestimmungsgemäßem Betrieb z.B. von Kaminöfen ist es üblich, die Lufteinstellung der Abbrandsituation anzupassen, etwa nach der Anheizphase die anfangs voll geöffnete Luft etwas zu drosseln.

Die Messungen der Typenprüfung dienen der Überprüfung wesentlicher Eigenschaften der Feuerstätten, vor allem aber auch einer Überprüfung der Sicherheitsaspekte. Ein wichtiger Punkt heute ist zudem die Überprüfung der Einhaltung von Emissionsgrenzwerten. Die Bestimmung von Emissionsfaktoren, d.h. die Ermittlung von Emissionswerten unter allen möglichen Betriebsbedingungen, ist ein sehr weit reichender Anspruch und kann nicht zu den Aufgaben einer Typenprüfung gehören. Sehr wohl soll aber eine Feuerung, die gute

Typprüfergebnisse erzielt, auch unter praktischen Bedingungen in aller Regel gute Ergebnisse liefern.

Die genannten Besonderheiten von Typprüfungen können dazu führen, dass sich bestimmte Optimierungsmaßnahmen zwar bei den Typprüfergebnissen nicht auswirken, in der Praxis jedoch sehr wohl. Dies wird deutlich am Beispiel der zuvor genannten Lufteinstellungsmöglichkeit, die in der Praxis erhebliche Auswirkungen auf die Verbrennungsqualität hat, in der Typprüfung aber aus Gründen der Reproduzierbarkeit nicht berücksichtigt wird. Angesichts der beachtlichen Fortschritte bei der Feuerstättentechnik für den bestimmungsgemäßen Betrieb (siehe Abbildung 2), erscheint es fraglich, ob hier weiter verschärfte Anforderungen noch spürbare Verbesserungen der realen Situation bringen können. Es ist vielmehr zu erwarten, dass der Effekt weiterer Grenzwertverschärfungen weit hinter die Auswirkungen von z.B. Fehlbedienungen oder Brennstoffmissbrauch zurückfallen würde. Es ist bekannt, dass durch falsche Lufteinstellung oder Verwendung von nassem Holz die Abgasemissionen durchaus um einen Faktor 10 und mehr ansteigen können [2]. Daher erscheint es sinnvoll, dass sich künftige Bestrebungen vermehrt auf das Nutzerverhalten richten sollten. Vorzugweise könnte man dazu auf verbesserte Beratung und Aufklärung setzen, sollte aber seitens der Vollzugsbehörden aber auch wirkungsvolle Maßnahmen einführen, um bewusstem Fehlverhalten, insbesondere Brennstoffmissbrauch entgegen zu wirken.

Ansätze für Optimierungen im Praxisbetrieb

Unter der Maßgabe, den Charakter der handbeschiedten Naturzugfeuerstätten und somit einen wesentlichen Aspekt ihrer Akzeptanz bei den Nutzern zu erhalten, können auch technische Maßnahmen helfen, den Betreibereinfluss und den bestimmter störender Bedingungen zu verringern.

Schornsteinzug

Handbeschiedte Naturzugfeuerstätten sind auf den natürlichen Schornsteinzug angewiesen. Dieser entsteht während des Betriebes der Feuerstätte durch ein geeignetes Abgastemperaturniveau. Dementsprechend sind der Steigerung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades gewisse Grenzen gesetzt. Andererseits ist der im Schornstein entstehende Förderdruck auch von den baulichen Gegebenheiten, insbesondere von der effektiven Schornsteinhöhe, abhängig und kann auch durch Wettersituationen, vor allem durch Windstärke und Richtung beeinflusst werden.

Für den sicheren Betrieb und gute Verbrennungsbedingungen ist es wichtig, dass der Schornsteinzug sich in einem geeigneten Bereich bewegt. Geeignete Werte liegen typisch zwischen 12 Pa und 25 Pa. Um diese Zugbedingungen sicherzustellen, kann der Betrieb der Feuerstätten durch geeignete Komponenten unterstützt werden. Lange bekannt sind Zugbegrenzer, die in den Schornstein eingebaut werden und dort eine Nebenluftöffnung derart einstellen, dass zu hohem Schornsteinzug entgegen gewirkt wird.

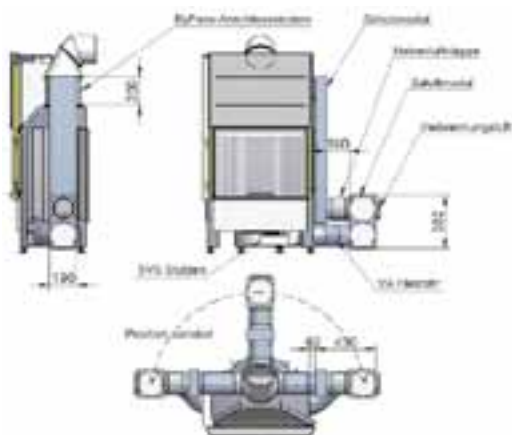


Abbildung 3: Aufbau einer direkt an der Feuerstätte ansetzenden Zugregelvorrichtung

Bei Einzelraumfeuerstätten sollen sich derartige Nebenluftöffnungen im gleichen Raumluftverbund wie die Feuerstätte befinden, um Probleme aufgrund von Druckunterschieden in verschiedenen Bereichen eines Gebäudes auszuschließen. Diese Anforderung bereitet bei Einzelraumfeuerstätten für die Aufstellung im Wohnraum aus ästhetischen Gründen Schwierigkeiten, aber auch aufgrund möglicher Geräuscentwicklungen. Als Lösung dafür wurde eine in die Kaminanlage zu integrierende Zugregelung vorgestellt (Abbildung 3).

Diese Vorrichtung kann durch eine Regelung und einen Abgasventilator als Zuggenerator ergänzt werden, so dass sowohl bei zu starkem als auch bei zu schwachem Schornsteinzug Abhilfe geschaffen werden kann. Als weitere Verfeinerung dieser Entwicklung wurde die Zugregelung direkt in die Feuerstätte integriert und durch Regelelemente sowohl für die Bypassöffnung als auch für den Verbrennungsluftkanal ergänzt. Durch simultane Betätigung der Steuerklappen für diese Luftströme kann die Wirksamkeit der Zugregelung erheblich verbessert werden.

Dichtheit & Raumluftunabhängigkeit

Infolge erhöhter Wärmedämmstandards und Bestrebungen zur Energieeinsparung ist es erforderlich, dass die Verbrennungsluft für Feuerstätten nicht aus dem Aufstellraum, sondern über separate Leitungen von außen zugeführt wird. Zudem werden moderne Gebäude vermehrt mit Anlagen zur kontrollierten Be- und Entlüftung ausgestattet, die häufig mit einem gewissen Unterdruck im Gebäude betrieben werden. Aufgrund dieser Aspekte kommt der Dichtheit von Feuerstätte, Verbrennungsluft- und Abgasleitung eine besondere Bedeutung zu. Die hohe Dichtheit von Feuerstätten stellt eine bedeutende Voraussetzung für eine genau dosierte und gezielte Eindüsung von Verbrennungsluft in den Brennraum dar und somit für die Optimierung der Abbrandqualität.

Der Brennraum einer optimierten Feuerstätte ist daher möglichst dicht auszuführen, um Falschluff zu vermeiden und eine gute Regelbarkeit herzustellen. Vorteilhaft ist dabei auch eine gute Vorwärmung der Verbrennungsluft. Grundsätzlich sind moderne Feuerstätten so

auszuführen, dass die Verbrennungsluft über ein Luft-Abgassystem oder separate Verbrennungsluftleitungen von außen der Feuerstätte zugeführt werden können.

Automatische Verbrennungslufteinstellung

Für die Erzielung geringer Emissionen und hoher Wirkungsgrade kommt der korrekten Zugabe von Verbrennungsluft eine besondere Bedeutung zu. Dafür ist die wie oben erwähnt die Dichtheit des Brennraums eine wichtige Voraussetzung sowie die Eindüsung vorgewärmter Luft an gezielter Stelle. Für die Erzielung eines sauberen Abbrandes mit geringen Emissionen muss bei handbeschickten Scheitholzfeuerstätten die Verbrennungsluftmenge während des Abbrandes angepasst bzw. nachgeführt werden. Grundsätzlich muss das Zünden beim Anfeuern oder Nachlegen durch eine geeignete Primärluftgabe unterstützt werden. Nach dem Zünden wird vorteilhafter Weise die Primärluft geschlossen, die Sekundärluft aber anfangs noch weit geöffnet, bevor diese dann passend zur Holzmenge und Abbrandsituation gedrosselt wird. Luftmangel ist in allen Abbrandphasen unbedingt zu vermeiden.

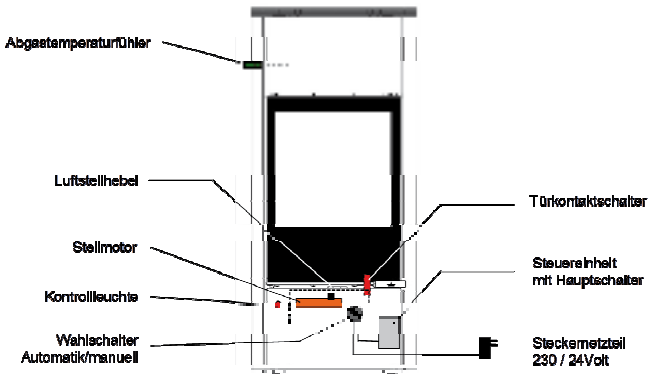


Abbildung 4: Schema einer einfachen gebräuchlichen Abbrandsteuerung auf Abgastemperaturbasis

Eine geeignete Konstruktion der Feuerstätte vorausgesetzt, kann in der Praxis durch einen zwei- bis dreimaligen Eingriff des Betreibers eine gute Verbrennung erreicht werden. Allerdings besteht auch die Gefahr durch bewusste oder unbewusste Fehlbedienung der Lufteinstellung deutlich schlechtere Abbrandbedingungen zu erzeugen. Dieser Problematik kann durch eine automatisierte Einstellung der Verbrennungsluft begegnet werden. Fortgeschrittene Systeme sollten die Luftzufuhr auf Basis von Sensorsignalen regeln, mit denen die momentane Verbrennungssituation erfasst werden kann, etwas durch Messung des Lambdawertes, der CO- oder VOC-Konzentration sowie der Abgas- oder Glutbetttemperatur. Derartige Systeme haben im Markt noch keine Bedeutung und es bedarf voraussichtlich noch einiger Anstrengung zur Entwicklung solcher komplexen Systeme unter besonderer Berücksichtigung einer Kostenminimierung.

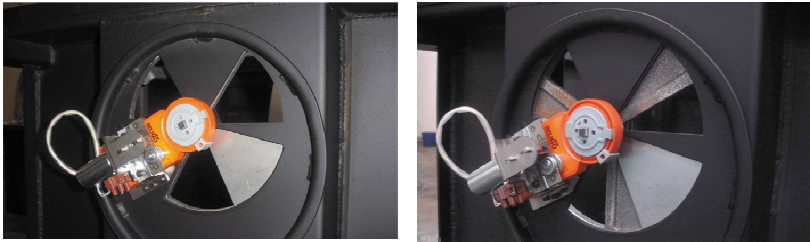


Abbildung 5: Feinfühlige Verbrennungsluftdosierung mit differenzierter Sekundär- und Primärluftsteuerung

Bereits weit verbreitet sind einfache Systeme, die die Verbrennungsluftsteuerung im Wesentlichen auf Basis der Abgastemperatur vornehmen (Abbildung 4). Auch damit kann es gelingen besonders negative Zustände durch Fehlbedienung zu vermeiden. Wichtig erscheint aber auch bei solcher Lösung, dass eine differenzierte Einstellung von Sekundär- und Primärluft erfolgen kann (Abbildung 5), was jedoch bei Nachrüstlösungen häufig nicht realisiert werden kann.

Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung

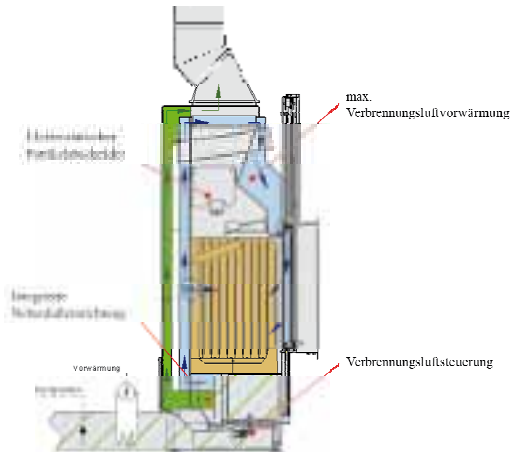


Abbildung 6: Schema einer Feuerstätte mit integrierten Komponenten zur Optimierung des Praxisbetriebs

Erste Konzepte für elektrostatische Partikelabscheider zur Nutzung in handbeschiekten Holzfeuerstätten wurden bereits vor längerer Zeit gezeigt [3,4]. Ein wichtiger Vorteil dieses Prinzips ist darin zu sehen, dass sich damit Bauformen realisieren lassen, die nahezu keinerlei Gegendruck aufbauen und bei denen die Gefahr einer Verblockung des Abgasweges vermieden werden kann. Diese Aspekte sind bei Naturzugfeuerstätten von besonderer Bedeutung für den dauerhaften, störungsfreien und sicheren Betrieb der Feuerstätte.

Die Integration eines Staubabscheiders ist besonders dann vorteilhaft, wenn bereits andere Maßnahmen zur Optimierung der Verbrennungsqualität und des zuverlässigen Betriebs der Feuerstätte getroffen sind. Abbildung 6 zeigt schematisch eine solche Kombination eines elektrostatischen Abscheiders mit anderen oben erwähnten Vorrichtungen zur Optimierung des Feuerstättenbetriebs in der Praxis. In Abbildung 7 ist ein Prototyp dargestellt, in dem die genannten Maßnahmen realisiert und bereits im Betrieb demonstriert wurden.



Abbildung 7: Prototyp der Feuerstätte mit integrierten Komponenten zur Optimierung des Praxisbetriebs

Fazit

In einer Prototyp-Feuerstätte wurden verschiedene Merkmale und Komponenten zur Optimierung von Scheitholzfeuerstätten vereint. Neben der gezielten Verbrennungslufteindüsung in einen dichten Brennraum mit spezieller wärmedämmenden Brennraumauskleidung zur Erhöhung der Brennraumtemperatur sind dies insbesondere eine automatische Verbrennungslufteinstellung, eine integrierte Zugregelung, eine elektrostatische Partikelabscheidung sowie eine Vorrichtung für verbessertes Zünden und Anheizen mittels elektrischer Luftvorwärmung und Gebläseunterstützung in der Startphase. Diese Vorrichtungen sind so ausgelegt, dass sie im Betrieb unbemerkt vom Benutzer arbeiten und den Charakter der Naturzugfeuerstätte nicht beeinträchtigen. Insbesondere bleibt der ästhetische Eindruck des Flammenspiels unberührt, welches durch die saubere Verbrennung und demzufolge die Vermeidung von Verschmutzungen von Sichtscheibe oder Brennraum eher noch verbessert wird. Die Akzeptanz der eingesetzten Maßnahmen wird durch den Komfortgewinn für den Benutzer erleichtert. Gleichzeitig bedeutet der Gewinn an Bedienkomfort die Vermeidung ungünstiger Verbrennungsbedingungen etwa in der Startphase oder infolge von Fehlbedienungen. Auf diese Weise können erhebliche Verbesserungen des Verhaltens der Feuerstätte unter realen Betriebsbedingungen erwartet werden, auch wenn die Wirkungen einiger der realisierten Maßnahmen für das Ergebnis einer Typenprüfung irrelevant sind.

Literatur

- [1] 1. Bundesimmissionsschutzverordnung. URL:
<http://www.bmu.de/luftreinhaltung/downloads/doc/39616.php> (Stand: 21.09.2012).
- [2] N. Klippel, T. Nussbaumer: 9. Holzenergie-Symposium, Verenum Press, Zürich 2006, ISBN 3-908705-14-2.
- [3] V. Schmatloch: Particle Separator for Small Furnaces, Proceed. 3. European Conference on Small Burner Technology and Heating Equipment, Aachen, September 2003.
- [4] V. Schmatloch, S. Rauch: Design and characterisation of an electrostatic precipitator for small heating appliances. Journal of Electrostatics (2005) Vol. 63 (2) pp.85-1.

Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen

Ingo Hartmann*, René Bindig, Mirjam Matthes, Christian Thiel

Adresse: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH,
Kompetenzfeld Katalytische Emissionsminderung,
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
*E-Mail: Ingo.Hartmann@dbfz.de

Abstract

Die Emissionsminderung in Biomassekleinfeuerungsanlagen wird für eine hochwertige Einzelraumfeuerung (ERF) und einen Biomassekessel für Holz- und Alternativbrennstoffe (MFK) entwickelt. Es wird eine Kombination aus elektrostatischer Staubabscheidung, katalytischer Nachverbrennung und vollautomatischer Verbrennungsregelung vorgenommen, um den Verbrennungsprozess in jeder Phase zu optimieren. Die Regelung erfolgt auf Basis moderner Abgassensorik und angepasster Regelungsalgorithmen. Die Untersuchungen zur Entwicklung der Maßnahmen erfolgen an Laborversuchsanlagen und den ausgewählten Feuerungsanlagen, sowohl im Rahmen von Prüfstandsmessungen als auch in Form von Feld- und Demonstrationsuntersuchungen zum Nachweis der Praxistauglichkeit. Die bisher durchgeführten Technikumsuntersuchungen zeigen das Potenzial der entwickelten Maßnahmen. Das DBFZ untersucht und entwickelt die Module für die Katalysatoren. Durch den Einsatz von Katalysatoren an beiden Feuerungen konnte die Konzentration an Kohlenmonoxid erheblich reduziert werden. Auch flüchtige organische Verbindungen werden mit den Katalysatoren oxidiert und damit reduziert. Mit den von der BTU Cottbus entwickelten Staubabscheidern sind Abscheidegrade größer 60 % in allen Verbrennungsphasen an beiden Feuerungen im Technikum erzielt worden. Die Optimierung der Regelung am MFK ermöglicht eine deutliche Reduzierung des Emissionsniveaus. Auch die Neuentwicklung der abgassensorbasierten Verbrennungsluftregelung am Kaminofenheizeinsatz durch den Projektpartner ISIS an der Hochschule Karlsruhe ermöglicht eine gute Emissionsminderung. Die Umsetzung der Maßnahmen für die Feldversuchsstandorte und die damit einhergehende Prüfung der Praxistauglichkeit im Feldmessbetrieb wird in der Heizperiode 2012/13 vorgenommen. In der Heizperiode 2013/2014 sind Demonstrationsuntersuchungen mit Prototyp-Anlagen für ERF und MFK geplant.

Schlagwörter: Biomasse-Kleinfeuerungen, Emissionsminderung, Elektroabscheidung, Katalytische Nachverbrennung, Verbrennungsluftregelung

1 Projektziele und Vorgehensweise

Zur deutlichen Unterschreitung der gesetzlichen Grenzwerte und Ermöglichung einer umweltfreundlichen Wärmebereitstellung im kleinen Leistungsbereich (emissionsarmer Betrieb von Feuerungsanlagen) wird die Entwicklung von integrierten und kombinierten Emissionsminderungsmaßnahmen und deren Umsetzung für den Praxisbetrieb im Verbundprojekt untersucht. Die für die Untersuchungen ausgewählten Feuerungsanlagen, eine hochwertige Einzelraumfeuerung (ERF) und ein Biomassekessel für Holz- und Alternativbrennstoffe (Multifuelkessel: MFK), decken zwei wesentliche Anwendungsbereiche im Bereich der Wärmeerzeugung aus Biomassekleinfeuerungen ab. Zur Minderung der Schadstoffe wird die Integration und Kombination von elektrostatischer Staubabscheidung, katalytischer Nachverbrennung und vollautomatischer Verbrennungsregelung in den Feuerungsanlagen vorgenommen. Mit der Regelung soll der Verbrennungsprozess in allen Phasen auf Basis moderner Abgassensorik und angepasster Regelungsalgorithmen gesteuert werden. Die Ermittlung von Erkenntnissen und die Entwicklung der Emissionsminderungsmaßnahmen erfolgt an Laborversuchsanlagen und im Rahmen von Prüfstandsmessungen mit den ausgewählten Feuerungsanlagen. Für die Umsetzung der Maßnahmen für den Praxisbetrieb sollen Prototypen der Feuerungsanlagen mit den integrierten Maßnahmen gefertigt und auf dem Prüfstand am DBFZ sowie an Feldmess- und Demonstrationsstandorten hinsichtlich der Funktionsfähigkeit und Wirksamkeit geprüft werden. Mit der Durchführung von Feldmessungen ist ein Nachweis der Praxistauglichkeit möglich.

2 Untersuchungen an der Laborversuchsanlage

Zur Untersuchung von katalytischen und elektrostatischen Effekten wurde an einer Versuchsanlage am DBFZ die nachgeschaltete Behandlung von Abgas aus Einzelraumfeuerungsanlagen mittels eines Elektroabscheiders und eines Katalysators untersucht.

Anhand der parallelen Anwendung von gravimetrischer Staubmessung (VDI 2066, Blatt 1) und Messung der Partikelanzahlverteilung mittels Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) konnten sowohl Staubminderungseffekte als auch Agglomerationsprozesse nachgewiesen werden, welche von den Abgaseigenschaften sowie der Art und den Bedingungen der Abgasnachbehandlungsverfahren stark abhängen. Die Ergebnisse aus der Laborversuchsanlage (siehe Abbildung 1) können mit einer Agglomeration von Partikeln kleiner 830 nm zu größeren Partikeln und einem Wiedereintrag abgeschiedener Partikel innerhalb der Versuchsanlage erklärt werden. Die Partikel konnten aufgrund unzureichender Aufladung bzw. zu schneller Ladungsabgabe im Elektroabscheider nicht abgeschieden werden, da hohe Partikelanzahlkonzentrationen und damit sogenanntes Koronaquenchen auftrat. Zudem war die Leitfähigkeit der Partikel mit hohem Rußanteil hoch, wodurch ein Wiedereintrag begünstigt wurde. Erst bei Einsatz des Katalysators wurden eine Minderung der Gesamtstaubmasse und damit eine Staubabscheidung nachgewiesen. Demnach zeigte der eingesetzte Katalysator einen in der Praxis ungewollten Staubfiltereffekt. Eine starke Abscheidung von groben Rußbestandteilen auf dem Katalysator würde zusätzlich zur Oberflächenmaskierung der Katalysatorspezies den freien Strömungsquerschnitt nach einigen Stunden reduzieren und damit den Druckverlust unzulässig erhöhen. Eine häufige Reinigung des Katalysators wäre notwendig. Alternativ zur manuellen Reinigung könnte ein

periodischer Abbrand der Rußbestandteile durch Anwendung hoher Katalysatortemperaturen mit einer externen Beheizung erfolgen. In Abbildung 1 links ist der sich aus den Untersuchungsergebnissen ergebende Prozess und rechts die Staubminderung schematisch dargestellt.

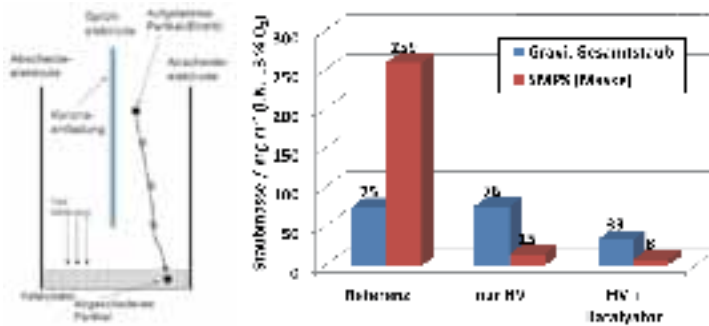


Abbildung 1: Schematische Darstellung der ablaufenden Vorgänge bei Einsatz des Katalysators und Elektroabscheiders an der Laborversuchsanlage (links) und ermittelte Staubemissionen aus gravimetrischer Messung und Partikelanzahlverteilung (rechts) im Referenzbetrieb, mit Elektroabscheider sowie Elektroabscheider und Katalysator.

Bei den gasförmigen Abgasbestandteilen konnte ebenfalls ein Einfluss der Elektrostatik und des Katalysators beobachtet werden. Die ermittelten Abgaskonzentrationen sind in Abbildung 2 dargestellt.

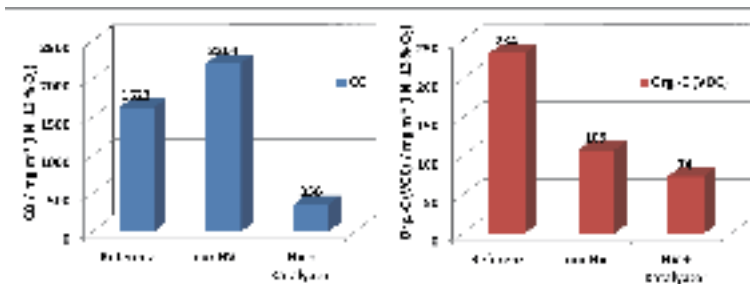


Abbildung 2: Abgaskonzentration von CO (links) und VOC (rechts) im Referenzbetrieb mit Hochspannung (HV) sowie Hochspannung und Katalysator.

Bei eingeschalteter Hochspannung wurden eine Zunahme der CO-Konzentration und eine Abnahme der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) festgestellt. Dies kann auf die Radikalbildung durch die Korona-Entladung an der Sprühelektrode zurückgeführt werden. Durch die reaktiven Radikale werden dabei die VOC teilweise oxidiert, wobei CO als sehr stabiles Produkt bei nichtkatalytischer homogener Reaktion und den gegebenen Reaktions Temperaturen von weniger als 400 °C entsteht. Bei zusätzlichem Einsatz eines Katalysators wurden dann eine deutliche Abnahme von CO und eine weitere Minderung der VOC-Konzentration gemessen. Demnach wird am Edelmetall-Katalysator vor allem eine hohe und auch erwartete Aktivität für die Umsetzung von CO erreicht. CO lässt sich bekannter-

maßen heterogenkatalytisch an Edelmetallspezies sehr gut zu CO₂ oxidieren, während VOC mit den herkömmlichen Systemen weniger stark aktiviert werden.

3 Emissionsminderung an der Einzelraumfeuerung (ERF)

Die primäre Emissionsminderung an der Einzelraumfeuerung soll durch eine hohe Verbrennungsqualität der Biomasse mit Hilfe einer optimalen Verbrennungsregelung erreicht werden. Dazu wurden neben der Temperaturmessung in der Nachbrennkammer entsprechende Sensoren zur Messung der Restsauerstoffkonzentration und des CO/HC-Gehaltes im Abgaskanal eingesetzt. Die Sensorsignale werden als Regelungsparameter verwendet. Des Weiteren wurde der Einsatz eines neuentwickelten elektrostatischen Staubabscheiders vorgenommen, welcher integriert in einem Wärmeübertragermodul die Abscheidung der partikelförmigen Emissionen realisieren soll. Zusätzlich zum Elektroabscheider wurde die Integration eines Katalysators ermöglicht. Dieser 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 VOC sowie ggf. periodischen und nachzuweisenden Rußabbrand zu nutzen.

3.1 Katalytische Nachverbrennung

Für den Einsatz an der ERF wurden verschiedene edelmetallbeschichtete Katalysatoren untersucht. Als vielversprechendste Variante wurde ein Drahtgestrickkatalysator der Firma Heraeus ermittelt, der im Hinblick auf seine Langzeitstabilität näher untersucht wurde. Im Rahmen der durchgeführten Messungen über mehrere Versuchstage unter Technikumsbedingungen war der Druckverlust gering und eine Verblockung des Katalysators durch Staubablagerungen konnte nicht festgestellt werden. Die mit dem Drahtgestrick erzielten Reduzierungen bzgl. CO und VOC (gemessen als Org.-C) sind in Abbildung 3 dargestellt. So konnten mit dem unter Technikumsbedingungen gealterten Drahtgestrickkatalysator Reduzierungen bezüglich CO von ca. 50 bis 75 % bzw. von Org.-C ca. 23 bis 48 % realisiert werden. Des Weiteren konnte eine leichte Abnahme des CO-Umsatzes beobachtet werden, wohingegen die Minderung an Org.-C über mehrere Versuchstage konstant blieb.

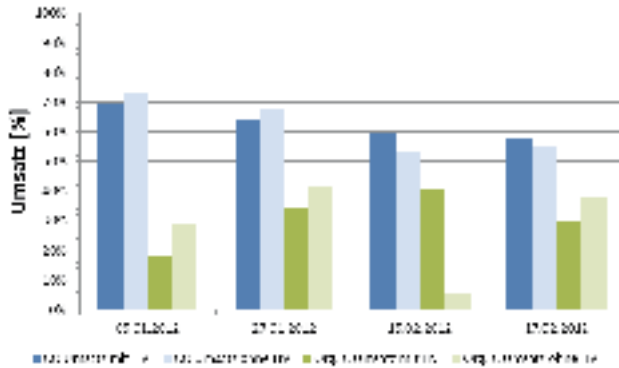


Abbildung 3: Minderung für CO und VOC (Org.-C) bei Einsatz des Drahtgestrickkatalysators über mehrere Versuchstage.

3.2 Elektrostatische Staubabscheidung

Im Rahmen der Technikumsuntersuchungen mit dem neuentwickelten Elektroabscheider wurde dieser in Kombination mit dem Drahtgestrickkatalysator untersucht. Weiterhin wurden die Sprüh- und Abscheideelektroden variiert. Der Elektroabscheider wurde sowohl mit negativer als auch mit positiver Hochspannung untersucht. Mit negativer Hochspannung lassen sich dabei mit dem derzeitigen Aufbau höhere Staubabscheidegrade (ca. 75 %) gegenüber positiver Hochspannung (ca. 50 %) erzielen, weshalb die weiteren Versuche zunächst mit negativer Hochspannung durchgeführt wurden. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Kombination aus Drahtgestrickkatalysator und Elektroabscheider jeweils für negative und positive Hochspannung dargestellt.

Tabelle 1: Abscheidegrade des Elektroabscheiders an der ERF in Kombination mit Drahtgestrickkatalysator

Drahtgestrick	Staub	CO	VOC (Org.-C)	CH ₄	Aromaten
	mg/m ³ im Normzustand bei 13 % O ₂				
Referenz	178	1548	126	45	16
Mit HV (-) 05.01.2012	44	477	103	40	18
Ohne HV 05.01.2012	110	409	90	39	14
Minderung mit HV (-)	75 %	69 %	18 %	11 %	-9 %
Minderung ohne HV (-)	38 %	74 %	29 %	14 %	17 %
Mit HV (+) 27.01.2012	89	559	83	38	13
Ohne HV 27.01.2012	134	498	73	34	12
Minderung mit HV (+)	50 %	64 %	34 %	17 %	21 %
Minderung ohne HV (+)	25 %	68 %	42 %	25 %	24 %

Während bei gravimetrischer Staubmessung Abscheidegrade von maximal 75 % nachgewiesen wurden, zeigten die mittels SMPS ermittelten Abscheidegrade Werte größer 85 % (siehe Abbildung 4). Dies könnte auf eine durch die Abgasnachbehandlung hervorgerufene Agglomeration hindeuten, wobei der Teil der Partikelmasse im Größenbereich über 830 nm (elektrodynamischer Durchmesser) mit dem verwendeten SMPS nicht mehr erfasst werden konnte.

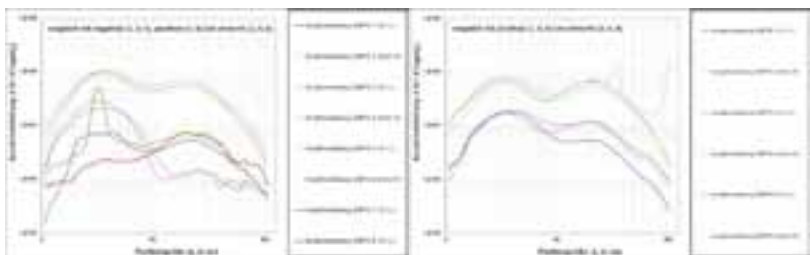


Abbildung 4: Ergebnisse der SMPS-Messung für den Elektroabscheider an der ERF in Kombination mit Drahtgestrickkatalysator.

Von der BTU Cottbus wurde weiterhin eine optimierte Elektrodengeometrie entwickelt. Zudem wurden optimierte Abscheideelektroden bereitgestellt, die in folgenden Versuchen an der ERF getestet wurden. Der Einsatz von Blechen an den Sprühelektroden mit dem Ziel zur besseren Ausbildung der Korona führte zu einer leicht erhöhten Überschlagsneigung, so dass die Spannung zur Vermeidung von Überschlägen reduziert werden musste. Damit wurde das Feld leicht geschwächt und im Vergleich mit der ursprünglichen Sprühelektrodenvariante wieder ein ähnlicher Abscheidegrad erhalten.

Der Einsatz einer optimierten Abscheideelektrode führte im Vergleich zur Blechabscheideelektrode zu einer geringfügigen Erhöhung des Abscheidegrades für Gesamtstaub (Messung Gravimetrie nach VDI 2066, Blatt 1). Werden die SMPS-Daten zur Bewertung des anzahlbezogenen Reduzierungsgrades herangezogen, zeigte sich eine erhöhte Abscheideleistung für Partikel kleiner 830 nm (elektrodynamischer Partikeldurchmesser).

Neben den Versuchen zu unterschiedlichen Elektrodenvarianten wurde eine verkleinerte und damit feldfähige Hochspannungs-Einführung mit verschiedenen Varianten des Isolators getestet.

3.3 Verbrennungsluftregelung in Kombination mit Katalysator und Elektroabscheider an der ERF

Das Verbrennungsluft-Regelungskonzept des Projektpartners ISIS für die Einzelraumfeuerung wurde auf die sensorisch erfassten Prozesszustandsgrößen Verbrennungstemperatur in der Nachbrennkammer ($T(t)$), Restsauerstoffkonzentration ($ROC(t)$) und CO/HC-Gehalt ($CO/HC(t)$) gestützt.

Im ersten Entwicklungsschritt wurde der Abbrandverlauf in drei Verbrennungsphasen aufgeteilt und für jede Phase ein separater Regelungsalgorithmus entworfen. Die Regelgrößen waren dabei die unterschiedlichen Stellungen der einzelnen Luftklappen. Die Anpassung der Klappenstellungen erfolgte zyklisch.

Bereits durch eine erste automatische Prozessführung wurde eine deutliche Absenkung der CO/HC-Emissionen erreicht. Sowohl in der Zünd- als auch in der Hochtemperaturphase war das CO/HC-Signal bedeutend geringer. In der Ausbrandphase konnten ähnliche Verbesserungen erwartungsgemäß nicht erzielt werden.

Das vom ISIS für die Technikumsuntersuchungen am DBFZ bereitgestellte Funktionsmuster der Regelung wurde in Kombination mit Katalysator und Elektroabscheider getestet. Die Ergebnisse sind vielversprechend für den Einsatz aller drei Maßnahmen in der Heizperiode 2013/2014 am Feldstandort in Taucha bei Leipzig. Die Feldmessergebnisse sollen für die Anpassung und Optimierung der integrierten Maßnahmen genutzt werden und in den Bau des Prototyps für die abschließende Demonstrationsphase (Heizperiode 2013/2014) einfließen.

4 Emissionsminderung am Multifuelkessel (MFK)

Bei ersten Laboruntersuchungen im Rahmen des Projektes zeigte sich, dass sowohl die elektrostatische Staubabscheidung als auch die katalytische Oxidation bei hohen Temperaturen in der Nachbrennkammer als ungeeignet für eine zeitnahe praktische Umsetzung waren. Daher wurde die Integration eines Katalysators und eines speziell an die Prozessbedingungen angepassten Elektroabscheiders im Wärmeübertrager untersucht und entwickelt. Zur Verbesserung des Verbrennungsprozesses, insbesondere im Teillastbetrieb des Kessels wurde der Regelungsalgorithmus für die Luftzufuhr optimiert.

4.1 Katalytische Nachverbrennung

Die Untersuchung von kommerziell erhältlichen edelmetallbasierten Katalysatoren mit einem keramischen Trägermaterial in Form von Wabenkörpern und einer Kugelschüttung zeigte eine mögliche Minderung für CO als auch für VOC. Für einen edelmetallbeschichteten Wabenkörper, welcher im Wärmeübertrager bei etwa 650 °C im Vollastbetrieb und 450 °C im Teillastbetrieb untersucht wurde, zeigten sich die höchsten Minderungsleistungen. Die Reduzierung der Konzentration ausgewählter Komponenten im Abgas bei Einsatz des Katalysators sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Untersuchungen mit Katalysator wurden an sechs aufeinanderfolgenden Versuchstagen durchgeführt. Angegeben sind die Daten für den ersten (1) und letzten (6) Versuchstag jeweils für Voll- und Teillast.

Tabelle 2: Emissionsreduzierung bei Betrieb des Kessels mit Katalysator im Vergleich zum Referenzversuch ohne Katalysator

Emissionsreduzierung	Staub	CO	VOC (Org.-C)	Aromaten
Versuch	Angaben in %			
Vollast (1)	-	90,2	53,9	47,5
Vollast (6)	35,9	40,2	-19,7	-2,6
Teillast (1)	-	67,4	67,7	40,7
Teillast (6)	45,6	53,3	49,3	49,1

Bei einem weiteren untersuchten Alternativmaterial, welches als Kugelschüttung eingesetzt wurde, war die katalytische Aktivität sehr gering, so dass für die weiteren Entwicklungen Edelmetall-Katalysatoren auf Monolith-Basis ausgewählt wurden. Eine Emissionsreduzierung von mindestens 50 % für CO und VOC wird anhand der bisher durchgeführten Technikumsuntersuchungen als realistisch eingeschätzt und für die praktische Umsetzung im Feldbetrieb angestrebt. Es soll weiterhin die Integration einer Widerstandsheizung zum Erreichen der erforderlichen Temperaturen in An- und Abfahrphasen sowie im Teillastbetrieb untersucht werden. Hierfür wurde ein für Automobilanwendungen verfügbares System für die Applikation am MFK ausgelegt. Dieses System soll in Technikumsuntersuchungen zunächst charakterisiert und anschließend ggf. für die größere Feldanlage adaptiert werden.

4.2 Elektrostatische Staubabscheidung

Für die Entwicklung einer geeigneten elektrostatischen Staubabscheidung wurden der Einfluss verschiedener Sprüh- und Abscheideelektroden als auch der Gassenbreite auf die Abscheideleistung untersucht. Die Ergebnisse sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt. Bei der Variation der Gassenbreite wurden Plattenelektroden als Sprühelektrode eingesetzt. Es zeigte sich, dass bei größerer Gassenbreite eine deutlich bessere Abscheideleistung erreicht wird. Eine im Anschluss daran integrierte Drahtelektrode ermöglichte im Volllastbetrieb eine verbesserte Abscheidung. Die Ergebnisse zeigen, dass mit optimierter Elektrodengeometrie und -anordnung ein Abscheidegrad von über 80 % in allen Betriebsphasen erreicht werden konnte. Bei den Entwicklungen wurde eine Hochspannung zwischen 10 und 20 kV eingesetzt. Die Aufnahme der Partikelanzahlverteilung mittels SMPS ergab eine deutliche Partikelabscheidung bei Partikelgrößen ab 20 bis 30 nm.

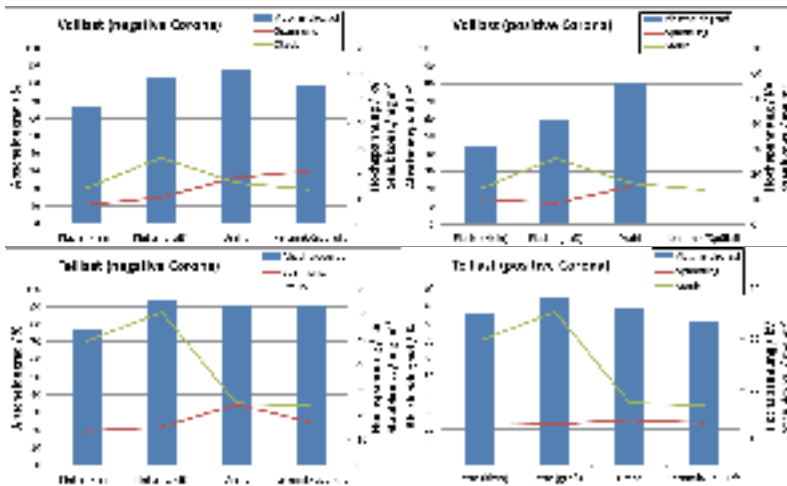


Abbildung 5: Abscheidegrade des Elektroabscheiders im Voll- und Teillastbetrieb mit verschiedenen Konfigurationen.

4.3 Entwicklung Verbrennungsregelung

Anhand von Verbrennungsversuchen bei drei verschiedenen Leistungsstufen mit verschiedenen Einstellungen für die Luftzufuhr wurde ein optimierter Regelungsalgorithmus erarbeitet. Mit der Anpassung von Primär- und Sekundärluft kann insbesondere im Teillastbetrieb eine Emissionsminderung erreicht werden (siehe Abbildung 6).

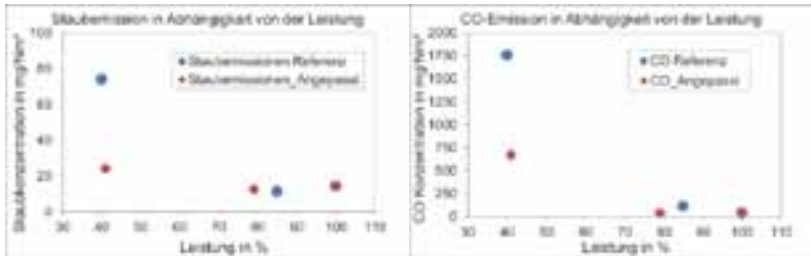


Abbildung 6: Staub- (links) und CO-Konzentration (rechts) bei Betrieb des Kessels mit üblichen und optimierten bzw. angepassten Einstellungen zur Regelung der Verbrennungsluft.

Die Umsetzung der ermittelten Regelungsfunktionen erfolgt im Rahmen einer Neuauflage der Regelung durch A.P. Bioenergietechnik. Derzeit wird diese im Technikum und demnächst bei den Feldmessungen erprobt.

5 Ausblick

In der laufenden Heizperiode 2012/13 werden Untersuchungen der entwickelten Maßnahmen im Feldbetrieb gemeinsam mit den Projektpartnern vorgenommen. Hierbei soll die Praxistauglichkeit getestet als auch Ansätze zur Anpassung und Optimierung ermittelt werden. Für den Multifuelkessel von A.P. Bioenergietechnik ist des Weiteren die Untersuchung der Wirksamkeit der Systeme bei einem alternativen Brennstoff zu Holz (z.B. Miscanthus) vorgesehen. Ebenso ist die Verbrennungsregelung für beide Feuerungsanlagen auf den Betrieb mit den Maßnahmen Katalysator und Elektroabscheider zu optimieren. Dementsprechend wird eine weitere Reduzierung der Emissionen und die Anpassung der Maßnahmen an den Praxiseinsatz im kommenden Jahr mit Einbeziehung der Ergebnisse aus den Feldmessungen angestrebt, so dass Ende des nächsten Jahres in der Heizperiode 2013/14 ein abschließender Demonstrationsbetrieb mit den entwickelten Prototypen für beide Anlagen erfolgen kann.

Danksagung/Projektförderung

Das am DBFZ beteiligte Projektteam dankt den Projektpartnern für die intensive und sehr gute konstruktive Zusammenarbeit.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 03KB051 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das Projekt wird im Rahmen des Kompetenzfeldes „Katalytische Emissionsminderung“ am DBFZ bearbeitet.

Sensorik und Abgas-Katalyse zur Reduktion der Emissionen von Klein-Holzfeuerungsanlagen

Heinz Kohler*, Simon Brunner, Paul Butschbach, Dominik Glesing

Adresse: Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS), Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe

*E-Mail: heinz.kohler@hs-karlsruhe.de

Abstract

Es werden Feuerungsexperimente mit scheitholz- und pelletbefeuerten Verbrennungsanlagen kleiner Leistung vorgestellt, die auf neuentwickelten Verbrennungsluftregelungen basieren, welche wiederum auf der sensorischen Registrierung der Verbrennungstemperatur, der Restsauerstoffkonzentration und des Gehalts an un- bzw. teilverbrannten Abgaskomponenten beruhen. Die Ergebnisse belegen, dass auf diese Weise die gasförmigen Emissionen erheblich und die partikulären zumindest nennenswert vermindert werden können. Die katalytische Unterstützung der Nachverbrennung führt insbesondere in den Phasen geringer Verbrennungstemperaturen (Zünd- und Ausbrandphase) zur weiteren Absenkung der gasförmigen Emissionen.

Schlagwörter: Holzverbrennung, Feuerungsprozess, Sensoren, Verbrennungsluft, Regelung, Emissionen

Motivation

Mit der Festlegung niedrigerer Emissionsobergrenzen für die Holzverbrennung in Feuerungsanlagen kleiner Leistung (Novellierung der 1. BImSchV) hat der Gesetzgeber einen ersten Schritt getan, um angesichts der massiven Emissionen von CO, Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und von mit organischer Fracht beladenen Feinstäuben insbesondere bei der Verbrennung von Scheitholz [1], die zunehmende Umweltbelastung durch diese Emissionsquellen zu verringern. Die ab dem Jahr 2015 neu gültigen Emissionsgrenzwerte für Holzfeuerungsanlagen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Ein Vergleich mit den typischen Emissionen eines Standard-Heizölbrenners von ca. 50 mg/m^3 CO zeigt, dass auch diese verminderten Emissionsobergrenzen immer noch zu einer erheblichen Erhöhung der Umweltbelastung führen werden, wenn die Wärmebereitstellung durch Einsatz von Klein-Holzfeuerungsanlagen in privaten Haushalten weiter voranschreitet.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte nach der 1. BImSchV, Stufe 2 (gültig nach 31. Dezember 2014)

Anlagentyp	CO / mg/m^3	PM (total) / mg/m^3
Einzelraumfeuerstätte (ERF)	1.250	40
Spaltholz befeuerte Zentralheizungskessel	400	20
Pellet-Feuerstätten mit/ohne Wassertasche	250/250	30/20

In dieser Arbeit sollen Möglichkeiten aufgezeigt und experimentell untermauert werden, mit denen es mit Hilfe geeigneter Sensoren gelingt, den Feuerungsprozess besser zu beschreiben und auf der Basis dieser zusätzlichen Prozessinformationen verbesserte Verbrennungsluft-Regelungskonzepte zu entwerfen, die verminderte Schadstoff-Emissionen zur Folge haben werden.

Sensorisch werden die drei Prozessparameter Verbrennungstemperatur (CT), Restsauerstoffkonzentration im Abgas (ROC) und Gehalt der unverbrannten Gaskomponenten im Abgas (CO/HC) zur vergleichenden Bewertung des Verbrennungsprozesses registriert bzw. als Regelungseingangsgrößen für die separate Regelung der Primär- und Sekundärverbrennungsluftströme genutzt. Weiterhin werden Ergebnisse von Abbrandexperimenten nach Integration eines Oxidationskatalysators in den Abgasweg vorgestellt, um die Wirksamkeit dieses Verfahrens zur Unterstützung der Nachverbrennung der Pyrolysegase insbesondere in der Zünd- und Ausbrandphase einer Scheitholzcharge zu demonstrieren.

Kurzer Überblick über die Experimente

Die in den letzten Jahren neu entwickelten Regelungskonzepte wurden experimentell an einem Scheitholz-Heizkessel (Vitolig 200, Viessmann GmbH, Allendorf), einem Kaminofen (Varia R, Spartherm GmbH, Melle) und an einem Pellet-Heizkessel (Pelletti II, Ritter Energie- und Umwelttechnik, Waldbronn) adaptiert.

Hierzu wurden die Feuerungsanlagen mit der oben erwähnten Sensorik für CT, ROC und CO/HC und mit separaten Stellmotoren zur Regelung der Verbrennungsluftklappenöffnung bzw. mit separaten Gebläsen für Primär- und Sekundärverbrennungsluft ausgestattet und jeder Luftkanal mit einem Luftmassenströmungssensor nachgerüstet. Einen Überblick über den experimentellen Aufbau gibt Abbildung 1.



Abbildung 1: ISIS-Feuerungstechnikum mit den Feuerungsanlagen Vitolig 200 (Viessmann, Allendorf, re.) und Pelletti II (Ritter Energie- und Umwelttechnik, Karlsbad, li.), der Prozess-Steuerungs- und Messtechnik und dem SMPS/APS Feinstaubanalyzesystem (linker Bildrand).

Zur kontinuierlichen Registrierung der ROC und des CO/HC-Gehaltes im Abgas wurden ein dynamisch betriebener Hochtemperatur-Sauerstoffsensoren (Dittrich Elektronik GmbH, Baden-Baden) bzw. ein Hochtemperatur-Mischpotenzialsensoren (CarboSen 1000, Escube GmbH, Stuttgart) verwendet. Beide Sensorprinzipien sind im Detail in [2] beschrieben. Während der Sauerstoffsensoren im thermodynamischen Gleichgewicht mit allen anderen Gaskomponenten ein ROC-Signal liefert, kann beim Mischpotenzialsensorenprinzip aufgrund der EMK-Generierung aus konkurrierenden Oberflächenreaktionen mit unterschiedlichen Gaskomponenten und mit dem Sauerstoff kein für eine bestimmte Gaskomponente spezifisches Signal erwartet werden. Deshalb wird dieser Sensor vor dem Einsatz mit einem Modellgas (z.B. CO/H₂-Gemisch in synth. Luft) kalibriert und die im Feuerungsprozess gemessene EMK als äquivalente CO/H₂-Konzentration interpretiert. Beide Sensorelemente sind bei Abgastemperaturen bis ca. 350°C im Dauerbetrieb einsetzbar.

Verbrennungsluft-Regelungskonzepte

Aufgrund der komplexen, nur begrenzt reproduzierbaren Oxidationsbedingungen von Festbrennstoffen mit makroskopischer Größe, insbesondere von Scheitholz, wurde schon sehr früh erkannt, dass man einer vollständigen Verbrennung nur nahe kommt, wenn die in der ersten Verbrennungsstufe entstehenden Pyrolysegase in einem nachgeschalteten Verbrennungsprozess (zweite Stufe) aufoxidiert werden [3]. Allerdings ist die separate Regelung der Verbrennungsluftströme für beide Verbrennungsstufen bisher insbesondere beim Betrieb von Feuerungsanlagen kleiner Wärmeleistung nicht zufriedenstellend gelöst. Für den Grad der Oxidation der Pyrolysegase sind neben der Temperatur und des Sauerstoffangebotes auch die Aufenthaltszeit der Gase in der Sekundärbrennkammer und ggfls. katalytische Einflüsse auf die Reaktionskinetik prozessbestimmend. Allerdings werden insbesondere in Feuerungsanlagen kleiner Leistung wie z.B. Einzelraumfeuerstätten bestenfalls nur in kurzen Verbrennungsphasen genügend hohe Reaktionstemperaturen ($>700^{\circ}\text{C}$) erreicht, so dass insbesondere aufgrund der mangelhaften Reaktionskinetik eine zufriedenstellende Nachoxidation auch bei genügend hohem Sauerstoffangebot kaum möglich ist. Dies bedeutet umgekehrt, dass ein zu hoher Sekundärluftstrom in die Nachbrennkammer vermieden werden muss, um die Abkühlung der Reaktionsgase durch die kalte Verbrennungsluft zu minimieren. Den hier beschriebenen Experimenten liegt deshalb der Gedanke zugrunde, für eine optimale Prozessregelung neben dem Sensor zur Regelung des ROC noch einen zweiten Gassensor einzusetzen, der den aktuellen CO/HC-Gehalt im Abgas misst und dessen Signal genutzt wird, um den Sekundär-Verbrennungsluftstrom optimal an die Verbrennungssituation anzupassen.

Eine Vielzahl von Verbrennungsexperimenten in unterschiedlichen Scheitholz-Feuerstätten haben mehrfach bestätigt, dass die Regelung des Primär-Verbrennungsluftstromes als Funktion der Parameter CT und ROC und die des Sekundär-Verbrennungsluftstromes als Funktion der Parameter CT und CO/HC zu stabilen Verbrennungsprozessen führt, wenn für verschiedene Phasen der Verbrennung (Zündphase, stationäre Hochtemperaturphase, Ausbrandphase) eigene Regelungsalgorithmen formuliert werden [2,4,5]. Allerdings gilt dies nicht für die Experimente mit dem mit Pellets befeuerten Heizkessel [6]. Hier sind die Verbrennungsbedingungen auch in den instationären Phasen (Zünd- und Ausschaltphase) aufgrund der kontinuierlichen Brennstoff- und Verbrennungsluftströme und der im Vergleich zum Scheitholz wesentlich konstanteren Brennstoffstruktur (insbesondere Größe und Porosität der Pellets) deutlich reproduzierbarer, was die Regelung der Verbrennungsluftströme alleine auf der Basis von CT und ROC erlaubt. Die auf diese Weise in den verschiedenen Feuerungsanlagen erzielten Ergebnisse hinsichtlich der gasförmigen und partikulären Emissionen (PM) werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

Ergebnisse aus den Feuerungsexperimenten

Scheitholzverbrennung im Heizkessel Vitotig 200

Im Falle des Vitotig 200 Scheitholz-Heizkessels handelt es sich um eine geschichtete Holzbevorratung in der Primärbrennkammer mit einer Brennzzone über dem Feurrast und seitlicher Ausströmung der Pyrolysegase in die Nachbrennkammer (seitlicher Abbrand). Der Vergleich der Abbrandergebnisse bei Betrieb mit der Hersteller-Regelung und mit der neuen ISIS-Regelung wurde bereits in [2] im Detail vorgestellt. Im Folgenden wird das Abbrandergebnis der ISIS-Regelung bei integriertem Oxidationskatalysator mit dem Ergebnis bei Regelung mit der Herstellermethode (ohne Katalysator) verglichen (Abbildung 2).

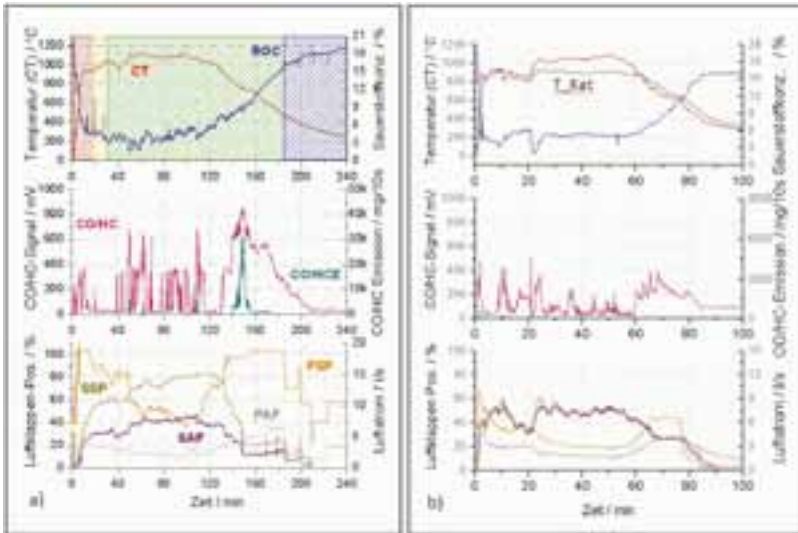


Abbildung 2: Abbrandverlauf, jeweils gemittelt über drei Abbrände bei Betrieb des Stückholzheizkessels a) mit der Regelung des Herstellers (Verbrennungstemperaturregelung) und b) bei Anwendung der ISIS-Regelung nach Implementierung eines Oxidationskatalysators. CO/HCE: aus der CO/HCE-Kalibrierung und der Summe der Verbrennungsluftströme bestimmter relativer Schadgasemissionsstrom, PSP/SSP: Primär-/Sekundärluft-Klappenposition, PAF/SAF: Primär-/Sekundär-Verbrennungsluftstrom, T_Kat: Katalysatortemperatur. In a) sind die Zündphase (rot), die Stabilisierungsphase (gelb), die Hochtemperaturphase (grün) und die Ausbrandphase (blau) durch Schraffur exemplarisch bezeichnet und stellen einen automatischen Prozessablauf dar. Holzart und -menge: a) Buchen-Scheitholz, 18kg; b) Buchen-Scheitholz, 9kg.

Wie aus Abbildung 2 zu ersehen ist, sind die relativen Emissionen (CO/HCE) bei Betrieb mit ISIS-Regelung und Oxidationskatalysator insbesondere in der Hochtemperatur (HT)- und Ausbrandphase erheblich geringer verglichen mit dem Betrieb mit Hersteller-Regelung. Eine grobe Abschätzung ergab eine Absenkung von CO/HCE um ca. 90 % in der HT-Phase und ca. 95 % in der Ausbrandphase. Einzig in der Zündphase sind die Emissionsminderungen geringer, weil die für die Umsetzung notwendige Katalysatortemperatur (ca. 300°C) nicht von Beginn an vorliegt, sondern erst mit der Entwicklung des Wärmestromes erreicht wird.

Der Betrieb mit Oxidationskatalysator ermöglicht auch geringere Verbrennungsluftströme. Vermutlich erklärt dies die in der Zünd- und Ausbrandphase deutlich geringeren Feinstaubemissionen (Abbildung 3).

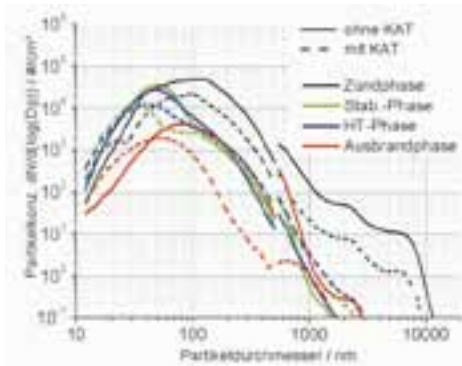


Abbildung 3: Feinstaubpartikelanalyse gemittelt über verschiedene Phasen der Verbrennung im Stückholz-Heizkessel mit ISIS-Regelung.

Scheitholzverbrennung im Kaminofen

Zur Anwendung des im vorigen Kapitel vorgestellten Verbrennungsluft-Regelungskonzeptes zum automatischen Betrieb eines Kaminofens (hier Modell Varia, Spartherm GmbH) mussten folgende feuerungstechnischen Gegebenheiten berücksichtigt werden: (i) Dieser Feuerungsanlagentypus ist im Allgemeinen nicht mit einem Saugzugventilator ausgerüstet (in Heizkesseln üblich) und deswegen – will man die Nachrüstung des Kamins mit einem geregelten Saugzugventilator vermeiden – musste das Regelungskonzept an den Betrieb bei veränderlichem (witterungsabhängigem) Naturzug adaptiert werden. Dies geschieht durch direkte Regelung der Verbrennungsluftströme über das Signal von Luftmassenströmungssensoren (Eingangsgröße) und die Position der motorisch betriebenen Luftklappen (Stellgröße). Diese Verfahrensweise kann auch dazu genutzt werden, unzureichende Kaminzugbedingungen vor dem Start der Feuerung anzuzeigen. (ii) Durch die besondere Konstruktion der Feuerungsanlage (Abbildung 4) wird die Verbrennung durch insgesamt drei separat geführte Verbrennungsluftströme betrieben: Verbrennungsluft durch den Feuerrost (von unten, Rostluft), von oben entlang der Innenseite der beiden Sichtscheiben (Scheibenluft) und von hinten bzw. von der Seite durch zwei mit Düsen versehene Leisten am Übergang zur Sekundärbrennkammer (Düsenluft). Diese drei Verbrennungsluftströme werden im „Handbetrieb“ durch einen gemeinsamen Stellhebel in starren Verhältnissen zueinander eingestellt. Im ISIS-Betrieb erhielt jede der drei Verbrennungsluftzuführungen eine eigene Stellklappe mit Luftmassenstromsensor zur individuellen Regelung.



Abbildung 4: Varia Kaminofen (Spartherm GmbH, Melle). a) Konstruktionsschema mit ange deuteten Verbrennungsluftströmen von unten durch den Feuerrost, von oben entlang der beiden großen Sichtscheiben und von hinten bzw. von der Seite im oberen Bereich der Brennkammer. b) Varia im Betrieb mit ISIS-Regelung. Die Gassensoren wurden im Bypass betrieben, um zu hohe Einsatztemperaturen zu vermeiden.

Vergleicht man die beiden Verbrennungsabläufe (Abbildung 5), dann wird deutlich, dass eine nahezu inverse Korrelation zwischen Verbrennungstemperatur und CO/HC-Signal besteht, weil – genügendes Sauerstoffangebot vorausgesetzt – hauptsächlich die Kinetik die Restkonzentration der unverbrannten Gaskomponenten bestimmt. Hierzu scheint eine Mindesttemperatur in der Sekundärbrennkammer von ca. 320°C bei diesem Anlagentyp notwendig zu sein, um eine deutliche Verringerung des CO/HC-Signals zu erreichen. Dieser Zustand wird bei „Handbetrieb“ kaum erreicht, weil vermutlich die Verbrennungsluft zu reichlich dosiert.

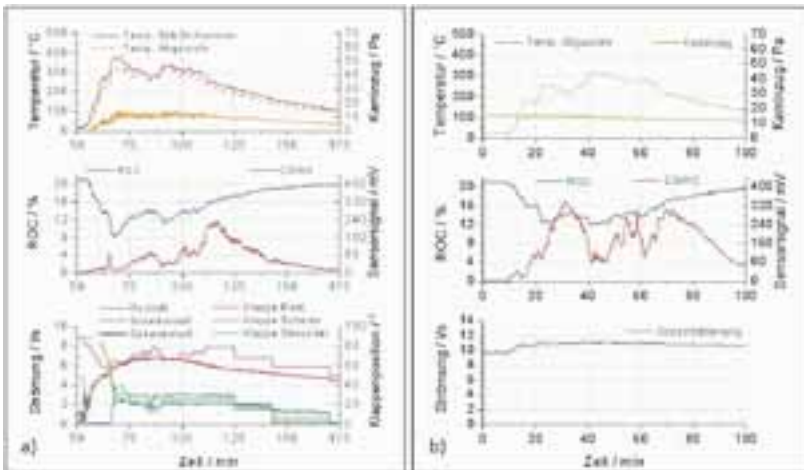


Abbildung 6: Feinstaubanalyse (SMPS/APS-System, TSI Inc.) a) mit ISIS-Regelung und b) mit Handbetrieb (siehe Abbildung 5). Die Daten wurden zeitlich in charakteristischen Verbrennungsphasen gemittelt.

Die Feinstaubanalysen lieferten keine bedeutenden Unterschiede. Dies sind erst vorläufige Ergebnisse einer Einzelmessung, die noch keine statistisch abgesicherten Schlussfolgerungen erlauben. Die gravimetrische Gesamtstaubbestimmung ergab in diesen Experimenten ähnliche Werte von 88 mg/m^3 (ISIS-Regelung) bzw. 70 mg/m^3 (Handbetrieb).

Verbrennung von Holzpellets im Heizkessel

Nach dem technischen Stand des Pelletti II-Heizkessels wird die Verbrennungsluft starr in einen Primärluftstrom durch den Brenngut-Teller (Abbildung 7a) und einen Sekundärluftstrom radial in die Nachbrennzone verteilt. In der Anbrandphase wurde vom Hersteller eine Pellet-Einschubsequenz definiert, die über die Abgastemperatur gesteuert wird. Der Verbrennungsluftstrom wird in der Zündphase konstant gehalten und in der anschließenden stationären HT-Phase auf einen niedrigeren, konstanten Wert gesetzt (Abbildung 8a).



Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Pelletti II-Heizkessels (a) und Verbrennungsluftzufuhr mit Gebläsen und vorgeschalteten Luftmassenstromsensoren nach Umrüstung der Anlage (b).

Nach Festlegung einer Messsequenz, die aus Kaltstart – stationärer HT-Phase – Abschaltphase – Warmstartphase – zweiter stationärer HT-Phase – zweiter Abschaltphase besteht, wurden zuerst Abbrandexperimente nach dem technischen Stand des Herstellers durchgeführt (Referenzierung). Anschließend wurde der Heizkessel mit zwei separat regelbaren Gebläsen für die Primär- (Teller-) und Sekundärluft und zugehörigen Luftmassenstromsensoren nachgerüstet (Abbildung 7b). In die Nachbrennzone wurde ein Thermoelement zur Registrierung von CT zusätzlich eingeführt (Abbildung 7a).

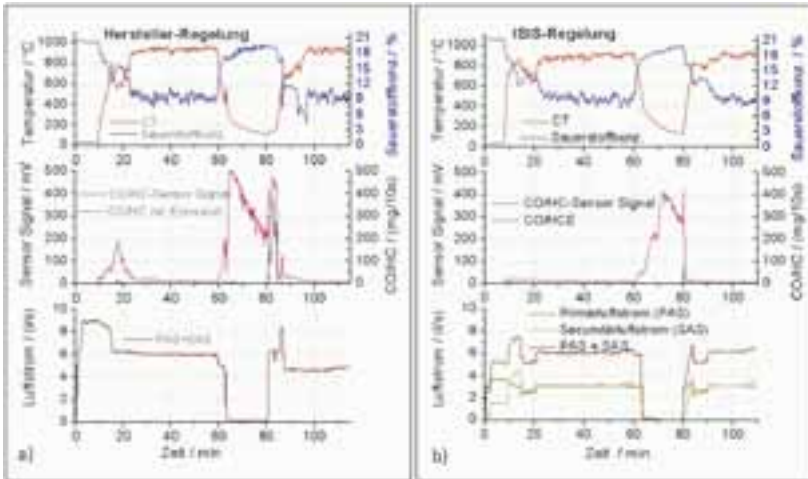


Abbildung 8: Abbrandverlaufes Pelletkessels a) bei Ausstattung und Regelung nach der Betriebsweise des Herstellers und b) nach Umrüstung und Betrieb mit der ISIS-Regelung. Der Kaltstart (Min. 0), Ausschalten (Min. 60) und Warmstart (Min. 80) wurden in beiden Sequenzen gleich gewöhnt. CO/HCE: aus der CO/HC-Kalibrierung und der Summe der Verbrennungsluftströme bestimmter relativer Schadgasemissionsstrom.

In den folgenden Abbrandexperimenten blieb die zeitliche Festlegung der Brennstoffströme in den verschiedenen Phasen der Verbrennung ungeändert, einzig die Regelung der Verbrennungsluftströme wurde auf der Basis der Parameter CT und ROC in allen Phasen der Verbrennung in einem Algorithmus neu definiert (ISIS-Regelung). Das Endergebnis zeigt Abbildung 8b. Das CO/HC-Signal wurde in diesen Experimenten nur zur Bewertung der gasförmigen Emissionen registriert und geht nicht in die Prozessregelung ein. Im unteren Teil von Abb. 8b ist deutlich die im Vergleich zu Abbildung 8a unterschiedliche Verbrennungsluftstromregelung in der Kalt- (0-23 min) und in der Warmstartphase (80-92 min) zu erkennen. Die Folge sind erheblich niedrigere CO/HC-Signale mit ISIS-Regelung in den beiden genannten Verbrennungsphasen bei insgesamt niedrigeren Verbrennungsluftströmen. In den stationären HT-Phasen sind die Summen der Verbrennungsluftströme in etwa gleich, das CO/HC-Signal ist nicht wesentlich, jedoch signifikant geringer. Schätzt man aus der Kalibrierung des CO/HC-Signals [2] und aus den Luftmassenströmen die gesamte relative CO/HC-Emission ab, dann erhält man für die in Abbildung 8 dargestellte Feuerungssequenz eine Minderung der CO/HC-Emissionen um ca. 70 %.

Simultan wurden in Intervallen von drei Minuten die Feinstaubemissionen analysiert (Abbildung 9) und in der HT-Phase auch eine gravimetrische Gesamtstaubbestimmung vorgenommen. Insbesondere in der Abschalt-, der zweiten HT- und der Warmstartphase wurden bei Betrieb mit Herstellerregelung signifikant höhere Partikelemissionen gemessen. Aus den gravimetrischen Gesamtstaubbestimmungen ergaben sich Konzentrationen von 37 mg/m^3 (Hersteller) und 24 mg/m^3 (ISIS), jeweils bezogen auf 13 % ROC. Dies entspricht einer Feinstaubreduktion von 35 % durch die ISIS-Verbrennungsluftregelung in der HT-Phase.

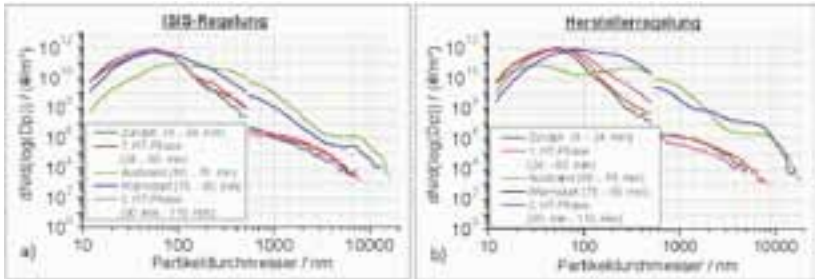


Abbildung 9: Feinstaubpartikelverteilung nach Anzahl und Größe im Abgas des Pellett-Heizkessels, Mittelwerte aus den temporären Betriebsphasen nach der Sequenz in Abbildung 8.

- bei Betrieb mit ISIS-Verbrennungsluftregelung auf der Basis der Verbrennungstemperatur und der ROC
- bei Betrieb mit Herstellerregelung (nur ein Verbrennungsluftgebläse).

Zusammenfassung - Schlussfolgerungen

Vergleichende Feuerungsexperimente in einem scheitholzbefeuerten Heizkessel, einem scheitholzbefeuerten Kaminofen und einem Pellet-Heizkessel haben gezeigt, dass bei sensorischer Registrierung der Verbrennungstemperatur in der Nachbrennzone (-kammer), der Restsauerstoffkonzentration im Abgas und des Gehaltes von un- bzw. teilverbrannten Kohlenwasserstoffen und CO im Abgas nach Adaption neu entwickelter ISIS-Verbrennungsluftregelungsalgorithmen die Verbrennung in allen Phasen erheblich verbessert werden kann. Hieraus resultiert die Reduktion der gasförmigen Emissionen um ca. 60-80 % (mit Oxidationskatalysator teilweise noch höher). Diese grobe Schätzung basiert bisher nur auf Vergleichen mit den Ergebnissen bei Betrieb der Anlagen mit Herstellerregelung bzw. mit Handsteuerung und auf grober Referenzierung der Daten durch ein handelsübliches Rauchgasanalysegerät (IM 2800, Environmental Equipment GmbH, Heilbronn). Daten, die auf einer kontinuierlichen Analyse der Abgase mit einem Hochtemperatur-FTIR-System basieren, werden folgen. Hinsichtlich der Feinstaubemissionen können ebenfalls Absenkungen erwartet werden, die vermutlich aus den insgesamt verringerten Verbrennungsluftströmen durch das Glutbett infolge verbesserter Beschreibung des Verbrennungsprozesses resultieren. Nach dem Stand der bisherigen Erkenntnisse bleibt allerdings festzustellen, dass nur die ganzheitliche Optimierung von Verbrennungsbedingungen in Kombination mit verbesserter Verbrennungsluftregelung mittels geeigneter Sensoren zukunftsweisende Fortschritte hinsichtlich der Minimierung der Emissionen verspricht, die weit über die neu festgelegten Grenzwerte der 1. BImSchV hinausreichen können.

Literatur

- [1] N. Klippel, T. Nussbaumer: Einfluss der Betriebsweise auf die Partikelemissionen von Holzöfen. Schweizerisches Department für Umwelt, Energie und Verkehr, Final report (2007).
- [2] P. Butschbach, F. Hammer, H. Kohler, A. Potreck, Th. Trautmann: 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 B137*(1) (2009), S. 32-41.
- [3] T. Nussbaumer: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Forschungsbericht Nr. 6 des Laboratoriums für Energiesysteme der ETH Zürich (1989).
- [4] H. Kohler, P. Butschbach, T. Trautmann, H. Belmir: Wood energy for domestic heating: Extensive reduction of toxic gas and particulate matter emissions by optimized control of the firing process and use of gas sensors. In: *Computers and simulation. In: Modern Science*, Vol. 3, Eds.: Nikos E. Mastorakis, MetinDemiralp, Valeri M. Mladenov, WSEAS Press, (2010), S. 492.
- [5] T. Trautmann, A. Potreck, H. Kohler: Verfahren und Vorrichtung zur diskontinuierlichen Verbrennung von Brennstoffen, DE 10 2006 046 599 B4.
- [6] H. Kohler, P. Butschbach, M. Aleksandrova: Untersuchung der Auswirkungen der Verbrennungsoptimierung in Stückholz- und Pelletfeuerungsanlagen kleiner Leistung auf die Minderung der Feinstaubemissionen – Optimierung durch Zuluftregelung mittels in-situ Abgassensoren, Förderinitiative „Betriebliche Umwelttechnik“, Umweltministerium Baden-Württemberg, Abschlussbericht (2009).

Danksagung

Die Arbeiten wurden finanziell vom Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg (Förderschwerpunkt „Betriebliche Umwelttechnik“) und durch die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Förderprogramm „Energetische Biomassennutzung“) unterstützt. Die Feuerungsanlagen-Hersteller Viessmann GmbH, Allendorf und Ritter Energie- und Umwelttechnik, Waldbronn haben jeweils aus Eigenmitteln die Umbauten ihrer Serienprodukte vorgenommen und damit die Nachrüstung der Anlagen zum Aufbau der ISIS-Regelungsmethodik ermöglicht.

Feldmessungen zum Emissionsverhalten von Biomassekleinf Feuerungsanlagen

Niels Woltersdorf*, Alfons Kather

Adresse: Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Energietechnik (M-5), Denickestr. 15, 21073 Hamburg

*E-Mail: woltersdorf@tuhh.de

Abstract

Durch die Novellierung der 1. BImSchV im März 2010 werden für zukünftig zu installierende, biomassebefeuerte Kleinf Feuerungsanlagen strengere Grenzwerte bezüglich der Emissionen von Feinstaub und Kohlenmonoxid gelten. Es stellt sich die Frage, inwieweit diese kommenden Grenzwerte bereits von aktuell installierten Kleinf Feuerungsanlagen eingehalten werden können. Hierzu wurde in den Heizperioden 2010/11 und 2011/12 das Emissionsverhalten von 35 biomassebefeuerten Kleinf Feuerungsanlagen im Großraum Hamburg unter realen Betriebsbedingungen detailliert untersucht. Bei den Messungen wurden kontinuierlich die Rauchgaszusammensetzung (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2) sowie die Korngrößenverteilung des emittierten Feinstaubes entsprechend des aerodynamischen Durchmessers im Größenbereich von 7 nm bis 10 μm ermittelt. Des Weiteren wurden parallel zu den kontinuierlichen Messungen diskontinuierliche Probenahmen zur Ermittlung der Feinstaubemissionen durchgeführt.

Die untersuchten Anlagen fallen aufgrund ihrer Feuerungswärmeleistung in den Geltungsbereich der 1. BImSchV. An 18 der untersuchten Anlagen wurde parallel die wiederkehrende Messung des Schornsteinfegers durchgeführt. Mit den gewonnenen Ergebnissen kann die Möglichkeit der Einhaltung kommender Emissionsgrenzwerte für die untersuchten Kessel aufgezeigt werden. Die gewonnenen Ergebnisse der Feldmessungen werden mit den zukünftigen Emissionsgrenzwerten der 1. BImSchV sowie mit verfügbaren Prüfstandmessungen der Bundesanstalt für Landtechnik (BLT) Wieselburg, Österreich, verglichen.

Die vorliegenden Ergebnisse der durchgeführten Messungen zeigen, dass die vom Schornsteinfeger durchgeführten Messungen zumeist gut mit den anderen ermittelten Messergebnissen übereinstimmen. Auch wird gezeigt, dass, obwohl eine Anzahl von Biomassekesseln schon jetzt die Emissionsgrenzen der 2. Stufe der novellierten 1. BImSchV einhalten, eine Weiterentwicklung der bestehenden Anlagentechnik notwendig ist, um für zukünftige Kessel die Einhaltung der Grenzwerte der 2. Stufe garantieren zu können. Ein signifikanter Unterschied der gemessenen Korngrößenverteilungen nach eingesetztem Brennstoff konnte bei den im Feld durchgeführten Messungen nicht nachgewiesen werden.

Schlagwörter: Feinstaub, Emissionen, Kleinf Feuerungsanlagen, 1. BImSchV

Aufgrund der Novellierung der 1. BImSchV (1. BImSchV, 2010) werden für biomassebefeuerte Kleinf Feuerungsanlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden, verschärfte Emissionsgrenzwerte für Feinstaub und Kohlenmonoxid gelten. Für Feinstaub wurde der zulässige Emissionswert 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) in Stufe 2 herabgesetzt. Der bis jetzt leistungsabhängige Grenzwert für Kohlenmonoxid wird von 1.000 bis 4.000 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ auf 400 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ herabgesetzt. Um zu untersuchen, ob diese kommenden Vorgaben schon von heute betriebenen Anlagen erfüllt werden, wurden Feldmessungen an 35 im Großraum Hamburg betriebenen Anlagen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in diesem Beitrag präsentiert. Dabei wird zunächst auf die untersuchten Anlagen und das Vorgehen bei den Messungen eingegangen. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen vorgestellt.

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, Mahrückstände)
- Nennleistung (14,9 kW bis 500 kW)
- Baujahr (1995 bis 2012).

In Abbildung 1 werden die untersuchten Kessel in fünf Klassen entsprechend ihrer thermischen Nennleistung unterteilt, um eine Übersicht über die Größenordnung der untersuchten Kessel zu geben. Die farbigen Markierungen zeigen die in den Leistungsbereichen eingesetzten Brennstoffe. Die meisten Kessel (46 %) verfügen über eine Nennleistung zwischen 15 und 50 kW. Der am häufigsten in den untersuchten Kesseln eingesetzte Brennstoff sind Holzpellets. Die untersuchten Anlagen, die Hackschnitzel verfeuern, haben eine hohe Nennleistung (200-500 kW).

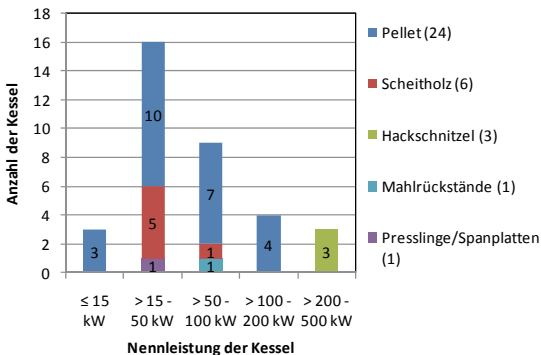


Abbildung 1: Verteilung der Nennleistung der untersuchten Kessel sowie der in den Kesseln eingesetzten Brennstoffe.

Versuchsaufbau und Messtechnik

In allen untersuchten Anlagen wurden die Messungen nach dem gleichen Vorgehen bezüglich des Messaufbaus und der verwendeten Messgeräte durchgeführt. Ausnahmen sind die Messungen des Schornsteinfegers und die Messungen mit dem elektrostatischen Niederdruckimpaktor (ELPI™). Der Schornsteinfeger war bei 18 der 35 durchgeführten Messungen anwesend. Der zur Bestimmung der Größe der Feinstaubpartikel notwendige elektrostatische Niederdruckimpaktor konnte an 10 der untersuchten Kessel aus Platzgründen 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, aber beide Messstellen an der gleichen Stelle installiert wurden. Bis auf die Messung der Gesamtstaubprobe erfolgten alle Messungen kontinuierlich und zeigen somit auch das Emissionsverhalten in verschiedenen Betriebszuständen, wie z.B. beim Anfahren oder bei Abfahrvorgängen der untersuchten Kessel. Die Gesamtstaubprobenahme erfolgt in einem möglichst stationären Betriebspunkt, der durch möglichst konstante Sauerstoffkonzentration im Rauchgas und konstante Rauchgastemperatur bestimmt wurde. In Abbildung 2 sind die kontinuierlich aufgenommenen Daten eines Pelletkessels beispielhaft über der Zeit aufgetragen. Das Diagramm zeigt einen Anfahrvorgang, der nach ca. 30 min in einen stationären Zustand übergeht – dies ist an den ab 15:05 Uhr nur schwach schwankenden O₂- und CO-Konzentrationen zu erkennen. Bei Scheitholzesseln dauert dieser Vorgang zumeist länger. Die Dauer der Gesamtstaubprobenahme variiert und beträgt entweder 15, wenn Schornsteinfegermessungen durchgeführt wurden, oder 30 min, wenn keine Schornsteinfegermessungen durchgeführt wurden. Infolge der längeren Probenahmezeit kann der Fehlereinfluss der beiden wichtigen Messgrößen – nämlich der auf dem Filter abgeschiedenen Masse und des entnommenen Rauchgasvolumens – minimiert werden (VDI 2066, 2006).

Tabelle 1: Übersicht über die an den Kesseln 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	Planfilterkopfggerät	Diskontinuierlich 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 Planfilterkopfggeräts.
4	Aerodynamischer Durchmesser des Feinstaubes in 12 Fraktionen von 7 nm bis 10 µm	ELPI™	Elektrostatischer Niederdruckimpaktor; möglichst weit hinter Gesamtstaubprobenahme, vor Druckregelklappe

Die Anlagen wurden für die Messungen sowohl im normalen Betrieb als auch, wenn verfügbar, im Schornsteinfeger-Modus betrieben. So konnte ein realistisches Bild des Emissionsverhaltens ermittelt werden. Die im Folgenden präsentierten Messwerte sind jeweils das arithmetische Mittel der in der Zeit der Gesamtstaubprobenahme sekundlich aufgenommenen kontinuierlichen Messwerte. Dementsprechend ergibt sich für jede Gesamtstaubprobenahme ein Datensatz aus Mittelwerten, mit denen gearbeitet wurde.

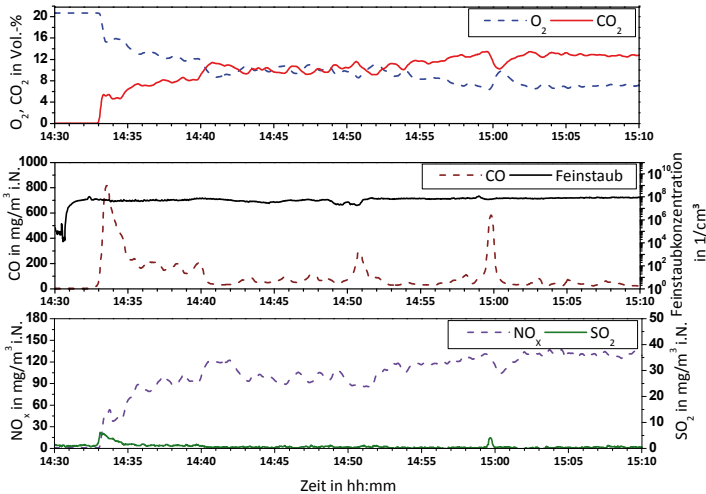


Abbildung 2: Beispiel der kontinuierlich aufgenommenen Messwerte, hier der Anfahrvorgang eines pelletbefeierten Kessels bis zum Erreichen des stationären Betriebs.

Emissionsmessungen nach 1. BImSchV

Zur Darstellung der Messergebnisse werden die gewonnenen Daten danach untergliedert, welcher Brennstoff eingesetzt wurde. Um die Darstellungen übersichtlich zu gestalten, werden die eingesetzten Brennstoffe in die Kategorien „Pellet“ und „andere Biomassen“ unterteilt. Als genormter Brennstoff werden Pellets somit den anderen verwendeten Brennstoffen, welche eine größere Schwankungsbreite bezüglich Zusammensetzung und Form besitzen, gegenübergestellt. Die für die 1. BImSchV relevanten Emissionsdaten (Feinstaub, Kohlenmonoxid) sind an 18 der untersuchten Kessel auf zwei Arten gemessen worden. Zum einen mit Hilfe eines Wöhler SM 96 CO, das beide Größen erfasst, zum anderen mit Hilfe eines Planfilters nach VDI 2066 (VDI 2066, 2006) und des portablen Rauchgasanalytators Horiba PG-250 (vergleiche Tabelle 1). In Abbildung 3 sind die Ergebnisse für die parallel durchgeführten Messungen für Feinstaub und Kohlenmonoxid einander gegenübergestellt. Die eingetragenen Linien haben jeweils eine Steigung von eins. Liefern beide Messverfahren identische Werte, liegt der zu der Messung gehörige Punkt genau auf dieser Linie. Das linke Diagramm zeigt die Messwerte der Feinstaubmessung. Bis auf drei von 20 Messungen, bei denen beide Messverfahren signifikante Unterschiede liefern, ist eine gute Übereinstimmung der beiden Messverfahren erkennbar. Die Gründe für die auf-

tretenen Unterschiede konnten bislang noch nicht abschließend geklärt 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 %. Beim rechten Diagramm der Abbildung 3 (Kohlenmonoxid) sind beide Achsen logarithmisch skaliert, um eine übersichtliche Darstellung der Messwerte zu ermöglichen. Die relative Standardabweichung der Messwertpaare zueinander beträgt hier 22,6 %. Bei Vernachlässigung der drei Messwerte, welche die stärksten Abweichungen aufweisen, ergibt sich eine Standardabweichung von 14 %.

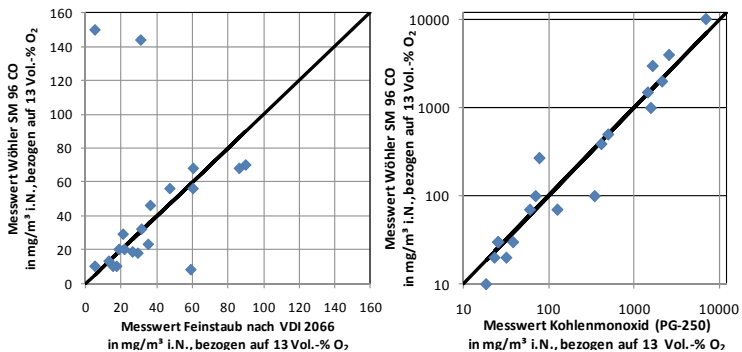


Abbildung 3: Vergleich der Messergebnisse des Schornsteinfegers (Wöhler SM 96 CO) mit den Ergebnissen nach VDI 2066 und Horiba PG-250 bei den Feldmessungen.

Alle Messergebnisse für die Emissionen von Feinstaub und Kohlenmonoxid sind in Abbildung 4 (Feinstaubemissionen) und Abbildung 5 (Kohlenmonoxidemissionen) jeweils als kumulierte Verteilung aufgetragen. Der Wertebereich der Abszissenachse ist bei beiden Graphen jeweils bis zum fünffachen Grenzwert der 2. Stufe der 1. BImSchV dargestellt, um den relevanten Bereich sichtbar aufzulösen. Somit sind über 80 % der Messwerte in den Graphen dargestellt. In Abbildung 4 sind bei den aufgetragenen anderen Biomassen acht von 44 Einzelmessungen nicht aufgeführt, die maximal gemessenen Feinstaubkonzentrationen betragen 753 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ und 449 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Bei der Darstellung der an den Pelletkesseln gewonnenen Messwerte sind 4 von 70 Werten nicht aufgeführt. Hier betragen die maximalen gemessenen Feinstaubkonzentrationen 855 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ und 150 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. In Abbildung 4 ist zu sehen, dass der zukünftige Grenzwert für Feinstaubemissionen von 20 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ bei 17 % der pelletbefeuerten Kessel eingehalten wurde. Bei den mit anderen Biomassen befeuerten Kesseln wurde er bei 18 % der durchgeführten Messungen erreicht.

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. Nach einer möglichen Rechtsauslegung ergibt sich, dass ein Messwert von $31 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.}$, 13 Vol.-% O_2 als Stufe 2 erfüllend eingestuft werden kann. Dieser Wert würde bei den durchgeführten Messungen zu folgenden Ergebnissen führen:

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

Somit schneiden die Pelletkessel unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und der Rundungsvorgaben deutlich besser ab als die anderen Biomassen, weil 47 % der an pelletbefeuerte Kesseln ermittelten Feinstaubemissionen zwischen 20 und $31 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N.}$, 13 Vol.-% O_2 und somit im Bereich der Messunsicherheit und Rundungstoleranz des Grenzwerts liegen.

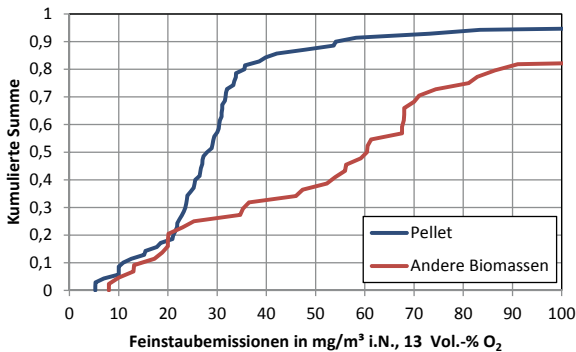


Abbildung 4: Kumulierte Summe aller Messungen in Abhängigkeit von den Feinstaubemissionen.

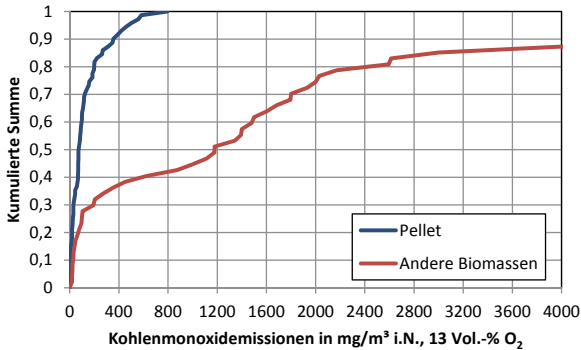


Abbildung 5: Kumulierte Summe aller Messungen in Abhängigkeit von den Kohlenmonoxidemissionen.

In Abbildung 5 sind sechs von 46 Einzelmessungen, die an mit anderen Biomassen befeuerten Kesseln durchgeführt wurden, nicht aufgeführt. Die maximal gemessene Kohlenmonoxidkonzentration betrug $10220 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$. Die in Abbildung 5 aufgezeigten kumulierten Verteilungen zeigen, dass der kommende Grenzwert der Stufe 2 von $400 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ für Kohlenmonoxid bei den durchgeführten Messungen bei 92 % der pelletbefeuerten Kessel sowie bei 35 % der mit anderen Biomassen betriebenen Kessel eingehalten wird.

Wenn durch eine mögliche Rechtsauslegung ein Messergebnis von $550 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ ausreicht, um die vorgeschriebenen Kohlenmonoxidemissionen der zweiten Stufe der 1. BImSchV einzuhalten, würde sich das Ergebnis bezüglich der den Grenzwert einhaltenden Anlagen nur in geringem Maße ändern. Durch dieses Vorgehen würden 96 % der pelletbefeuerten und 37 % der mit anderen Biomassen befeuerten Kessel die Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid einhalten.

Vergleich zu Messungen Dritter

Die BLT Wieselburg (BLT Wieselburg, 2012) führt akkreditierte Prüfstandmessungen nach VDI 2066 an biomassebefeuerten Kesseln durch. Hierbei werden ebenfalls die für die 1. BImSchV relevanten Emissionswerte gemessen. Auf der Internetseite der BLT sind die Ergebnisse dieser Prüfstandmessungen einsehbar. Ein Abgleich der im Feld untersuchten Kesselmodelle mit den aufgeführten Messprotokollen ergab eine Übereinstimmung für sieben der untersuchten Kessel. Für diese Kessel werden in Abbildung 6 die Ergebnisse der Feld- und der Prüfstandmessungen gegenübergestellt. Bei den aufgezeigten Messergebnissen der Feldmessungen handelt es sich jeweils um das arithmetische Mittel der Einzelmessergebnisse. Die Balken in

Abbildung 6 zeigen, dass die im Feld ermittelten Messerte zum Teil erheblich voneinander abweichen. So wurden lediglich bei einem der sieben identischen Kessel im Betrieb (Kessel B) geringere Feinstaub- und Kohlenmonoxidemissionen gemessen als bei den von der BLT Wieselburg durchgeführten Prüfstandmessungen.

Bei den anderen sechs Kesseln liegen die ermittelten Emissionen über den am Prüfstand ermittelten Werten. Die Kessel werden am Prüfstand in einem einwandfreien, vermutlich neuwertigen Zustand betrieben. Dies ist bei Kesseln, die dem normalen täglichen Betrieb unterworfen sind, nicht immer gegeben. Die Erfüllung der Grenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV kann deshalb aufgrund einer Prüfstandsmessung im täglichen Betrieb nicht garantiert werden.

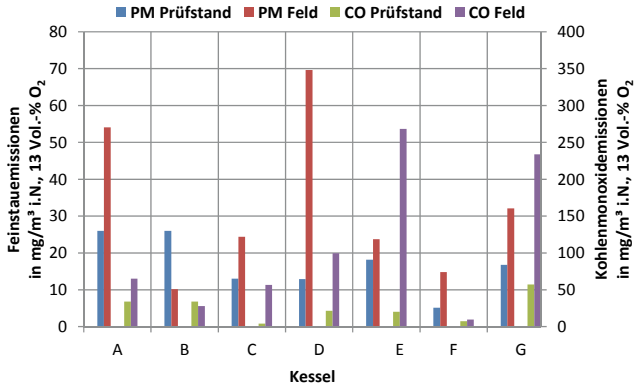


Abbildung 6: Vergleich der Prüfstandsmessungen mit Messungen der BLT Wieselburg (BLT Wieselburg, 2012).

Emissionen von Stickoxiden und Schwefeldioxid

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die für die Einhaltung der Emissionsvorschriften der 1. BImSchV nicht relevanten Messergebnisse für Stickoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2) dargestellt. Die Höhe der beiden Schadstoffemissionen hängt im Kleinfeuerungsbereich fast ausschließlich von der Brennstoffzusammensetzung ab. Schwefeldioxid resultiert aus der Oxidation von Schwefelverbindungen im Brennstoff. Stickoxide entstehen im Wesentlichen aus Brennstoffstickstoff. Die Möglichkeit der Bildung von thermischem oder promptem NO_x scheidet aufgrund der eher geringen Feuerraumtemperaturen aus (Kaltschmitt, 2009).

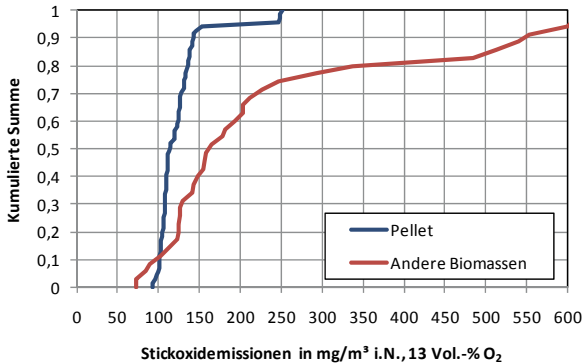


Abbildung 7: Kumulierte Summe aller Messungen in Abhängigkeit von den Stickoxidemissionen.

Die beiden Summenverteilungen in Abbildung 7 zeigen, dass 95 % der Messergebnisse zwischen 93 und 153 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ liegen. Aufgrund des homogenen Brennstoffs ist die Emissionsbreite der pelletbefeuerten Kessel gering. Die anderen Biomassen variieren in ihrem NO_x-Ausstoß von 72 bis 1551 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Der maximal gemessene Ausstoß von 1551 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ wurde beim Einsatz von Spanplatten als Brennstoff gemessen und ist auf stickstoffhaltige Inhaltsstoffe des verwendeten Leims zurückzuführen (Nussbaumer, 1989). Außer diesem Wert sind zwei weitere Messwerte (601 und 610 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂) nicht in der Darstellung erfasst.

Die in Abbildung 8 gezeigten Ergebnisse der Schwefeldioxidmessungen liegen bei pelletbefeuerten Anlagen bei 86 % der durchgeführten Messungen in einem Bereich von < 1 ppm, was der Messgenauigkeit des Messgerätes entspricht und somit vernachlässigbar klein ist. Auch bei den anderen Biomassen liegen 77 % der ermittelten Messwerte unter 200 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Die höchsten Schwefelemissionen wurden bei der Verbrennung von Scheitholz (Mischholz aus der Landschaftspflege) und Mahlrückständen (Nahrungsmittelindustrie) gemessen. Die Summenverteilungen beider Graphen zeigen, dass bei der Verbrennung von Pellets gegenüber den anderen in dieser Feldmessung erfassten Biomassen deutlich geringere Mengen an NO_x und SO₂ emittiert werden. Ein möglicher Grund dafür ist die Standardisierung der Pellets, die bei den anderen Biomassen nicht erfolgt.

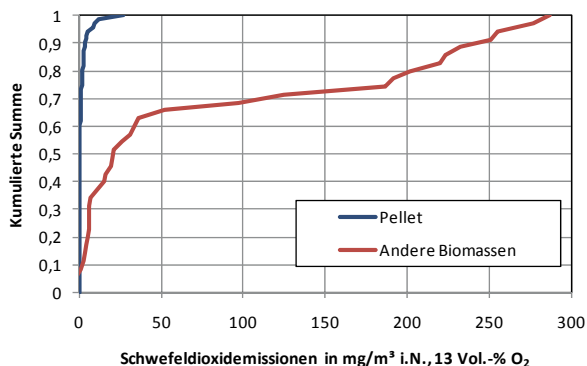


Abbildung 8: Kumulierte Summe aller Messungen in Abhängigkeit von den Schwefeldioxidemissionen.

Korngrößenverteilung des emittierten Feinstaubs

Mit dem elektrostatischen Niederdruckimpaktor (ELPI™) wird der aerodynamische Durchmesser des emittierten Staubs ermittelt. Hierzu wird der in einem entnommenen Rauchgasteilstrom befindliche Feinstaub in zwölf Fraktionen von 7 nm bis 10 µm klassiert. In Abbildung 9 sind die durchschnittlichen Anteile der jeweiligen Fraktionen aufgezeigt. Um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu erreichen, wurde der relative Anteil der in den jeweiligen Fraktionen detektierten Partikel für alle Messungen berechnet. Hieraus wurde jeweils der Mittelwert für pelletbefeuerte sowie für die mit anderen Biomassen befeuerten Kessel berechnet. Die Verteilungen sind in Abbildung 9 mit den Standardabweichungen der einzelnen Messwerte dargestellt. Beide Verteilungen sind sich sehr ähnlich. Die ermittelten Staubgrößenverteilungen haben bei pelletbefeuerten Kesseln ihren Mittelwert bei den feineren Fraktionen als jene der mit anderen Biomassen befeuerten Kessel. Aufgrund der hohen Standardabweichung kann jedoch keine Aussage über Unterschiede im aerodynamischen Durchmesser bei unterschiedlichen Brennstoffen getroffen werden. Gerade aufgrund der unterschiedlichen vorherrschenden Randbedingungen bei jedem im Feld untersuchten Kessel ist eine Identifikation des Brennstoffeinflusses auf die Korngrößenverteilung aus den vorliegenden Messdaten nicht möglich.

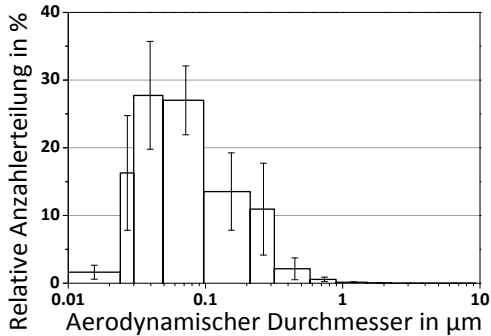


Abbildung 9: Relative Anzahlverteilung des emittierten Feinstaubes in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Messergebnisse an. (Links: pelletbefeuerter Kessel; rechts: mit anderen Biomassen befeuerter Kessel).

Zusammenfassung

Die parallel ermittelten Feinstaub- und CO-Emissionswerte 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 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Einhaltung der Stufe 2 Grenzwerte der 1. BImSchV im Betrieb schon heute möglich ist. Allerdings gilt dies nur für einen kleinen Teil der Anlagen, sodass zukünftige Anlagen im Vergleich zu den heute betriebenen weiter verbessert werden müssen, um zuverlässig die wiederkehrenden Messungen des Schornsteinfegers bei der Erstprüfung bestehen zu können. Die untersuchten pelletbefeuerter Anlagen haben bezüglich des Emissionsverhaltens gegenüber den mit anderen Biomassen befeuert Anlagen einen Vorteil. Dies gilt sowohl für die in der 1. BImSchV reglementierten Emissionen Feinstaub und CO als auch für die nicht reglementierten Emissionen von NO_x und SO_2 . Diese Vorteile sind auf den normierten Brennstoff und die damit verbundene gut dosierbare, automatische Beschickung zurückzuführen. Der Vergleich der Messergebnisse der Anlagen im Feld mit den vorliegenden Prüfstandmessungen der BLT Wieselburg zeigt, dass die am Prüfstand erbrachten Emissionswerte nicht zu jeder Zeit im Feld eingehalten werden können. Die mit dem elektrostatischen Niederdruckimpaktor (ELPITM) gemessenen Daten zeigen keine Brennstoffabhängigkeit bei den ermittelten Partikelgrößenverteilungen.

Literatur

- BLT Wieselburg, 2012 Bundesanstalt für Landtechnik: Prüfberichte. URL: <http://blt.josephinum.at/> (Stand: 20.09.2012).
1. BImSchV, 2010 Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010. Teil I Nr. 4, ausgegeben zu Bonn am 1. Februar 2010.
- VDI 2066, 2006 Verein deutscher Ingenieure: Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung, Beth Verlag GmbH, 2006.
- Kaltschmitt, 2009 Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse. 2. Auflage, Springer Verlag 2009.
- Nussbaumer, 1989 Nussbaumer, T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz, Promotionschrift, ETH Zürich 1989.

Emissionsminderung mit dem Carola-Abscheider bei Kleinf Feuerungsanlagen

Hanns-Rudolf Paur¹, Andrei Bologna¹, Gerhard Mais³, Hans-Peter Rheinheimer², Klaus Woletz¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie

² CCA-Carola Clean Air GmbH

³ Green Energy Solutions GmbH

Adresse: Carola Clean Air GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

¹ E-Mail: paur@kit.edu

www.carola-clean-air.com

Abstract

Die Verbrennung von Holz zur Gebäudeheizung ist in den Wintermonaten ursächlich für eine hohe Feinstaubbelastung in Europa. Für primärseitig optimierte Einzelraumfeuerungen und Kesselanlagen können Partikelabscheider einen Beitrag zur sicheren Einhaltung der künftigen Grenzwerte der 1. BImSchV leisten. Der elektrostatische Carola-Abscheider besteht aus einer Ionisationsstufe in der die Partikel im Rauchgas mittels einer Corona-Entladung aufgeladen werden. Die geladenen Partikel werden in der Kollektorstufe über eine spiralförmige Drahtbürste geleitet, auf der sich die Feinstpartikel abscheiden. Durch periodische Drehung dieser Bürste werden die agglomerierten Partikel von den Borsten abgestreift und fallen in den Aschebehälter, der regelmäßig entleert wird. Um die Verschmutzung der Hochspannungsdurchführung zu vermeiden, wird das Eindringen von Partikeln mit einer patentierten Schutzelektrode verhindert. Damit kann auch auf die Verwendung von Sperrgas verzichtet werden. Der Carola-Abscheider wurde nach umfangreichen Laborversuchen zunächst an Kaminöfen und Pelletkesseln mit unterschiedlichen Brennstoffen (Scheitholz, Pellets, Stroh, Getreide) getestet und bezüglich der Abscheidung bewertet. Auf dieser Grundlage wurde ein Prototyp-Abscheider für Kesselanlagen ausgelegt.

Die CCA-Carola Clean Air GmbH entwickelt, produziert und vertreibt diesen Carola-Abscheider für biomassegefeuerte Kesselanlagen im Leistungsbereich 25-100 kW. Der Abscheider weist hohe Abscheidegrade für Feinstpartikel bei gleichzeitig niedrigem Druckverlust auf und ist kompakt. Der Abscheider ist eigensicher bezüglich des Austritts von Rauchgas, da er bauartbedingt keine Öffnungen aufweist und nicht verstopfen kann. Zudem ist er durch End- und Thermoschalter gesichert, die den Betrieb der Coronaentladung nur im geschlossenen Zustand bei Temperaturen über 100 °C erlaubt. Um den weitgehend wartungsfreien Dauerbetrieb des Abscheiders zu gewährleisten, wurde ein Teststand mit einem 100 kW Hackschnitzkessel aufgebaut, an dem bis zu drei Abscheider parallel betrieben werden können. Ziel der derzeitigen Untersuchungen ist die Optimierung der Elektrodengeometrie, der Abscheidegrade, die Bilanzierung und Charakterisierung der abgetrennten Staubmengen und die Untersuchung der Staubablagerungen. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Grenzwerte der Stufe 2 der 1. BImSchV mit dem neu entwickelten Ab-

scheider sicher eingehalten werden. Im nächsten Schritt ist neben der Zulassung des Abscheiders, gemeinsam mit Kesselherstellern die Entwicklung von Abscheidern geplant, die optimal an den Betrieb ihrer Kesselanlagen angepasst sind.

Schlagwörter: Biomasse, Verbrennung, Feinstaub, Abscheider, Filter, Hackschnitzel, Pellet, Scheitholz

Kenntnisstand

Trotz großer Fortschritte der Verbrennungstechnik entstehen bei der Holzverbrennung Feinstäube, die als gesundheitsschädlich eingestuft sind. Nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe werden in Deutschland 15 Mio. Kleinfeuerungsanlagen – davon etwa 850.000 holzbefeuerte Kesselanlagen betrieben. Die Holzverbrennung ist eine wichtige Emissionsquelle, die häufig die Partikelemission aus dem Automobilverkehr übertrifft. In zahlreichen Gegenden Europas ist die Feinstaubemission aus Holzfeuerungen in der Winterzeit daher ein wichtiges Problem. So haben (Bari et.al., 2011) den Anteil der Holzverbrennung an der PM10 Immission in Dettenhausen (Baden-Württemberg) in der Winterzeit auf bis zu 57 % bestimmt. Pfeffer et.al. (2012) berichten, dass im Messnetz von Nordrhein-Westfalen in den Wintermonaten des Jahres 2011 bis zu 25 % der Grenzwertüberschreitungen durch die Emissionen aus Holzfeuerungsanlagen verursacht werden.

Die 1. BImSchV wurde im Jahr 2010 novelliert und legt strenge Grenzwerte für die Partikelemission aus biomassegefeuerten Kesselanlagen fest (Leistungsbereich 4 bis 1000 kW). Mit der Verordnung soll ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung der Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen erreicht werden. Dieses Ziel soll mit einer neuen Generation von Feuerungsanlagen sowie u.a. durch den Einbau von Filteranlagen bei bestehenden Anlagen erreicht werden.

Eigenschaften des Carola Abscheiders

Im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde der kompakte elektrostatische CAROLA-Abscheider für Feinstpartikeln aus Kleinfeuerungsanlagen entwickelt, der gegenüber dem Stand der Technik große Vorteile aufweist (Abbildung 1). Der Abscheider kann leicht an bestehenden Kleinfeuerungsanlagen nachgerüstet werden, arbeitet verlässlich im Langzeitbetrieb und scheidet bis zu 90 % der Partikeln ab. In den meisten Fällen werden die Emissionsgrenzwerte der neuen 1. BImSchV deutlich unterschritten.

Da der Abscheider in den Abgasweg der Feuerungsanlage eingebaut wird, kann er zum Beispiel im Heizungsraum einer Kesselanlage aufgestellt werden, wo er für Messungen und Wartungsarbeiten leicht zugänglich ist. Auch ein im Fuß eines Edelstahlkamins integrierter Abscheider, der im Außenbereich aufgestellt wird, wurde vorgestellt (Abbildung 2). Der patentierte CAROLA-Abscheider wird in regelmäßigen Abständen automatisch gereinigt, so dass ein wartungsfreier Dauerbetrieb möglich ist. Eine zusätzliche Verunreinigung des Kamins findet somit nicht statt. Weitere wichtige Vorteile sind die robuste und eigensichere Bauweise, die Verwendung eines Isolators ohne Sperrgas sowie der niedrige Energieverbrauch.



Abbildung 1: Carola-Abscheider für Kleinfeuerungsanlagen.



Abbildung 2: Kaminintegrierter Carola-Abscheider.

Verfahrensprinzip des Carola-Abscheiders



Abbildung 3: Coronaentladung in einem rohrförmigen Versuchreaktor. Das leuchtende Plasma tritt aus den Spitzen der sternförmigen Elektrode aus.

Der Carola-Abscheider* besteht aus einer Ionisationskammer und aus einer oder mehreren Kollektorkammern. In der Ionisationskammer wird das einströmende Rauchgas durch eine Coronaentladung (Abbildung 3) ionisiert. Die optimalen Bedingungen für die unipolare Aufladung wurden experimentell ermittelt. Üblicherweise wird eine negative Aufladung (z.B. 20 kV; DC) eingesetzt, die sich beim Anlegen von Hochspannung an den Spitzen einer sternförmigen Elektrode ausbildet, die zentral über einen Isolator in der geerdeten Ionisationskammer fixiert ist. Die durch die Coronaentladung entstehenden Gasionen übertragen ihre Ladung auf die im Rauchgas suspendierten Partikel und laden diese auf. Da sich auch auf der Elektrode und der geerdeten Wand des Ionisators Ablagerungen bilden, treten in unregelmäßigen Abständen

Entladungen auf, durch die diese Ablagerungen abgelöst werden. Dies bewirkt die Selbstreinigung des Abscheiders und hält den Abstand zwischen der Elektrode und Wand konstant, um eine effektive Aufladung der Partikel durch eine stabile Coronaentladung zu gewährleisten.

* Das Acronym Carola[®] ist eine geschützte Kurzbezeichnung für den vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelten und patentierten Corona Aerosol Abscheider.

Die Hochspannungsdurchführung wird an der Oberseite der Ionisationskammer mit einem Isolator in die Elektrodenhalterung eingeführt. Um die Verschmutzung des Isolators zu minimieren befindet sich dieser in einem Schutzrohr und ist nicht direkt dem Rauchgasstrom ausgesetzt. Der zum Patent angemeldete Hochspannungsisolator und das geerdete Schutzrohr tragen zur Standzeit des Abscheiders bei. Die Hochspannungseinheit befindet sich außerhalb des Abscheiders in einem temperaturgeschützten Schaltkasten. Um die Bildung von Kondensat im Hochspannungsbereich zu vermeiden, wird die Hochspannung mittels Temperaturfühler eingeschaltet wenn der Taupunkt am Isolator überschritten ist. Die aufgeladenen Partikel strömen über die Zwischenkammer in die rohrförmige Kollektorkammer und werden dort auf der geerdeten Edelstahlbürste abgeschieden. Die Abscheidung erfolgt ohne externes elektrisches Feld. Nach kurzer Zeit bilden sich auf den Borsten grobe, agglomerierte Aschepartikel. Die spiralförmige Drahtbürste rotiert periodisch über eine Abstreifkante und reinigt dabei die Wände der Kollektorkammer sowie ihre Borsten. Hierbei ist die Kollektorkammer so dimensioniert, dass die agglomerierten Partikel bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten in den Aschekasten fallen. Unter diesen Bedingungen ist die Resuspension der Partikel aus dem Aschekasten minimal.

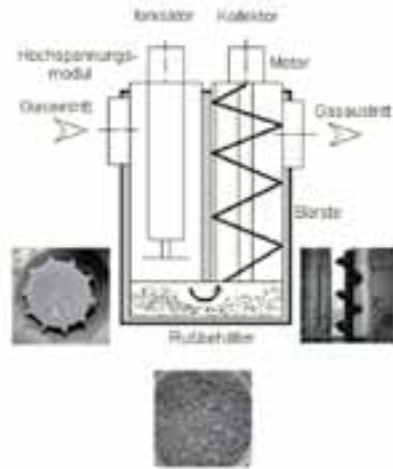


Abbildung 4: Verfahrnschema des Carola-Abscheiders. Die eingebildeten Abbildungen zeigen die sternförmige Elektrode, die abgeschiedenen Stäube im Aschekasten sowie die spiralförmige Drahtbürste aus der Kollektorkammer.

Testversuche am Prüfstand des KIT mit einem Kaminofen

Die Tests wurden am Prüfstand des KIT mit einem Kaminofen (Fa. Hase, Modell Toronto) durchgeführt, der eine Wärmeleistung von 8 kW abgibt. Der Brennstoff wurde entsprechend dem Heizwert des Scheitholzes (2,5 kg/h) abgewogen und dosiert. Die Abbrandbedingungen im Kaminofen wurden im Sinne der DIN EN 13240 eingestellt. Die Partikelmasenkonzentrationen wurden für jeden Prüfabbrand bei gleichmäßigen Verbrennungsbedingungen nach VDI 2066 im Roh- und Reingas mit Quarzfaserfiltern (QFF) gemessen. Hierbei wurden die Partikelproben etwa fünf Minuten nach Aufgabe des Brennstoffs auf die Grundglut gezogen. Die Partikelgrößenverteilung wurde zeitgleich mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS; Fa. Grimm) im Bereich 10-800 nm gemessen. Die Gas- und Partikeldaten wurden auf einen Volumengehalt an Sauerstoff von 13 % umgerechnet. Nach der Entwicklung wurde der Carola-Abscheider in zwei Langzeittests an einem 8 kW Kaminofen über 150 h betrieben. Während der Tests wurde der Abscheider bei einer Spannung von 17-18 kV und einem Coronastrom von 0,7-1,0 mA betrieben. Bei einem Durchsatz von 50 m³/h betrug der Differenzdruck etwa 10 Pa. Die Eintrittstemperatur in den Abscheider lag bei 230-270 °C. Im Langzeittest zeigten periodische Messungen der Spannung und des Stroms, dass diese zentralen Parameter sich nur geringfügig änderten.

Da nur leichte Ablagerungen im Elektrodenbereich auftraten, blieb der Abstand nahezu konstant. Die Spitzen der sternförmigen Elektrode blieben über den ganzen Zeitraum der Versuche sauber. Der Betrieb des Abscheiders war somit über die Versuchszeit stabil. Bei einer Rohgaskonzentration zwischen 30-50 mg/m_N³ betragen die Abscheidegrade 75±5 %.

Testversuche am Deutschen Biomasseforschungszentrum

Im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen dem KIT und dem DBFZ (Bologa et al. 2012) wurde der Carola-Abscheider an einem Kaminofen mit Scheitholz, sowie an Kesseln (20 kW und 30 kW) mit den Brennstoffen Holzpellets, Getreide, Mischpellets (50 % Holz/50 % Stroh) und Strohpellets betrieben. Hierbei wurde der Abscheider im Bypass mit einem Durchsatz von 50 m³/h betrieben. Die Abscheidegrade des einstufigen Abscheiders für Feinstpartikeln (siehe Tabelle 1) betragen in Abhängigkeit von den Verbrennungsbedingungen zwischen 77-82 % (Pellets) sowie 73 % für Getreide. Die Tabelle 1 fasst die Versuchsergebnisse zusammen.

Tabelle 1: Typische Abscheidegrade des Carola-Abscheiders für verschiedene Brennstoffe und Verbrennungsanlagen*

Brennstoff / Anlage	Rohgaskonzentration in mg/m _N ³ bezogen auf 13 Vol-% O ₂	Reingaskonzentration in mg/m _N ³ bezogen auf 13 Vol-% O ₂	Abscheidegrad in %
Scheitholz / Kaminofen	29-35	3-5	87 ± 3 %
Holzpellets / Pelletsessel	19-21	3-4	82 ± 2 %
Getreide / Kessel	107-143	19-39	73 ± 7 %
Mischpellets / Kessel	117-133	28-32	77 ± 1 %
Strohpellets / Kessel	340-440	73-99	77 ± 3 %

* Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) an Anlagen in Leipzig durchgeführt.

Marktorientierte Weiterentwicklung des Carola-Abscheiders durch die CCA-Carola Clean Air GmbH

Das langfristige Ziel der CCA-Carola-Clean-Air GmbH ist es, die häusliche Verbrennung von Holz und Biomasse so sauber zu gestalten, wie die Verbrennung von Öl und Gas. Hierzu entwickelt die CCA-Carola-Clean-Air GmbH neuartige elektrostatische Abscheidesysteme für Feinstpartikel, die preiswert, langlebig und leicht nachrüstbar sind.

Die Helmholtzgemeinschaft fördert ab 2012 den Aufbau der CCA-Carola-Clean-Air GmbH. Eine unabhängige Jury von externen Experten sprach sich für die Förderung aus, weil das Produkt der CCA-Carola-Clean-Air eine große Verbesserung gegenüber bisher vorhandenen Technologien darstellt und die Erfolgchancen hoch sind. Diese Förderung sowie die Beteiligung des Karlsruher Instituts für Technologie, der Green Energy Solutions und der LIGANA-Investment AG stellen die Gründung auf ein stabiles Fundament. In der Tat ist die CCA-Carola-Clean-Air ein Startup-Unternehmen, das bereits über eine solide F&E-Basis mit geschützter Technologie verfügt und kompetente Gesellschafter für die Bereiche Finanzierung, Marketing und Produktion vorweisen kann.



Abbildung 5: Seriennaher Prototyp des Carola-Abscheiders für einen 50 kW Kessel (CCA-50.)

In der ersten Phase steht die Entwicklung des Carola-Abscheiders zur Marktreife im Vordergrund. Neben Kontakten zu Anwendern konzentriert sich die Aktivität vor Allem auf die Auslegung und Konstruktion von Prototypen für holzgefeuerten Kessel mit Leistungen von 25 bis 100 kW. Kundenspezifische Baugrößen werden auf Anfrage bearbeitet. Die industrielle Fertigung von Carola-Abscheidern für 50 kW-Kessel (CCA-50) wurde bereits erfolgreich abgeschlossen und stellt einen wichtigen Meilenstein der Entwicklung dar (Abbildung 5). Die Abmessungen der Abscheider betragen 600 x 500 x 980 mm (LxBxH). Die CCA-50 Abscheider sind für einen Volumenstrom von 150-200 m³/h geeignet und haben einen Energieverbrauch von 40 W.

Das Ziel der CCA-Carola Clean Air ist es, den künftigen Anwendern mit dem Carola-Abscheider ein hochwertiges und preiswertes Produkt zur Verfügung zu stellen, das einen geringen Wartungsaufwand erfordert. Hierzu werden umfangreiche Langzeittests der Abscheider durchgeführt, um den sicheren Dauerbetrieb auch bei schwierigen Abgasbedingungen zu gewährleisten. Im KIT wurde ein Teststand für Standzeituntersuchungen und die Qualitätskontrolle der Abscheider aufgebaut und in Betrieb genommen (Abbildung 6). An diesem Teststand können nunmehr bis zu drei Carola-Abscheider parallel getestet werden. Der Teststand ist mit einem 100 kW Hackschnitzelkessel einschließlich Heizbox der Fa. HDG Bavaria ausgerüstet, der bei Volllast einen Rauchgasstrom von 350 m³/h liefert. Der Kessel verbrennt bei Volllast pro Stunde ca 0,24 m³ Holzhackschnittel. Die Wärme des Kessels wird in das Fernheiznetz des KIT eingespeist. Das Rauchgas wird mit einer Temperatur von 200-240 °C in die parallel angeordneten Abscheider eingeleitet. Die Abscheider werden über nach VDI2066 ausgelegte Messstrecken angeströmt. Zur Messung der Rauchgase sind vor und hinter den Abscheidern Partikel- und Gasmessgeräte (Wöhler), Temperatur- und Druckfühler installiert.



Abbildung 6: Teststand der CCA-Carola Clean Air zur Qualitätskontrolle und Dauerbetrieb der Carola-Abscheider.

Die Messwerte werden bezüglich der Sauerstoffkonzentration korrigiert. Erste Messungen zeigen, dass der Abscheidegrad für Partikel aus dem Hackschnitzelkessel zwischen 75-85 % liegt. Die Grenzwerte der zweiten Stufe der 1. BImSchV werden somit sicher erreicht.

Ausblick

Nach Abschluss der Dauerbetriebsphase am Teststand steht die Zulassung der Abscheider an. Im nächsten Schritt ist die Entwicklung von Abscheidern geplant, deren Funktion optimal auf einzelne Kesselanlagen abgestimmt ist. Die CCA-Carola Clean Air GmbH wird diese Entwicklung in enger Abstimmung mit Herstellern von Biomassefeuerungen durchführen und damit die Grundlage zu einer nahezu emissionsfreien Holzverbrennung legen.

Literatur

Bologa A, Paur H-R, Seifert H, Woletz K, Ulbricht T. (2012): Fine particle generation, evolution and control by small scale biomass combustion devices. Management of Environmental Quality: An International Journal 23 (1): 36-55.

Bari, M. A.; Baumbach, G.; Struschka, W.; Scheffknecht, G. (2011): Air Pollution in Residential Areas from Wood-fired Heating. Aerosol and Air Quality Research, 11: 749-757.

Pfeffer, U., Breuer, L. and Gladtko, D.: European Aerosol Conference 2012, Book of Abstracts.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Volker Lenz und seinen Mitarbeitern vom Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und für die Durchführung der Messungen mit dem Carola-Abscheider. Weiterhin danken wir Herrn Ecker (Fa. HDG-Bavaria) und seinen Mitarbeitern für die Überlassung des Hackschnitzelkessels und für die tatkräftige Unterstützung bei der Inbetriebnahme der Verbrennungsanlage.

Entwicklung von Toxizitätstests für die Bewertung von Feinstaubemissionen aus der Holzverbrennung

Wolfgang Ahlf*, Birte Hegemann¹, Iris R. Gutiérrez¹

*Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)

¹AG Human- und Umwelttoxikologie, Fachbereich Biologie, Universität Konstanz

Adresse: Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft, Eißendorferstraße 40, 21073 Hamburg

*E-Mail: ahlf@tuhh.de

Abstract

Die vermehrte Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung durch Verbrennung geht einher mit einer zunehmenden Feinstaubbelastung. Besonders die Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen ist eine Emissionsquelle, die unter dem Verdacht steht, direkt mit Erkrankungen der Atemwege in Verbindung zu stehen. Ziel der Untersuchungen ist es daher, Emissionen aus der Biomasseverbrennung vorab direkt an der Quelle toxikologisch zu bewerten. Dazu wurde eine Testkombination entwickelt, die die Toxizität der Feinstäube als Stoffeigenschaft vergleichend analysiert. Die Zusammenstellung, die aus ökotoxikologischen und molekularbiologischen Biotests besteht, wurde erfolgreich auf die Anwendung von nativen Feinstaubproben angepasst. Der Einsatz von unbehandelten Partikeln in wässriger Suspension war dabei eine Grundvoraussetzung für eine Berücksichtigung der biologischen Verfügbarkeit gebundener Schadstoffe. Ein weiterer Anspruch war, Alternativen zu Tierversuchen einzusetzen. Für die Praxis bieten standardisierte Methoden Vorteile hinsichtlich einer guten Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit. Als bereits genormte Biotests wurden der Bakterienkontakttest, der Umu-Test, und der Yes-Test mit den gemessenen Einflussgrößen Zytotoxizität, Gentoxizität und Östrogenität ausgewählt. Ergänzt wurde die Testkombination durch den Nematodentest auf Hemmung der Reproduktion und spezifischer Analyse von Entgiftungsmechanismen durch Messung von Genexpressionen an *Caenorhabditis elegans*. Insgesamt zeigte sich eine hohe Relevanz der Testkombination, da alle Wirkungen in unterschiedlichen Feinstäuben nachgewiesen wurden. Die Ergebnisse verdeutlichten übereinstimmend, dass die Bioverfügbarkeit von partikelgebundenen Schadstoffen eine Schlüsselfunktion zwischen dem mengenmäßigen Auftreten von Schadstoffen und ihren Schadwirkungen darstellt. Ursache hierfür sind vermutlich die spezifischen Sorptionseigenschaften der Feinstäube. Entgegen den Erwartungen zeigten auch Feinstäube aus vollständigen Verbrennungen eine hohe Toxizität. Die Testbatterie konnte somit nach Prüfung der Auswahl und Anpassung an Feinstäube eine Charakterisierung der Feinstaubtoxizität liefern.

Schlagwörter: Biotest, Bioverfügbarkeit, molekulare Wirkmechanismen, Risikobewertung

Einleitung

Weltweit nehmen Holzfeuerungen zu Heizzwecken in den letzten Jahren zu. 2011 erfolgte 54 % der Bioenergiebereitstellung durch biogene Festbrennstoffe (Holz), wobei 90 % der Endenergie im Wärmebereich genutzt wurden (Bundesministerium für Umwelt 2011). In Finnland wird im Winter in 25 % der Haushalte mit Holz geheizt, Tendenz steigend (Ohlström et al. 2000). Auch in den USA stieg die Zahl der mit Holz heizenden Haushalte zwischen 2000 und 2010 um 34 % (US Today 2011). Aufgrund der vermehrten Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung nimmt auch die Feinstaubbelastung in den letzten Jahren stark zu. Hohe Feinstaubkonzentrationen durch Verkehr, Industrie und die Verbrennung von Holz stehen unter dem Verdacht, direkt mit Erkrankungen der Atemwege in Verbindung zu stehen (Pope et al. 2002; Pope/Dockery 2006; Boman et al. 2003). Die Verbrennungsgüte beeinflusst dabei maßgeblich die Größe, die Menge und die chemische Zusammensetzung der Feinstäube. Bei einer vollständigen Verbrennung entsteht hauptsächlich Feinstaub mit hohen Salz- und Schwermetallgehalten. Der Fokus der bisherigen Toxizitätsuntersuchungen liegt in den unvollständigen Verbrennungen, da hier aufgrund der chemischen Zusammensetzung das höchste toxikologische Potential vermutet wird. Zwar konnten in zahlreichen epidemiologischen Studien Zusammenhänge zwischen Feinstaubbelastungen und adversen Gesundheitseffekten festgestellt werden (Pope et al. 2002; Ekici et al. 2005; Pope/ Dockery 2006), die genauen Wirkmechanismen der Feinstaubtoxizität sind derzeit jedoch noch wenig bekannt. Der Gegenstand der Forschung sind vor allem Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen sowie deren potentielle Mechanismen (Donaldson et al. 2001). Obwohl sich bisher wenige Studien mit Feinstäuben aus der Holzverbrennung befassen, ist mittlerweile bekannt, dass diese Partikel ein vergleichbares toxikologisches Potential haben wie andere Partikel ähnlicher Größe (Naeher et al. 2007). Von biologischer Relevanz sind vor allem die Partikel, welche aufgrund der Größe tiefer in die Lunge inhaled werden können. Neben Ganztierversuchen und kontrollierten Versuchen mit Menschen (Park et al. 2004; Barregard et al. 2006; Ghio et al. 2012) kommen u.a. aus ethischen Gründen Zellsysteme zum Einsatz (Jalava et al. 2007; Danielsen et al. 2009). Bisher existieren hierbei keine standardisierten Verfahren, so dass zwar Wirkungspfade aufgedeckt werden, eine reproduzierbare Bewertung von Feinstäuben aus verschiedenen Feuerungen oder Verbrennungsbedingungen aber bisher nicht möglich ist. Hinsichtlich der zunehmenden Beliebtheit von Holzfeuerungen ist ein schnelles und reproduzierbares Toxizitätsscreening von Feinstäuben sinnvoll, um Art und Technik der Verbrennung nach toxikologischen Kriterien zu optimieren.

Zu einer umfassenden Bewertung von Feinstaubwirkungen auf Umwelt und menschliche Gesundheit gehören die drei Komponenten, Menge und Stoffeigenschaften der Stäube, Verhalten und Verteilung in der Umwelt, sowie Aufnahme und Wirkung in Organismen (einschließlich des Menschen). Toxizität als Stoffeigenschaft kann sehr gut mit alternativen Methoden zu Tierversuchen abgebildet werden. Daher war das Ziel dieser Arbeit, Feinstäube aus der Holzverbrennung aus Kleinf Feuerungsanlagen vergleichend toxikologisch zu charakterisieren. Moderne toxikologische Konzepte kombinieren mehrere Testsysteme, die sich gegenseitig ergänzen und verbesserte Extrapolationsmöglichkeiten für den Menschen ermöglichen. Daher wurde zur Bearbeitung der Problemstellung ein Bewertungskonzept erstellt, welches ökotoxikologische Biotests und molekularbiologische Methoden verbindet. Die grundlegenden molekularen Mechanismen sind über verschiedene biologische Organisationsformen hinweg vergleichbar, so dass humantoxikologisch relevante

Testergebnisse anhand einfacher Tests erreicht werden. Als Testorganismen wurden verschiedene Einzeller und der Nematode *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) ausgewählt. Da die verschiedenen Biotests unterschiedliche Limitationen und Vorteile beinhalten, lag ein besonderer Fokus auf der Auswahl der Testkombination. Kombiniert wurden Messungen zur allgemeinen Wirkung wie Zytotoxizität und Reproduktionshemmung mit spezifischen Nachweisen zur Charakterisierung der Wirkmechanismen. In Tabelle 1 sind die verschiedenen Effekte aufgeführt, die zu einer entsprechenden Toxizitätsbewertung beitragen sollten. Mit der so aufgestellten Testkombination wurde untersucht, ob Feinstäube qualitativ unterschieden werden können bzw. spezifische Parameter mit den beobachteten Effekten in Verbindung gesetzt werden können.

Tabelle 1: Übersicht der Effekte, die mit den gewählten Testsystemen erfasst werden können

Effekt	Mikrobielle Biotests	<i>C. elegans</i>
Zytotoxizität	X	
Oxidativer Stress		X
Fremdstoffmetabolismus		X
Östrogenität	X	
Genotoxizität	X	
Reproduktionshemmung		X

Material und Methoden

Die Tests wurden auf die Anwendung mit losen Stäuben und Filterproben angepasst. Im Folgenden werden jedoch nur die Versuche an den losen Staubproben betrachtet. Die Proben wurden vom DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH), dem TFZ (Technologie- und Förderzentrum) und dem IfT (Leibniz-Institut für Troposphärenforschung) bereitgestellt. Die chemische Analyse von PAK-, Schwermetall-, Anionen- und Kohlenstoffgehalt (EC und OC) wurden am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der TUHH mittels GCMS, AAS, IC und nach VDI 2465/1 durchgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der Charakteristika der getesteten losen Staubproben. Die Einzelsubstanzen wurden gemessen, sind hier aber der Übersicht halber nicht aufgeführt. Die Gesamtgehalte der chemischen Substanzgruppen wurden für das vorliegende Probenaset in jeweils drei Klassen (niedrig, mäßig und hoch) gruppiert

Probe Nr.	Ofen	Verbrennung	PAK	Schwermetalle	Kohlenstoff	Salze
#2	Handbeschickte Einzelfeuerstätte (Kachelofen mit Nachheizkasten)	Unvollständig	hoch	mäßig	mäßig	mäßig
#5	Automatisch beschickte Feuerstätte (Holzpelletkessel)	Vollständig	niedrig	niedrig	niedrig	hoch
#6	Hochwertiger Kaminofen	Unvollständig	niedrig	mäßig	hoch	niedrig
#7	Hochwertiger Kaminofen	Unvollständig	niedrig	niedrig	hoch	hoch
#8	Pelletkessel	Vollständig	niedrig	niedrig	niedrig	hoch
#9	Pelletkessel	Unvollständig	niedrig	mäßig	mäßig	hoch
#10	Spanner	Vollständig	niedrig	mäßig	niedrig	hoch

Die Proben mit den sieben untersuchten losen Feinstäuben (Tabelle 2) wurden folgendermaßen in Suspension hergestellt:

1. Herstellung einer Stammlösung (z.B. 1 mg/ml),
2. 1 min mischen mit Vortex-Rührer,
3. 15 min Ultraschallbad (35 kHz), eventuell Verdünnung.

Alle Feinstaub suspensionen wurden vor Testung 24 h bei Raumtemperatur auf einem Horizontalschüttler bei 150 rpm durchmischt.

Die mikrobiologischen Tests wurden in 96-well-Platten durchgeführt. Als standardisierte Biotests wurden der Bakterienkontakttest, der Umu-Test, und der Yes-Test ausgewählt. Der Bakterienkontakttest (BKT) mit dem aeroben Bodenbakterium *Arthrobacter globiformis* wurde ursprünglich für Sedimente entwickelt und standardisiert und erfolgte auf Basis von DIN 38412-48 und den Änderungen von (Heise/Ahlf 2005). Das Messprinzip beruht auf der Zugabe des blauen Farbstoffes Resazurin, der durch die Enzymgruppe der Dehydrogenasen zum pinken fluoreszierenden Farbstoff Resorufin reduziert wird. Der Umu-Test untersucht mithilfe des gentechnisch veränderten Bakteriums *Salmonella typhimurium TA 1535* potentiell DNA-verändernde (=genotoxische) Wirkungen von Abwässern (ISO 13829). Der Test wurde anhand von (Fretwurst/Ahlf 1996) auf Feinstaub angepasst. Die Messung von Genotoxizität erfolgt anhand der Aktivität eines Enzyms. Die Gensequenz dieses Enzyms wurde künstlich mit einem Gen gekoppelt, das bei DNA-Schädigung induziert wird. Der Yes-Test arbeitet mit genveränderten Hefen (*Saccharomyces cerevisiae*) und misst das östrogene Potential von Feinstäuben. Der Yes-Test wurde gemäß dem Protokoll von (McDonnell et al. 1991a) und (McDonnell et al. 1991b) mit Abänderung bezüglich der Zytotoxizitätsmessung ähnlich wie im Umu-Test gemacht. Das Testprinzip beruht auf der Aktivierung eines molekularen Rezeptors. Die Ergebnisse werden als 17 α -Ethinyl-Estradiol-Äquivalente angegeben. Es wurden jeweils drei unabhängige Versuchswiederho-

lungen mit vier technischen Replikaten pro Test durchgeführt. Signifikante Unterschiede zur Kontrolle wurden mittels eines einseitigen t-Tests ($p < 0,05$) mit SPSS Statistics Version 20 berechnet. Eine sigmoide Kurvenanpassung (Boltzmann) wurde im Programm Origin erstellt, um den EC_{50} -Wert zu bestimmen.

Als mehrzelliger Modelorganismus wurde der Nematode (*C. elegans*) gewählt. *C. elegans* stellt ein Bindeglied zwischen ökotoxikologischer und biomedizinischer Risikobewertung dar, da der Nematode in verschiedensten Ökosystemen eine trophische Schlüsselstellung besetzt und eine hohe genetische Übereinstimmung mit dem Menschen vorliegt. Für den Nematoden liegt ein standardisiertes Verfahren zur Untersuchung von Sedimenten und Böden vor (ISO 10872), welches auf die Anwendung mit Partikelsuspensionen angepasst wurde. Es wurde nur der Endpunkt Reproduktion bewertet. Die Feinstäube wurden in den Konzentrationen 1-1000 mg/L in jeweils fünf internen Replikaten eingesetzt. Der Test wurde pro Feinstaub dreimal durchgeführt ($n = 150$). Zur Untersuchung der molekularen Wirkmechanismen wurde in Anlehnung an die Literatur und den Standardtest eine geeignete Methode für die Testung von Feinstäuben entwickelt. Mit einer Auswahl von Biomarkern sollten spezifische molekulare Wirkmechanismen bestimmt werden. Mittels quantitativer Echtzeit-PCR wurde die Expressionsstärke von Biomarkern auf mRNA-Ebene ermittelt. Biomarker stellen Gene dar, deren Induktion die Aktivierung einer bestimmten molekularen Reaktionskette anzeigt. Als Hauptakteure im Fremdstoffmetabolismus wurden *cyp35 C1*, als Indikator für die PAK-Verfügbarkeit und *sod-3*, als Indikator für oxidativen Stress ausgewählt. Für die statistische Auswertung der Tests mit *C. elegans* wurde das Programm SPSS Statistics Version 20 verwendet. Die Ergebnisse wurden mittels One-way ANOVA und Bonferroni posthoc-Test auf statistisch signifikante Effekte überprüft, $p \leq 0,05$.

Abschließend wurde mittels SPSS Statistics Version 20 eine Hauptkomponentenanalyse mit den gesammelten Daten durchgeführt. Diese sollte ursächliche Beziehungen zwischen chemischen Eigenschaften und den toxikologischen Effekten bzw. redundante Überschneidungen zwischen den toxikologischen Daten aufzeigen. Mit einer Hauptkomponentenanalyse werden die zugrunde liegenden Komponenten bestimmt, welche die Korrelationsmuster innerhalb eines Satzes von Messvariablen erklären. Durch eine Rotation des Systems – hier Varimax – wird eine maximale Zuordnung der Variablen zu den errechneten Komponenten erreicht.

Ergebnisse und Diskussion

Mit der Testkombination wurden exemplarisch sieben lose Staubproben aus verschiedenen Verbrennungen direkt in Suspension untersucht. Die Versuche haben übereinstimmend gezeigt, dass auch Feinstäube bei vollständiger Verbrennung potentiell toxisch sind und dabei am Feinstaub angelagerte Schadstoffe wie PAK teilweise sehr gut bioverfügbar sind.

Beim BKT zeigte sich statistisch ein klarer Zusammenhang zwischen der Salzkonzentration der Feinstäube und der Bakteriotoxizität. Neben der Gesamtkonzentration an Salzen könnten auch Kombinationswirkungen mit Schwermetallen oder organischen Schadstoffen eine Rolle spielen. Im Umu-Test könnte der C-Gehalt Einfluss auf die Bioverfügbarkeit von PAK und anderen bislang nicht identifizierten Heterozyklen haben. So zeigte sich trotz geringem PAK-Gehalt eine leichte Genotoxizität in den entsprechenden Proben. Beim genotoxischen Feinstaub könnte die Konzentration an PAK so hoch sein, dass einige PAK-Moleküle bioverfügbar waren, da der Kohlenstoffgehalt nicht ausreicht, um alle PAK zu

binden. Gleiches könnte auch für bisher nicht analysierte Verbindungen gelten, wie beispielsweise Nitroaromaten. Die Tabelle 3 zeigt die Wirkungen der Feinstäube in den mikrobiellen Toxizitätstests ohne den YES-Test auf Östrogenität, der bei diesen Proben kein signifikantes Resultat ergab. Dennoch ist dieser Effekt zu beachten, da in weiteren Analysen dieser Effekt auftrat.

Tabelle 3: Übersicht über die Ergebnisse der mikrobiellen Biotests. (Ja/nein sagt aus, ob statistische signifikante Effekte bestimmt wurden)

Probe Nr.	Umu-Test						Bakterien-Kontakttest		
	Zytotoxizität	Feinstaubkonzentration: 5-667 mg/L					Feinstaubkonzentration: 0.031-400 mg/L		
		LOEC [mg/L]	Genotoxizität	S9-Mix	LOEC [mg/L] ohne S9	LOEC [mg/L] mit S9	Zytotoxizität	LOEC [mg/L]	EC50 [mg/L]
#2	ja	667	ja	ja	nein	333	nein	nein	nein
#5	nein	nein	ja		667	667	ja	25.00	153.00
#6	nein	nein	ja	ja	nein	667	nein	nein	nein
#7	ja	83	nein	nein	nein	nein	ja	0.06	239.16
#8	ja	333	nein	nein	nein	nein	ja	0.06	148.91
#9	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	< 0.031	96.62
#10	ja	10	nein	nein	nein	nein	ja	< 0.031	133.66

Die Ergebnisse des Nematodentests nach ISO 10782 zeigten in Ergänzung zu den mikrobiellen Biotests eine signifikante Hemmung der Reproduktion auf die Feinstaubproben, die spezifische und unspezifische Wirkungen in ihrer Gesamtheit darstellen (Tabelle 4). Bei zwei Proben #8 und #10 zeigte sich dabei eine umgekehrte Dosis-Wirkungsbeziehung, d.h., der Effekt sank mit steigender Konzentration. Dieses Ergebnis deutet daraufhin, dass eine dosisabhängige Wechselwirkung zwischen zwei oder mehreren Bestandteilen des Feinstaubstaubs besteht, die die Toxizität in höheren Konzentrationen mindert. Die Minderung besteht möglicherweise in der Herabsetzung der Bioverfügbarkeit durch die Adsorption der Schadstoffe an Rußpartikel. Anhand der chemischen Analysen konnten statistisch keine verantwortlichen Substanzen identifiziert werden. Auch die Ergebnisse der Genexpressionsuntersuchungen ergaben keine direkte Korrelation zu einzelnen Parametern. Die Resultate untermauern die allgemeine Erkenntnis, dass chemische und toxikologische Analysen von komplex zusammen gesetzten Feinstäuben notwendige Ergänzungen darstellen. Weitere Untersuchungen deuteten darauf hin, dass z.B. die Partikelgröße einen kombinatorischen Einfluss auf die Verfügbarkeit und Wirkung von Schadstoffen im Organismus hat.

In dem mikrobiellen Test zur allgemeinen Zytotoxizität war häufiger eine Reaktion zu messen als in den Tests zur spezifischen Wirkung, was den Erwartungen entspricht. Die chronischen Effekte der Feinstäube auf die Reproduktion der Nematoden dagegen sind nicht sensitiver als spezifische Reaktionen auf der Ebene der Genexpressionen.

Die Faktorladungen geben mit Werten von 0,0-1,0 ein Maß für die Korrelation der Variablen zu der ihnen zugeordneten Komponente an. Die Vorzeichen geben dabei keine Aussage, da die Daten zuvor nicht normalisiert wurden. Der Nematodentest, Umu-Test und die Expressionsstärke von cyp35 C1 bilden zusammen mit den Kohlenstoffwerten die erste Komponente. Die Genexpression von cyp35 C1 ist als Folge einer Entgiftung von PAK oder ähnlichen organischen Fremdstoffen zu interpretieren. Dies deutet auf eine hohe Abhängigkeit dieser Variablen hin und bestätigt die Vermutungen, dass die Ergebnisse in diesen Biotests stark von den Sorptionseigenschaften der organischen Schadstoffe an Kohlenstoffpartikeln bedingt werden. Der Bakterienkontakttest und die Expressionsstärke von sod-3 weisen auf oxidativen Stress als ähnliche Wirkmechanismen hin und wurden erwartungsgemäß in einer Komponente mit dem Salzgehalt eingeordnet. In einer dritten Komponente wurde dem Bakterienkontakttest außerdem eine Abhängigkeit von PAK und Metallen zugeordnet. Da die Komponenten entsprechend ihrer Rangordnung extrahiert werden, wurden die Sorptionseigenschaften der Partikel als wichtigste Einflussgröße bestätigt. Weitere Faktoren müssen in folgenden Untersuchungen genauer charakterisiert werden.

Fazit

Die Untersuchungen zeigten, dass mit dem ausgewählten Testset eine detaillierte und zugleich schnelle und kostengünstige Toxizitätsbewertung von Feinstäuben möglich ist. Die Zusammensetzung der Kombination aus Toxizitätstests auf unspezifische und spezifische Wirkungserfassung war sinnvoll und entspricht den Erfahrungen aus anderen Umweltbereichen. Toxizität als Stoffeigenschaft konnte sehr gut mit alternativen Methoden zu Tierversuchen abgebildet werden. Die mikrobiellen Toxizitätstests sind standardisiert und wurden für die direkte Testung von Feinstäuben modifiziert.

Die Auswertung der Versuche zeigte darüber hinaus, dass die Bioverfügbarkeit der Schadstoffe ein wesentlicher Aspekt bei der ökotoxikologischen Bewertung partikelgebundener Kontaminanten ist, da sie Schadwirkungen erst ermöglicht. Entgegen der allgemeinen Erwartung, zeigten die hier durchgeführten Versuche, dass auch Feinstäube aus vollständiger Verbrennung ein toxikologisches Potential besitzen, da die geringere Schadstoffkonzentration aber wesentlich besser biologisch verfügbar ist. Bioverfügbarkeit ist jedoch nur für einen Teilbereich der anthropogenen Feinstaubbelastung und nur in einfachen Systemen wissenschaftlich ausreichend erfasst. In der realen Atmosphäre aber sind wichtige Veränderungen der Bioverfügbarkeit von Schadstoffen nur unvollständig bekannt. Hier besteht besonders vor dem Hintergrund notwendiger regulatorischer Maßnahmen zur Erreichung und Erhaltung einer guten Luftqualität dringender Forschungs- und Handlungsbedarf.

Die Datenlage weist darüber hinaus auf bisher unbekannte Substanzen hin, deren Einfluss auf die Toxizität der Feinstäube in weiteren Untersuchungen geklärt werden sollte. Die Testkombination konnte somit nach der erfolgreichen Etablierung erste vielversprechende Ergebnisse liefern und steht zur weiteren systematischen Charakterisierung von Feinstäuben zur Verfügung, die sich z.B. nach Holzart und Ofenqualität unterscheiden. Darüber hinaus können auch technische Maßnahmen wie Partikelfilter auf ihre Anwendbarkeit nach toxikologischen Kriterien bewertet werden.

Literatur

- 2000-03 ISO, 13829: Wasserbeschaffenheit. Bestimmung des erbgutverändernden Potentials in Wasser und Abwasser mittels Umu-Test.
- 2002-09 DIN, 38412-48: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L), Teil 48: Arthro-bacter globiformis. Kontakttest für kontaminierte Feststoffe (L 48).
- ISO 10782 2010-06 ISO, 10872: Water quality. Determination of the toxic effect of sedi-ment and soil samples on growth, fertility and reproduction of *Caenorhabditis elegans* (Nematoda).
- Barregard, L., et al. (2006): Experimental Exposure to Wood-Smoke Particles in Healthy Humans: Effects on Markers of Inflammation, Coagulation, and Lipid Peroxidation. In: *Inhalation Toxicology* 18 (2006), S. 845-853.
- Boman, B. C., et al. (2003): Adverse health effects from ambient air pollution in relation to residential wood combustion in modern society. In: *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 29 (2003), S. 251-260.
- Boone, P. M. (1989): The Genotoxic Contribution of Wood Smoke to Indoor Respirable Suspended Particles. In: *Environment International* 15 (1989), S. 361-368 .
- Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung, 2011. URL: www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_ee_zahlen_bf.pdf (Stand: 23.09.2012)
- Danielsen, P. H. , et al. (2009): Oxidative damage to DNA and repair induced by Norwegian wood smoke particles in human A549 and THP-1 cell lines. In: *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 674 (2009), S. 116-122.
- Donaldson, K. , et al. 2001: Ambient Particle Inhalation and the Cardiovascular System: Potential Mechanisms. In: *Environmental Health Perspective* 109 (2001), S. 523-527.
- Ekici, A. , et al. (2005): Obstructive airway diseases in women exposed to biomass smoke. In: *Environmental Research* 99 (2005), S. 93-98.
- Fretwurst, S. , Ahlf, W. (1996): Modifikation des umu-Testes zum Nachweis genotoxischer und cytotoxischer Wirkungen von feststoffassoziierten Umweltchemikalien. In: *Vom Wasser* 86 (1996), S. 353-361.
- Ghio, A. J. , et al. (2012): Exposure to wood smoke particles produces inflammation in healthy volunteers. In: *Occupational and Environmental Medicine* 69 (2012), S. 170-175.
- Heise, S.; Ahlf, W. A. (2005): New Microbial Contact Assay for Marine Sediments. In: *Soils & Sediments* 5 (2005), S. 9-15.
- Jalava, P. I. , et al. (2007): Heterogeneities in Inflammatory and Cytotoxic Responses of RAW 264.7 Macrophage Cell Line to Urban Air Coarse, Fine, and Ultrafine Particles from Six European Sampling Campaigns From Six European Sampling Campaigns. In: *Inhalation Toxicology* 19 (2007), S. 213-225.

Johnsen, A.R; Karlson, U. (2007): Diffuse PAH contamination of surface soils: environmental occurrence, bioavailability, and microbial degradation. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 76 (2007), S. 533-543.

McDonnell, D. P. , et al. (1991a): In Situ Distinction between Steroid Receptor Binding and Transactivation at a Target Gene. In: *Molecular and Cellular Biology* 11 (1991), S. 4350-4355.

McDonnell, D. P. , et al. (1991b): High Level Expression of Biologically Active Estrogen Receptor in *Saccharomyces Cerevisiae*. In: *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 39 (1991), S. 291-297.

Naeher, L. P., et al. (2007): Woodsmoke Health Effects: A Review. In: *Inhalation Toxicology* 19 (2007), S. 315-320.

Ohlström, M. O. , et al. (2000): Fine-particle emissions of energy production in Finland. In: *Atmospheric Environment* 34 (2000), Nr. 22, S. 3701-3711.

Park, M. S. , et al. (2004): Assessment of oxidative stress in lungs from sheep after inhalation of wood smoke. In: *Toxicology* 195 (2004), S. 97-112.

Pope, C. A. , et al. (2002): Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. In: *Journal of the American Medical Association* 287 (2002), S. 1132-1141.

Pope, C. A.; Dockery, D. W. (2006): Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. In: *Journal of the Air & Waste Management Association* 56 (2006), S. 709-742.

Talley, J. W. , et al. (2002): Particle-Scale Understanding of Bioavailability of PAHs in Sediment. In: *Environmental Science & Technology* 36 (2002), S. 477-483.

US Today (2011): More homes heat with wood, raising pollution risks. URL: www.usatoday.com/money/industries/energy/story/2011-11-10/woodstoves-regulations-heating-pollution/51160192/1 (Stand: 23:09.2012)

Entfernung von Nährstoffüberschüssen bei der Vergärung stickstoffreicher Substrate

Ute Bauermeister¹, Thomas Meier²

¹GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH

²SSM - Technology, Nauen

Adresse: GNS - Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH, Halle (Saale), Weinbergweg 23, 06120 Halle/Saale

¹E-Mail: u.bauermeister@gns-halle.de

Abstract

Die Gewinnung von Nährstoffen in konzentrierter, transportwürdiger Form und Schaffung emissionsarmer geschlossener Nährstoffkreisläufe ist ein wichtiger Grund, um Gärprodukte aus Biogasanlagen aufzubereiten. Ein weiterer ist die Beseitigung von Hemmungen im Fermenter durch Ammoniak bei Einsatz besonders stickstoffreicher und gleichzeitig feststoffreicher Substrate. In der Praxis wird das flüssige Gärprodukt zum Anmischen der Feststoffe zurückgeführt. Dadurch kann es zu einer erheblichen Anreicherung des Ammoniumstickstoffs im Fermenter und somit zu einer Ammoniakhemmung kommen. Notwendig ist daher die Schaffung einer Nährstoffsinke, vorrangig für Ammoniumstickstoff (NH₄-N).

Mit dem speziell für die Gärreste entwickelten ANAStrip®-Verfahren können aus der flüssigen Phase die Nährstoffe N, aber auch P und (anteilig) K abgereichert werden. Grobe Feststoffe werden zuvor abgetrennt. Durch anschließende Rückführung der feststoffseparierten und nährstoffentfrachteten flüssigen Gärreste als Recyclingwasser in den Fermenter, wird der NH₄-N-Gehalt soweit abgesenkt, dass Hemmungen vermieden werden. Damit können mehr stickstoffreiche Substrate vergoren werden. Gleichzeitig werden verkaufsfähige mineralische und organische Dünger produziert, die transportwürdig sind. Damit ist auch ein Export überschüssiger Nährstoffe insbesondere aus Regionen möglich, in denen zu viele Nährstoffe aus flüssigen Gärprodukten auf die Felder gelangen und zu Umweltbelastungen führen. Am Beispiel von Laboruntersuchungen und großtechnischen Anlagen werden bisherige Erfahrungen mit dem Verfahren vorgestellt.

Schlagwörter: Biogas, Vergärung, stickstoffreiche Substrate, Nährstoffüberschüsse, Gärrestbehandlung, Nährstoffsinke

Vorstellung des ANAStrip®-Verfahrens und dessen Wirkung als Nährstoffsenke

Das patentierte ANAStrip®-Verfahren ist ein modifiziertes Ammoniak-Stripppverfahren und zeichnet sich durch ein an die Eigenschaften der Gärreste angepasstes Verfahrenskonzept und milde Systembedingungen (leichter Unterdruck, 50 bis 85 °C) aus. Während mit den bekannten Verfahren der Stripppung, Verdampfung oder auch der Ultrafiltration/ Umkehrosmose oft ein hoher Betriebsmitteleinsatz u.a. an Laugen, Säuren oder Strom zu verzeichnen ist, arbeitet das ANAStrip®-Verfahren ohne Chemikalien, bei Einsatz von BHKW-Abwärme und einem internen Kreislaufgas. Zur Bindung des Ammoniaks wird außerdem REA-Gips aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken anstelle der üblichen Schwefelsäure verwendet. Damit wird gleichzeitig entweichendes Kohlendioxid gebunden. Somit entstehen eine konzentrierte Ammoniumsulfat-Lösung und ein fester Kalkdünger. Die Nutzung von BHKW-Abwärme (standardmäßig 120 kWh/m³) kann durch Verfahrensmodifikationen sowie Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung auf bis zu 35 kWh/m³ (netto) reduziert und an die jeweilige Aufgabe angepasst werden.

Mit diesem Verfahren wird der Ammoniumstickstoff zu 70-95 % aus den Gärresten entfernt. Das prinzipielle Verfahrensschema, hier für zwei Stripppbehälter, ist in Abbildung 1 vorgestellt (vgl. auch Bauermeister et al. 2009).

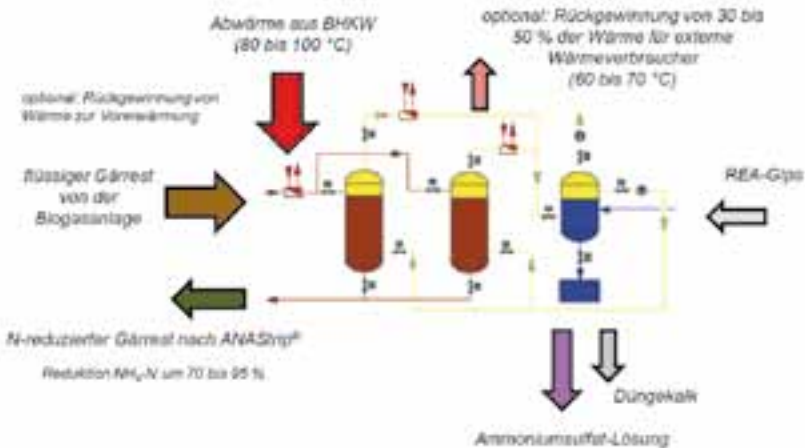


Abbildung 1: Prinzipschema des ANAStrip®-Verfahrens System GNS als Beispiel für ein System mit zwei Stripppbehältern.

In den Prozess kann auch eine Phosphatfällung und eine anteilige Kaliumfällung integriert werden, ohne dass es zusätzlicher als im Prozess bereits erzeugter oder genutzter Stoffe bedarf. Während der lösliche Phosphor (o-Phosphat) überwiegend gefällt bzw. am Feststoff gebunden abgetrennt werden kann, ist beim Kalium nur eine Begrenzung der Konzentration auf ca. 1 Ma.-% möglich. Die Fällprodukte werden mit der Abtrennung der festen Gärprodukte aus dem Prozess ausgetragen, womit weitere Nährstoffsinken für den Prozess erreicht werden.

In mehrmonatigen Versuchen im quasikontinuierlichen Laborfermenter mit Recycling der stickstoffreduzierten Gärreste konnte bisher keine Anreicherung des Kaliumgehaltes auf 1 % beobachtet werden. Es wurden maximal Werte von 5 g/kg Kalium gemessen. Um zu testen, ob eine höhere Kaliumkonzentration zu einer Hemmung des Abbaus führt, wurden in Batchtests zusätzlich Kaliumsalze zugegeben und die Biogaserzeugung bei 0,8 g/kg (ohne Zugabe), bei 5 und bei 10 g/kg Kaliumgehalt gemessen. Nach anfänglicher Hemmung des Abbaus durch den Zusatz an Kaliumsalzen wurde für den Gärtest mit 10 g/kg Kalium der gleiche Methanertrag wie für 0,8 g/kg Kalium erreicht, der Gärtest mit 5 g/l Kalium lag sogar darüber. Dieser einfache Batch-Gärtest mit Hühnermist zeigt, dass durchaus eine Adaptionfähigkeit der Bakterienpopulationen für hohe Kaliumkonzentrationen bis 10 g/kg besteht (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Biogas- und Methanertrag bei erhöhten Kaliumkonzentrationen nach 35 Tagen (Batchgärtest, mesophil)

Kalium [g/kg]	0,8	5	10
Biogasertrag [l_N/kg oTS]	539	620	476
Methangehalt [%]	54,7	57,5	62,1
Methanertrag [l_N/kg oTS]	295	357	296

Da zur Behandlung der Gärreste keine Laugen oder Säuren eingesetzt werden, wird der Gärrest nicht aufgesalzen und behält die Möglichkeit ein Puffersystem im pH-Bereich 7 bis 8 aufzubauen. Sichtbar wird das u.a. an einer Halbierung der Leitfähigkeit von 20-29 auf 10-15 mS/cm (Bandbreite untersuchter Gärreste). Die Rückführung in den Fermenter ist daher problemlos möglich.

Bei maximalen Temperaturen im Prozess von 85 °C sind als Nebeneffekte eine hygienisierende und eine Aufschlusswirkung zu verzeichnen, was neben der Vermeidung von Ammoniakhemmungen zu einer Steigerung des Biogasertrages führt. Gemessen wurden Steigerungen im quasikontinuierlichen Laborfermenter von 5-15 %, im Einzelfall auch mehr (Bauermeister, Paul, 2010).

Das ANAStrip®-Verfahren wurde 2003 zunächst im Pilotmaßstab an einer kleinen Biogasanlage des Agrarunternehmens Barnstädt getestet. Seitdem wurden umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur kommerziellen Umsetzung, Verfahrensoptimierung und praxisnahen Untersuchung der oben genannten Rückwirkungen des Verfahrens auf den Biogasprozess durchgeführt. Nachfolgend werden die großtechnischen Anlagen und Praxiserfahrungen vorgestellt.

Ergebnisse der ANAStrip®-Anlage der BENAS Biogasanlage

Die ANAStrip®-Anlage zur Behandlung von Gärresten der BENAS Biogasanlage GmbH (Niedersachsen) mit einer installierten Leistung von ca. 5 MW_{el} wurde Ende 2007 errichtet. Das individuelle Planungskonzept wurde unter Nutzung vorhandener Behälter und Aggregate sowie angepasst an die individuellen Bedingungen vor Ort erarbeitet. Die technische Umsetzung erfolgte durch den Anlagenbetreiber selbst. In Abbildung 2 sind die vier Stripperbehälter der Anlage im Außenbereich zu sehen.



Abbildung 2: ANAStrip®-Anlage BENAS, Außenbereich.

An der im vollautomatischen Betrieb arbeitenden ANAStrip®-Anlage wurde die großtechnische Funktionsweise des Verfahrens im Praxisbetrieb belegt. Das Nutzungskonzept bzw. die Fahrweise der Anlage wurde seit 2008 mehrfach den aktuellen Randbedingungen der Biogasanlage angepasst, darunter die Erzeugung eines indirekt einleitfähigen Wassers (Bauermeister et al. 2009). Im Jahr 2011 wurden einige Prozessabläufe an der ANAStrip®-Anlage optimiert und so der Bedienungsaufwand deutlich reduziert.

Die ANAStrip®-Anlage wurde für einen max. Durchsatz von 25 m³/h und einen Wärmeverbrauch von 2,3 MW ausgelegt. Künftig wird jedoch ein größerer Teil des Biogases zu Biomethan aufbereitet und nicht mehr vor Ort in BHKW's zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Damit steht nur noch begrenzt Wärme zur Verfügung. Aktuell wird die Anlage mit einer Durchsatzleistung von 8-10 m³/h an flüssigen, zuvor separierten Gärresten und einer Abwärmenutzung von 800 bis 1000 kW betrieben. Es werden täglich ca. 11 t Ammoniumsulfatdünger (5 % N, 6 % S) und 3 t karbonatischer Kalkdünger erzeugt. Die mineralischen Düngerprodukte werden weitgehend zur Deckung des Eigenbedarfs im Anbau z.B. der eingesetzten Maïssilage genutzt, ebenso wie die separierten festen Gärprodukte. Der karbonatische Kalkdünger enthält durch die Restanhaftungen an Ammoniumsulfatlösung noch ca. 2 % N und 3 % S als zusätzliche düngewirksame Bestandteile.

Die flüssigen gestrippten Gärreste werden in die Biogasanlage zurückgegeben, die derzeit überwiegend mit Maissilage und bis zu 50 t/d an Geflügelfestmist beschickt wird. Das sind 24 % Geflügelmist bezogen auf den Substratinput. Durch die Strippping wird der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ im flüssigen Gärrest von 3,8 bis 4,5 g/l auf ca. 0,7 bis 0,9 g/l reduziert. Unter Berücksichtigung der Massenverluste beim Strippen ergibt sich so ein Stripppgrad von 80 bis 85 %. In der Tabelle 2 sind aktuelle Betriebsdaten vom Juni bis September 2012 aufgeführt.

Tabelle 2: Aktuelle Betriebsdaten der ANAStrip®-Anlage von BENAS (2012)

Input		Output	
Zulauf [m^3/d]	192	Ablauf [m^3/d]	ca. 182
$\text{NH}_4\text{-N}$ [g/l]	3,85 bis 4,45	$\text{NH}_4\text{-N}$ [g/l]	0,7 bis 0,85
TS [%]	7,1 bis 7,5	TS [%]	8,3 bis 9
pH	8,1 bis 8,4	pH	8,9 bis 9,6
Leitfähigkeit [mS/cm]	20 bis 22	Leitfähigkeit [mS/cm]	10 bis 13
REA-Gips [t/d]	4 bis 5	Düngeskalk, 76 % TS [t/d]	2,9 bis 3,4
		Ammoniumsulfatlösung, (5 % N, 6 % S) [t/d]	10,5 bis 13

Bereits 2008 wurde erstmals die Rückführung der gestrippten Gärreste in die thermophil betriebene Biogasanlage nach einer Gärhemmung bei $> 5 \text{ g/l NH}_4\text{-N}$ durch zu hohe Mengen an stickstoffreichen Substraten an der Anlage erfolgreich getestet (Bauermeister/Paul 2010). Während der Änderungen an der ANAStrip®-Anlage 2011 war der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt in der Biogasanlage wiederum auf Werte $> 5 \text{ g/l NH}_4\text{-N}$ angestiegen, verbunden mit einem massiven Anstieg an organischen Säuren, insbesondere der Propionsäure. Die aktuelle Stabilisierung des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes auf 3,8 bis 4,5 g/l und Reduktion der organischen Säuren auf ca. 1 g/l zeigt, dass durch die Rückführung der gestrippten, flüssigen Gärreste auch in einer thermophilen Anlage höhere Anteile an Geflügelmist einsetzbar sind.

Realisierung der ANAStrip®-Anlage zur Biogasanlage Röblingen am See

Bereits bei der Planung der 3 MW_{el} -Biogasanlage in Röblingen am See (Sachsen-Anhalt) durch die Firma agri.capital wurde ein speziell angepasstes Konzept zur Aufbereitung der Gärreste entwickelt (Schema s. Abbildung 3). Die Biogasanlage soll jährlich mit ca. 18.000 t Schweinegülle, 20.000 t Rindermist, 23.000 t Maissilage und 8.700 t GPS vom Agrarunternehmen Barnstädt sowie 20.000 t Hühnerfestmist der unmittelbar benachbarten Hähnchenställe der Alfa GmbH beschickt werden. In der ANAStrip®-Anlage erfolgt die Entfernung des Ammoniumstickstoffs zu 80-85 % aus den flüssigen Gärresten, welche zu ca. 70 % als Recyclingwasser in die Biogasanlage zurückgegeben werden. Die verbleibende Menge kann vom Agrarunternehmen auf kleineren Flächen zur Düngung genutzt werden.

Durch den Hühnertrockenkot der benachbarten Hähnchenmast gelangen bis zu 70 % des Stickstoffs in die Biogasanlage. In der ANAStrip®-Anlage kann somit 65 % des Gesamtstickstoffs als $\text{NH}_4\text{-N}$ entfernt und in den mineralischen Düngeprodukten gebunden werden. Der verbleibende, überwiegend organische Stickstoff ist hauptsächlich in dem nährstoffreichen organischen Feststoffdünger aus der Separation enthalten.

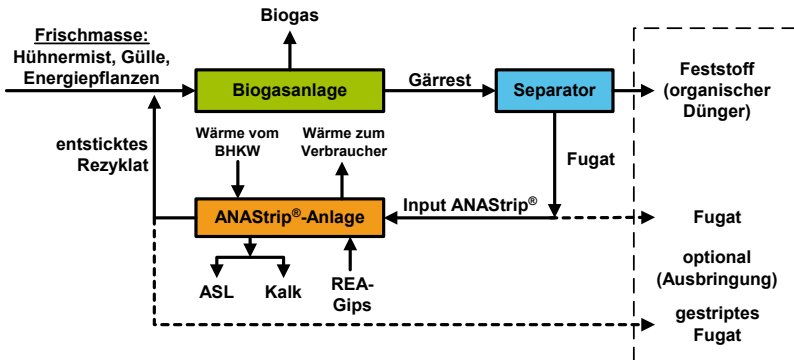


Abbildung 3: Schema der Vernetzung der Biogasanlage mit der Gärrestaufbereitung.

Die Biogasanlage zeichnet sich durch ein vernetztes Konzept der Wärmenutzung bei gleichzeitiger Gaseinspeisung mit Erzeugung von $700 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Biomethan aus. Nur ein Teil des Biogases wird in einem BHKW mit $889 \text{ kW}_{\text{el}}$ Leistung verstromt. Die Wärme wird zur Beheizung der Fermenter und zum Betrieb der ANAStrip®-Anlage (840 kW) genutzt. Durch Wärmerückgewinnung aus der ANAStrip®-Anlage (300 bis 400 kW) kann zusätzlich der benachbarte Hühnermastbetrieb mit Wärme versorgt werden. Bei einem Anlagendurchsatz von $12,6 \text{ t/h}$ beträgt der spezifische Wärmeverbrauch im optimalen Fall nur noch 35 kWh/m^3 (netto). Um dies zu erreichen wurden zusätzliche verfahrenstechnische Anpassungen und Optimierungen vorgenommen. Die konstruktive Umsetzung dieser weiterentwickelten ANAStrip®-Anlage erfolgte durch die Firma AIM Technical Solutions (A) als Partner im Anlagenbau.



Abbildung 4: ANAStrip®-Anlage Röblingen am See.

Nachfolgend sind die Bilanzdaten der Auslegung aufgeführt.

Tabelle 3: Bilanzdaten der ANAStrip®-Anlage der BGA Röblingen

Input		Output	
Zulauf [m ³ /d]	max. 302	Ablauf [m ³ /d]	ca. 280
NH ₄ -N [g/l]	3 bis 6	NH ₄ -N [g/l]	0,5 bis 1,3
REA-Gips [t/d]	5 bis 10	Düngekalk, > 70 % TS [t/d]	4 bis 8
		Ammoniumsulfatlösung, (5 % N, 6 % S) [t/d]	13 bis 27

Die Biogasanlage befindet sich aktuell noch in der Einfahrphase. Die Inbetriebnahme der ANAStrip®-Anlage zur Biogasanlage Röblingen am See (Abbildung 4) erfolgt im Oktober/November 2012, beginnend im Teillastbetrieb. Mit steigendem Mengen- und Wärmeangebot von der Biogasanlage kann der Durchsatz dann auf den Auslegungswert gesteigert werden.

Literatur

Bauermeister, U., Meier, T., Wild, A. (2009): Stickstoffabtrennung mit dem ANAStrip®-Verfahren System GNS. Gülzower Fachgespräche Band 30. Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung - Stand und F&E-Bedarf. Hrsg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2009, S. 78-95, ISBN: 978-3-9803927-5-4.

Bauermeister, U., Paul, A. (2010): Rezyklatwasser: Reduzierung des Risikos von Gärhemmungen. Biogas Journal Nr. 1, 2010, S. 82-805, ISSN: 1619-8913.

Verbesserung der Durchmischung in Biogasreaktoren

Anne Deutschmann*, Dr. Karin Jobst, Annett Lomtscher, Dr. Eberhard Friedrich

Adresse: Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS,
Winterbergstr. 28, 01277 Dresden

*E-Mail: anne.deutschmann@ikts.fraunhofer.de

Abstract

Nur etwa 75 % eines durchschnittlichen Biogasfermenters werden zur Biogaserzeugung genutzt. Als Folge davon werden lokale Raumbelastungen überschritten und im Reaktor bilden sich große Konzentrationsgradienten aus. Dieser unzureichende Durchmischungszustand beeinträchtigt nicht nur die Biogasausbeute. Auch der energetische Aufwand zum Mischen ist meist durch falsch und ineffizient ausgelegte Rührtechnik erhöht.

Problematisch bei der Auslegung von Rührtechnik für Biogasanlagen ist zum einen die komplexe Zusammensetzung der Gärsubstrate. Das nicht-Newtonsche Fließverhalten und der hohe Anteil an Fasern machen schon die rheologische Charakterisierung dieser Substrate zu einer besonderen Herausforderung. Des Weiteren werden rheologische und granulometrische Eigenschaften nur in unzureichendem Maße bei der numerischen Strömungssimulation berücksichtigt.

Aufgrund der Stoffeigenschaften kann rein visuell die Durchmischung von Biogasreaktoren nicht bewertet werden. Aber auch der Einsatz von Tracern und Sonden bringt nur lokal begrenzte Aussagen zum Strömungsverhalten und zur Durchmischung.

Deshalb wurde für diese Versuche die am Fraunhofer IKTS verfügbare Prozess-Tomographie eingesetzt. Diese Technik ermöglicht eine praxisnahe Bewertung und Optimierung von Mischprozessen opaker Systeme. Grundlage dafür sind unterschiedliche Leitfähigkeiten der zu mischenden Stoffsysteme. Die dadurch hervorgerufenen Widerstandsänderungen im Laborreaktor werden räumlich erfasst und spiegeln die Substratverteilung im Reaktor wieder.

Zur Verbesserung der Durchmischung von Biogasreaktoren wurden am Fraunhofer IKTS Untersuchungen zum Einfluss des Rührerschubes bzw. der Rührerdrehzahl durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung des Rührerschubes nicht zwangsläufig zu einer besseren Durchmischung führt. Weiterhin wurde der Einfluss der Substratvorbehandlung bewertet. Durch eine geeignete Substratzerkleinerung konnte die Mischgüte im Reaktor verbessert und der energetische Aufwand zum Mischen gesenkt werden.

Aber auch die Reaktorgeometrie beeinflusst das Mischergebnis wesentlich. Vergleichende Untersuchungen zwischen schlanken und breiten Reaktoren haben gezeigt, dass das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser nicht kleiner als 0,6 gewählt werden sollte.

Schlagwörter: Mischprozess, Prozess-Tomographie, Schwimmschicht, Substratvorbehandlung, Strömungsbewertung/-analyse

Einleitung

Das Kernstück der Biogaserzeugung stellt der Fermenter mit einer an die entsprechenden Inputsubstrate angepassten Rührwerktechnik dar. Im Rahmen einer nachhaltigen Ressourcenschonung ist in dem bestmöglichen Abbau der eingesetzten Rohstoffe infolge einer effizienten Durchmischung der Biogasreaktoren ein wichtiger Schwerpunkt zu sehen. Neben der Verteilung von frischem Substrat und der Ausbildung homogener Milieubedingungen im Reaktor soll die Rührtechnik zur Vermeidung und gegebenenfalls zur Beseitigung von Schwimm- und Sinkschichten dienen. Vor allem aus Sicht der Vermeidung dieser Schichten werden oftmals Rührwerke mit hohem Energieeintrag zur Ausbildung großer Turbulenzen eingesetzt. Neben einem hohen Energieverbrauch beeinträchtigen hohe Energiedissipationen die Effektivität des Biogasprozesses durch ein Zerstören der aktiven Biomasse.

Trotz Fortschritts bei der Bemessung von Rührsystemen mittels numerischer Strömungssimulation werden die an die Mischtechnik gestellten Anforderungen nur teilweise erfüllt. Vor allem bei hochviskosen, nicht-Newtonschen Fluiden führen bisher verwendete Modelle zur Strömungssimulation zu fehlerhaften Auslegungen. Die Ursachen dafür sind einerseits in einer unzureichenden Berücksichtigung der real vorliegenden Eigenschaften der zu vermischenden Stoffsysteme zu sehen. Andererseits sind vor allem bei undurchsichtigen, fasrigen Stoffsystemen (Gärsubstrate) bisher kaum Möglichkeiten zur experimentellen Bewertung des Mischzustandes gegeben. Im Ergebnis dessen ist die Effizienz von Biogasreaktoren oft nur eingeschränkt vorhanden. Neben Toträumen wirken Sink- und Schwimmschichten einer optimalen Biogasbildung entgegen.

Untersuchungen am Fraunhofer IKTS zum Einsatz eines neu am Markt befindlichen Messsystems, der Prozess-Tomografie haben gezeigt, dass mit diesem Messsystem Misch- und Strömungsprozesse von opaken, fasrigen Mehrphasensystemen visualisiert und quantifiziert werden können. Auf der Basis von Widerstandsänderungen infolge unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeiten kann beispielsweise auf die im System vorliegende Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Mit dem vorhandenen System können großtechnische Mischprozesse praxisnah nachgestellt und optimiert werden.

Stand der Technik

Die Kenntnis hinsichtlich des Einsatzes geeigneter Rührwerktechnik in Biogasfermentern weist in der Praxis oftmals Defizite auf. Informationen bezüglich der Wirtschaftlichkeit (Investitionskosten, Betriebskosten, Energieverbrauch) sowie der Verfügbarkeit (Störanfälligkeit, Wartung) der entsprechenden Rührwerktechnik können in der Regel problemlos erhoben werden. Angaben zur verfahrenstechnischen Eignung, beispielsweise gemessen an der Erfüllung der Mischaufgabe und deren Einfluss auf den erzielbaren Biogasertrag, sind dagegen schwieriger abzuschätzen, zumal auch in der Literatur nur grobe Orientierungsdaten für die Auswahl geeigneter Rührwerke genannt werden. Gärrest wird von Burkhalter (2006) als das am schwierigsten zu vermischende Medium bezeichnet.

Für niedrigviskose und Newtonsche Fluide stehen dem Ingenieur eine ganze Reihe von Methoden zur Charakterisierung und Auslegung von Einrührsystemen zur Verfügung (Schmalzriedt 2001). Die Anwendung der numerischen Strömungssimulation mit den entwickelten Turbulenzmodellen liefert eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und

Praxis und kann für die Auslegung von niedrigviskosen und Newtonschen Fluiden uneingeschränkt genutzt werden (Heiser et. al. 2007). Nachteil der genannten Modelle ist es, dass einerseits der Einfluss der Mehrphasenströmungen vernachlässigt wird. Besonders bei hochkonzentrierten polydispersen Substraten ist der Einfluss veränderlicher Fließeigenschaften zu beachten.

Die von Prechtel (2005) für verschiedene Mischsysteme vorgenommene Bewertung der Mischgüter in Biogasreaktoren zeigt qualitativ die Ausbildung von Totzonen und Kurzschlussströmungen. Bei den durchgeführten Simulationsrechnungen wurde das Gärsubstrat durch ein Newtonsches Fluid mit einer Viskosität von 100 mPa s angenommen. Untersuchungen am Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Fraunhofer Umsicht 2009) zur Strömungs- und Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen zeigen, dass vor allem im oberen Bereich des Fermenters eine ungenügende Durchmischung auftritt. Die Untersuchungen wurden an einem Reaktor mit dem Schlankheitsgrad von 1,3 unter Nutzung eines dreistufigen Zentralrührwerkes durchgeführt. Die Simulationsrechnungen basierten auf der Annahme, dass eine einphasige Strömung mit konstanten und Newtonschen Stoffeigenschaften (100 bzw. 700 mPa s) vorliegt. Ähnlich gingen Casatrelli et. al (2006) vor. Für die durchgeführten Simulationsrechnungen wurde eine konstante Viskosität von 750 mPa s angesetzt. Unter dieser Annahme wurden die Berechnungen zur Optimierung der Geometrie von Propellerrührern genutzt. Obwohl schon lange bekannt ist, dass biologische Suspensionen ein nicht-Newtonsches Fließverhalten aufweisen, werden teilweise bis heute entsprechende Vereinfachungen vor allem bei der numerischen Simulation von Mischprozessen vorgenommen. Einerseits bereitet schon die messtechnische Erfassung der Viskosität von hochkonzentrierten faserigen Suspensionen Schwierigkeiten. In der Literatur sind daher oft Hinweise zu finden, dass vor Bestimmung der Viskosität der Faseranteil in Gärsubstraten abgetrennt wurde (Fraunhofer Umsicht 2009). Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass das Abtrennen von Partikeln > 1 mm aus Gärresten eine Verringerung des Konsistenzfaktors der nach dem Potenzansatz von Ostwald de Wale beschreibbaren Substrate bis zu 75 % mit sich brachte (Fraunhofer IKTS 2010).

Trotz der gezeigten Fortschritte bei der Entwicklung von Modellen zur numerischen Strömungssimulation erfordert die sichere Auslegung von Rührsystemen für hochviskose und nicht-Newtonsche Medien zurzeit immer noch die Durchführung aufwendiger experimenteller Untersuchungen wie beispielsweise zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern im Reaktor. Zu den bisherigen Methoden zur messtechnischen Bewertung von Strömungsprozessen gehören die Laser-Doppler-Anemometrie und der Einsatz von Sonden. Erschwerend kommt für die hier betrachtete Anwendung der Biogaserzeugung hinzu, dass infolge der vorliegenden Stoffeigenschaften von faserigen Gärsubstraten auch die experimentelle Bestimmung relevanter Messdaten nur begrenzt möglich ist. Die von Fraunhofer Umsicht (2009) durchgeführten Untersuchungen mit einem Flügelradanemometer haben gezeigt, dass der hohe Feststoffanteil im Substrat des Biogasfermenters sehr schnell zu einer Blockierung des Flügelrades führt. Unter Beachtung der in Biogasfermentern vorliegenden Bedingungen wurde von Fraunhofer Umsicht (2009) ein als Kanalrad bezeichnetes Messgerät entwickelt, das tangentiale und radiale Strömungsgeschwindigkeiten von faserigen hochkonzentrierten Suspensionen erfasst. Bedingt durch die Konstruktion des Messinstrumentes können die für viele Rührsysteme besonders interessierenden axialen Geschwindigkeiten nicht gemessen werden. Ein weiterer Nachteil derartiger Messsysteme ist, dass nur eine punktuelle Bewertung des Reaktorinhaltes möglich

wird bzw. ein nicht zu vertretender Messaufwand Aussagen zur Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor liefert.

Die zwingende Notwendigkeit zur Vertiefung der Kenntnisse über das Mischverhalten von Biogasreaktoren zeigen beispielsweise Untersuchungen von Rostalski (2009). Er beobachtete, dass durch Austausch von schnell laufenden Rührwerken durch langsam laufende eine Effizienzsteigerung der Biogasanlage erzielt werden kann. Neben Einsparungen an Inputstoffen um 17 % verringerte sich der zum Mischen erforderliche energetische Aufwand um circa 40 %.

Bewertung von Mischprozessen mittels Prozess-Tomographie

Mittels der am Fraunhofer IKTS etablierten Prozess-Tomographie können Mischvorgänge in opaken Stoffsystemen sowohl visualisiert als auch quantifiziert werden. Im Tomographie-Behälter (Abbildung 1) bildet sich durch die hochfrequente Induktion von Strom ein elektrisches Feld aus, welches durch Leitfähigkeitsunterschiede beeinflusst wird. Diese Widerstandsänderungen werden erfasst und geben die Verteilung der Stoffsysteme wieder.

Gärrest besitzt aufgrund der Vielzahl gelöster Inhaltsstoffe eine relativ hohe Leitfähigkeit, wohingegen die Inputstoffe, in Abhängigkeit von Art, Vorbehandlung und Anmischung eine wesentlich geringere Leitfähigkeit aufweisen. Somit besteht die Möglichkeit, Mischprozesse von Praxisanlagen durch geeigneten Scaledown zu bewerten und zu optimieren. Zur Bewertung des Mischprozesses wird wie folgt vorgegangen:

- Charakterisierung des Ausgangszustandes
- Downscaling unter Beachtung der Randbedingungen
- Bewertung des Mischprozesses
- Variation der Randbedingungen mit dem Ziel der Optimierung.

Bei der Charakterisierung des Ausgangszustandes sind die rheologischen Eigenschaften der Gärsubstrate von besonderer Bedeutung. Aufgrund der Faserlänge der Gärsubstrate, ist es erforderlich, diese Partikel bzw. Fasern ebenso zu skalieren. Um dennoch die Vergleichbarkeit zwischen Praxisanlage und Tomographie-System zu sichern, wird diesbezüglich auf konstante Fließeigenschaften geachtet. Unter Berücksichtigung der geometrischen Ähnlichkeit erfolgt auch die Anpassung des Prozess-Tomographie-Systems.

Zur Bewertung des Mischprozesses erfolgen definierte Zugaben von Input-Substrat zum Gärrest. Aufgrund der Leitfähigkeitsunterschiede der Stoffsysteme können mit dem Prozess-Tomographie-System Änderungen im elektrischen Feld detektiert werden. Diese werden beispielweise anhand von Konzentrationsverläufen für die einzelnen Ebenen wiedergegeben. Mit der daraus berechneten Mischgüte kann die Bewertung des Rührprozesses vorgenommen

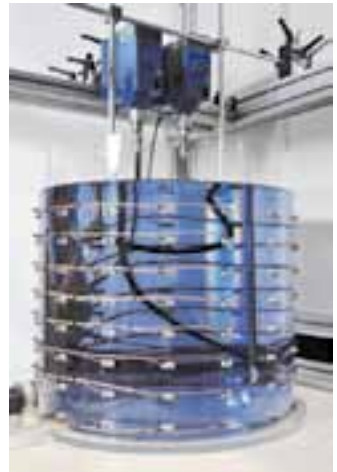


Abbildung 1: Tomographie-Behälter mit Rührtechnik.

werden. Totzonen, Sink- und Schwimmschichten werden detektiert. Parallel zur tomografischen Erfassung des Mischprozesses wird auch Energieeintrag erfasst und anhand von Leistungscharakteristiken bewertet. Des Weiteren können Strömungsprofile erstellt werden.

In Abhängigkeit von den erzielten Ergebnissen werden im Anschluss Maßnahmen zu Optimierung untersucht, denkbar sind: Änderung der Rührerposition, Hinzufügen von Rühraggregaten, Variation des Betriebsregimes, Änderung der Substratvorbehandlung, Veränderung der Reaktorgeometrie.

Ergebnisse tomographischer Untersuchungen als Grundlage für eine großtechnische Optimierung

Einfluss der Rührerschubkraft/ -drehzahl (entstanden in Zusammenarbeit mit der KSB AG)

Um den Einfluss des Rührerschubes auf den Mischprozess zu bewerten, wurde ausgehend von einer Referenzschubkraft der Rührerschub halbiert, bzw. verdoppelt.

Mit Halbierung des Rührerschubes kam es durch die Zugabe zerklüfteter Maissilage zur Ausbildung einer Schwimmschicht (Abbildung 2). Diese wurde nach ca. 2 h manuell eingegrührt, wodurch die Konzentrationsunterschiede zwischen den einzelnen Ebenen ausgeglichen werden konnten. Anhand der gleichmäßigen Verteilung der zugegebenen Volumenkonzentrationen ist zu erkennen, dass es nach Einnischen der Schwimmschicht bis zum Ende des Versuchs kein Aufschwimmen bzw. Absinken des zudosierten Substrates gab. Zum vollständigen Einbringen der Maissilage ist dieser Rührerschub zu gering, für den Betrieb der Anlage allerdings ausreichend. Dies konnte auch anhand der tomografisch visualisierten Durchmischung (Abbildung 3) bestätigt werden. Links, vor dem Einnischen der Schwimmschicht, sind Substratsammlungen im oberen Reaktorbereich (Ebene 1 und 2) deutlich zu erkennen. Wohingegen rechts, nach dem Einnischen der Schwimmschicht, das Substrat gleichmäßig verteilt im Reaktor vorliegt.

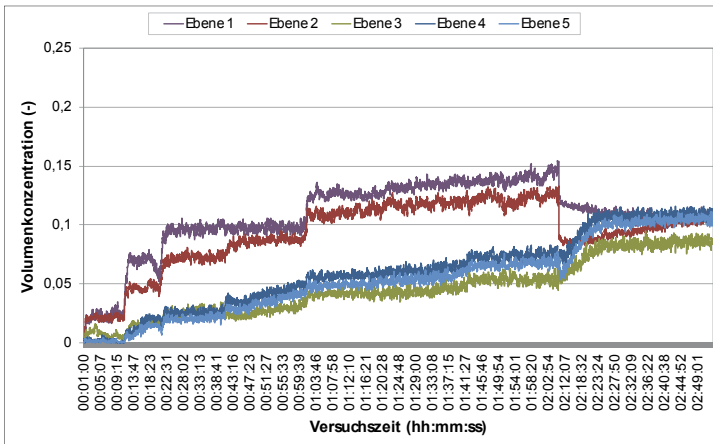


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der Volumenkonzentration bei Halbierung des Rührerschubes.

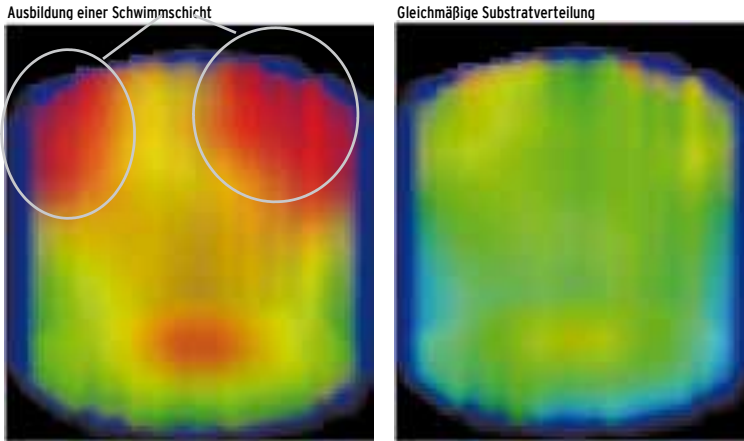


Abbildung 3: Darstellung der Durchmischung im Reaktor nach 1 h 50 min (links) und nach 2 h 50 min (rechts); bezogen auf die in Abbildung 4 dargestellten Volumenkonzentrationen.

Im Vergleich dazu konnte bei Betrieb der Rührer mit der Referenzschubkraft die Maissilage vollständig eingerührt werden (Abbildung 4). Die durch die Beschickung entstandenen Konzentrationsunterschiede konnten im weiteren Versuchsverlauf wieder ausgeglichen werden. Der weitestgehend ähnliche Verlauf der Volumenkonzentrationen weist auf eine gute Verteilung des Substrates im Reaktor hin.

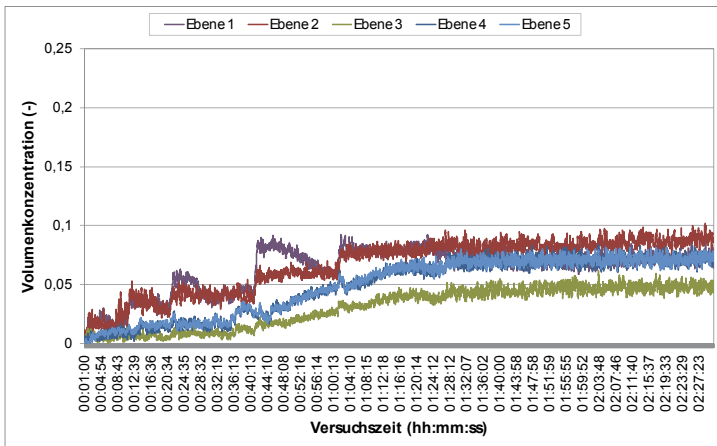


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Volumenkonzentration bei Referenzschubkraft.

Mit Verdopplung der Schubkraft konnte die zudosierte Maissilage schneller eingerührt werden, allerdings zeigte sich für den weiteren Versuchsverlauf ein negativer Effekt (Abbildung 5). Im unteren Bereich des Reaktors (Ebene 4 und 5) kam es zu einer Anreicherung von Substrat, was auf die Ausbildung einer Sinkschicht deutet.

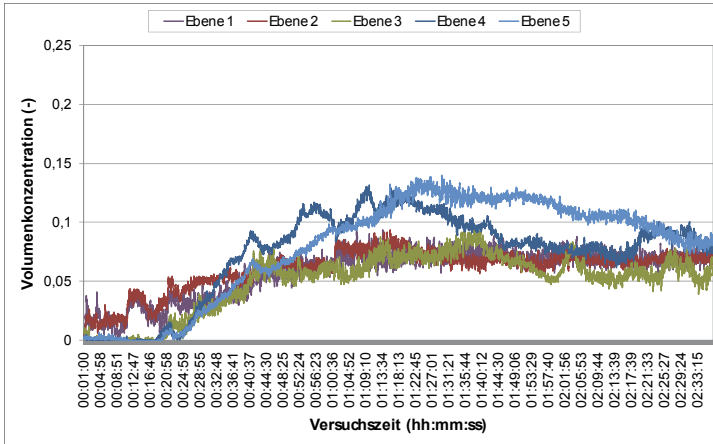


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Volumenkonzentration bei Verdopplung des Rührerschubes.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass mit Erhöhung der Rührerschubkraft, induziert durch eine Erhöhung der Rührerdrehzahl, nicht zwangsläufig eine Verbesserung der Durchmischung hervorgerufen wird. Vielmehr erscheint ein an die Beschickungsintervalle angepasster Betrieb der Rührer sinnvoll.

Einfluss der Substratvorbehandlung auf den Mischprozess

Die Mischgüte und der zum Mischen erforderliche Energieaufwand werden wesentlich durch die Substratvorbehandlung und den daraus resultierenden granulometrischen Zustand des einzumischenden biogenen Substrates beeinflusst. Die durch die Substratzerkleinerung erreichte Verringerung der Widerstandskraft und der Viskosität bewirken verbesserte Stofftransportprozesse. Nähr- und Spurenstoffe werden gleichmäßig im Reaktor verteilt. Weiterhin werden die bei langfasrigen Substraten auftretenden Schwimmschichten vermieden. Abbildung 6 zeigt den Einfluss des Zerkleinerungsgrades von Weizenstroh auf die Mischgüte und die erforderliche Rührerleistung bei Einsatz des Reaktors mit dem Schlankheitsgrad von 1,0. Durchgeführte Betrachtungen zum Gesamtprozess der Biogaserzeugung haben gezeigt, dass trotz erforderlicher Aufwendungen zur Substratvorbehandlung die Effektivität des Gesamtprozesses verbessert wird. Neben einem deutlich reduzierten Energieeinsatz zum Mischen sind die Vorteile einer gesteigerten Biogasausbeute zu nennen.

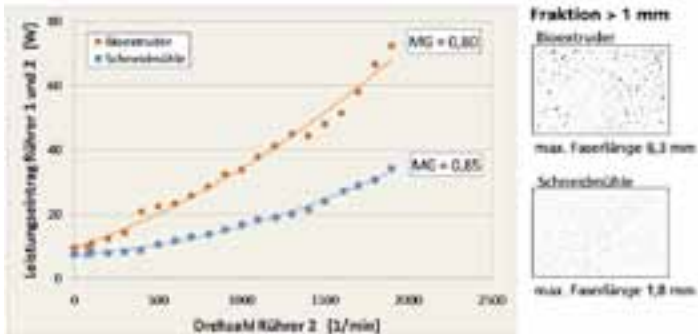


Abbildung 5: Einfluss des Zerkleinerungsgrades (Weizenstroh) auf die Mischgüte (MG) und die Rührerleistung.

Einfluss der Reaktorgeometrie

Unter Berücksichtigung der Reaktorgeometrie großtechnischer Biogasanlagen wurde das Einmischen von zerkleinertem Stroh in Gärrest unter Einsatz von horizontal betriebenen Propellerrührern mittels Prozess-Tomographie bewertet. Entsprechend den vorliegenden geometrischen Verhältnissen zwischen Modell und großtechnischer Anlage werden mit dem zerkleinerten Stroh Partikelgrößen nachgestellt, die mit den auf großtechnischen Biogasanlagen vorhandenen Substraten vergleichbar sind.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das aktiv durchmischte Reaktorvolumen in Biogasanlagen zwischen 60 und 85 % beträgt. Das bedeutet, dass im Mittel nur etwa 75 % des Reaktors zur Biogaserzeugung genutzt wird. Daraus ist abzuleiten, dass die zur Bemessung von Biogasanlagen angesetzten Raumbelastungen in der Praxis überschritten werden, wobei lokal im Reaktor große Unterschiede zu verzeichnen sind. Flüssigphasenübersättigungen und daraus resultierende Beeinträchtigungen der Biogasausbeute sind Folgeerscheinungen eines ungenügenden Mischungszustandes im Reaktor.

Untersuchungen zum Einfluss der Reaktorgeometrie haben gezeigt, dass die in landwirtschaftlichen Biogasanlagen anzutreffenden breiten Reaktoren eine geringere Mischgüte im Vergleich zu Reaktoren mit einem höheren Schlankheitsgrad aufweisen.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse zum Einmischen von zerkleinertem Weizenstroh in einen Reaktor mit dem Schlankheitsgrad von 0,46. Zur Zerkleinerung des Weizenstrohs wurde eine Schneidmühle mit einem Siebboden von 1 mm eingesetzt. Das so entstandene Substrat verkörperte auf circa 7 mm gehäckselte Silage mit einem 10%-igen Anteil an langen Fasern bis zu 100 mm. Als Rührer dienten zwei horizontal betriebene Propellerrührer mit einer Umfangsgeschwindigkeit von je 5 ms^{-1} . Nach 60 min Mischzeit ab erfolgter Substratzugabe wurde eine Mischgüte von 0,76 ermittelt.

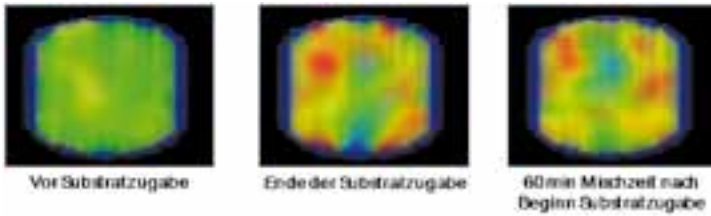


Abbildung 7: Einmischen von zerkleinertem Stroh in einen Reaktor mit dem Schlankheitsgrad 0,46.

Dagegen wurde unter vergleichbaren Bedingungen für den Reaktor mit dem Schlankheitsgrad von 1,0 eine Mischgüte von 0,85 berechnet. Nachteil des schlanken Reaktors war die Ausbildung einer Schwimmschicht. Ursache dafür war die zu tief gewählte Positionierung der Rührer im Zusammenhang mit den, auch nach der Zerkleinerung noch anzutreffenden, relativ langfasrigen Bestandteilen des eingesetzten Strohs. Das Einmischverhalten für diesen Reaktor zeigt Abbildung 8.

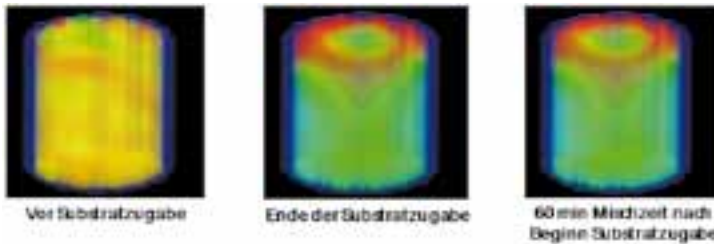


Abbildung 8: Einmischen von zerkleinertem Stroh in einen Reaktor mit dem Schlankheitsgrad 1,0.

Die Mischgüte und der zum Mischen erforderliche Energieaufwand werden wesentlich durch die Substratvorbehandlung und den daraus resultierenden granulometrischen Zustand des einzumischenden biogenen Substrates beeinflusst. Die durch die Substratzerkleinerung erreichte Verringerung der Widerstandskraft und der Viskosität bewirken verbesserte Stofftransportprozesse. Nähr- und Spurenstoffe werden gleichmäßig im Reaktor verteilt. Weiterhin werden die bei langfasrigen Substraten auftretenden Schwimmschichten vermieden. Abbildung 6 zeigt den Einfluss des Zerkleinerungsgrades von Weizenstroh auf die Mischgüte und die erforderliche Rührerleistung bei Einsatz des Reaktors mit dem Schlankheitsgrad von 1,0. Durchgeführte Betrachtungen zum Gesamtprozess der Biogaserzeugung haben gezeigt, dass trotz erforderlicher Aufwendungen zur Substratvorbehandlung die Effektivität des Gesamtprozesses verbessert wird. Neben einem deutlich reduzierten Energieeinsatz zum Mischen sind die Vorteile einer gesteigerten Biogasausbeute zu nennen.

Literaturverzeichnis

- Burkhalter, R. (2006): Das Rühren im Biogasfermenter ist eine Wissenschaft für sich. Die Grüne 2006, Nr. 6, S. 18-19.
- Casatrelli, E.; Waser, R.; Fankhauser, H. (2006): Strömungstechnische Optimierung eines Biomasse-Rührwerkes. Hochschule Luzern, Technik und Architektur, März 2006.
- Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS 2007): Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen mit integrierter Abwasser- und Klärschlammverwertung zur regenerativen Energieerzeugung über BHKW und Brennstoffzelle. Erhöhung der Effizienz der Biogasgewinnung und –Verwertung. Fördernummer SAB: 11424/1797, Dresden 2007.
- Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS 2010): Untersuchungsbericht zur Bewertung der Viskosität von Gärsubstraten. Dresden, 2010.
- Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (Umsicht 2009): Strömungs- und Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen. Förderprojekt Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, Förderkennzeichen: 22015305, Oberhausen, Mai 2009.
- Heiser, M.; et. al (2007): Koaxialrührwerk zum Rühren hochviskoser und nicht-Newtonscher Medien. Chemie Ingenieur Technik 2007 (79), Nr. 7, S. 1029-1034.
- Pauss, A.; Andre, G.; Perrier, M.; Guiot, S. (1990): Liquid-to-Gas Mass Transfer in Anaerobic Processes: Inevitable Transfer Limitations of Methane and Hydrogen in the Biomethanation Process. Applied and Environmental Microbiology 1990 (56), Nr. 6, S. 1636-1644.
- Prechtl, S. (2005): Optimierte Durchmischung von Biogasreaktoren. ATZ Entwicklungszentrum, Sulzbach-Rosenberg, 2005.
- Rostalski, K. (2009): Zusammenhang zwischen Strömungsbildung und Gasertrag in Biogasanlagen. Biogasanwenderforum KSB Halle, 26. November 2009.

Bedarfsangepasste Stromproduktion in Biogasanlagen

Mathieu Brulé*, Rainer Bolduan¹, Rémi Mougé¹, Gerold Göttlicher², Pascal Schlagermann²

*¹EIFER

² EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Adresse: EIFER - Europäisches Institut für Energieforschung

Emmy-Noether-Str. 11, 76131 Karlsruhe

*E-Mail: Rainer.Bolduan@eifer.org

Abstract

Der konstante Betrieb von Biogasanlagen kann bei geringem Strombedarf zu lokalen Überangeboten führen. Im Rahmen einer Studie für EnBW Energie Baden-Württemberg AG und Erdgas Südwest GmbH wird ein dezentrales Konzept für eine nachfrageorientierte Biogasstromproduktion entwickelt. Hierbei werden die Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit der Anpassung der Biogasverstromung an die Tages-Schwankungen eines praxisrelevanten Strombedarfs untersucht.

Als Basis für den Vergleich wird eine landwirtschaftliche Biogasanlage mit einer durchschnittlichen Biogasproduktion von 318 m³/h modelliert, entsprechend einer Durchschnittsleistung von 500 kW_{el}. Hierbei wird der konstante Betrieb (Referenzszenario) mit einem bedarfsangepassten Betrieb (Lastwechsel-Szenario) verglichen. Neben der Ermittlung der Machbarkeit anhand von Laborversuchen erfolgt auch ein wirtschaftlicher Vergleich beider Szenarien: Der zum Erreichen einer Kapitalrendite in zehn Jahren erforderliche Stromgestehungspreis wird für beide Szenarien berechnet.

Dem Referenzszenario liegt eine konstante Stromproduktion mit einem 500 kW_{el}-BHKW zugrunde. Im Lastwechsel-Szenario wird die bedarfsangepasste Biogasverstromung über eine Erhöhung der Gasspeicherkapazität und über die Verwendung von zwei BHKW-Einheiten im Takt-Betrieb gewährleistet.

Für das Lastwechsel-Szenario wird die Biogasnutzung beispielhaft den täglichen Strombedarfsschwankungen eines Winterfeiertags (Haushaltsstrombedarf) angepasst. Die Dimensionierung des kleineren BHKWs berücksichtigt die Notwendigkeit der Deckung des Eigenwärmebedarfs der Fermenter. Der Taktbetrieb ermöglicht drei Leistungsstufen von 168, 490 und 658 kW_{el} für die Anpassung der Stromproduktion an den Strombedarf. Die Gasspeicherkapazität für das Lastwechsel-Szenario wird auf eine Kapazität von 12 h erhöht (gegenüber 2 h beim Referenzszenario).

Der tatsächliche Strombedarf an einem Winterfeiertag konnte nicht vollständig abgedeckt werden. Während sich der niedrige Strombedarf des Lastgangs angleichen lässt, werden die extremen Lastspitzen nicht erreicht. Das angenommene Szenario eines Winterfeiertags stellt jedoch ein seltenes Ereignis mit extremem Strombedarfsverlauf dar.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass die vorgegebene Kapitalrendite im Fall eines kontinuierlichen Betriebs bei einer Strompreisvergütung von 19,5 ct €/kWh_{el} erreicht wird, gegenüber 22 ct €/kWh_{el} für die nachfrageorientierte Biogasstromproduktion (13 %-Erhöhung). Nachteile der schwankenden Wärmeproduktion hinsichtlich des Wärmenut-

zungskonzeptes werden jedoch in dieser Studie nicht betrachtet. Mehrkosten entstehen durch die erhöhte Gasspeicherkapazität, die Verwendung von zwei BHKWs und die erweiterte Prozesssteuerung. Nicht berücksichtigt werden unterschiedliche Tageslastgänge im Jahresverlauf und langfristige, saisonale Strombedarfs-Schwankungen.

Schlagwörter: Biogas, Vergärung, stickstoffreiche Substrate, Nährstoffüberschüsse, Gärrestbehandlung, Nährstoffsinke

Einleitung

Die kontinuierliche Biogasstromspeisung kann bei geringem Strombedarf lokal zu einem Überangebot bzw. zu Speicherproblemen führen. Insbesondere durch den steigenden Anteil der wetterabhängigen Einspeisung von Wind- und Solarstrom können zukünftig starke Schwankungen im Netz entstehen (Fraunhofer IWES, 2010; Schmack Biogas AG, 2011). Daher und im Hinblick auf zukünftige lastorientierte Vergütungsmodelle gewinnt die Frage der Anpassung der produzierten Strommenge an den tatsächlichen Strombedarf immer mehr an Bedeutung. Im Hinblick auf diese Problematik planen die Bundesministerien (BMWi, BMU) neue Gesetze und Förderungen, um die Direktvermarktung des Stroms aus erneuerbaren Energien zu fördern (BMU, 2011a; BMU, 2011b; BMWi, 2010). Das novellierte Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG 2012) sieht einen Flexibilitätsbonus zur Förderung der bedarfsangepassten Stromproduktion aus erneuerbaren Energien vor. Daher und mit Blick auf die Rentabilität einer Biogasanlage gewinnt eine bedarfsorientierte Stromproduktion, d.h. dem tatsächlichen Strombedarf angepasste Produktion, immer mehr an Bedeutung.

Im Rahmen einer Studie für EnBW Energie Baden-Württemberg AG und Erdgas Südwest GmbH wird ein dezentrales Konzept entwickelt, um die Belastung des Stromnetzes in ländlichen Gebieten durch den Ersatz einer konstanten Biogasstromspeisung mit einer bedarfsangepassten Biogasstromproduktion zu reduzieren. Hierbei werden die Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit der Anpassung der Biogasverstromung beispielhaft an die Tagesschwankungen eines praxisrelevanten Strombedarfs bei alleiniger Bedarfsdeckung durch den Biogasanlagenbetrieb untersucht.

Charakterisierung der Modell-Biogasanlage

Durchschnittliche Leistung

Für die Fallstudie wird eine landwirtschaftliche Biogasanlage mit einer durchschnittlichen Biogasproduktion von $318 \text{ m}^3/\text{h}$ modelliert. Dies entspricht einer Durchschnittsleistung von $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ bei 8000 Volllaststunden im Jahr. Der angenommene elektrische Wirkungsgrad beträgt 37 %.

Substrate

Zur Beschickung der Modell-Biogasanlage wird ein Gemisch aus 30 % Rindergülle, 20 % Mais und 50 % Gras verwendet. Die erforderliche Substratmenge entspricht der Nutzung der von 256 Großvieheinheiten anfallenden Rindergülle, sowie der Anbaufläche von 50 ha

Mais und 211 ha Intensiv-Grünland. Die Methanerträge, Frischmasseerträge pro Hektar und Gehalte an organischer Substanz der jeweiligen Substrate werden nach KTBL (2009) berechnet.

Transport

Die Berechnung der Transportentfernung basiert auf folgenden Hypothesen hinsichtlich der Substratdichte: 31 Großvieheinheiten/km², 0,59 ha/km² verfügbarer Mais und 0,26 ha/km² verfügbares Intensiv-Grünland. Die Ermittlung des Bezugsradius ergibt durchschnittliche Transportentfernungen von 2 km für Rindergülle, 5 km für Mais, und 17 km für Gras (Tabelle 1).

Tabelle 1: Charakterisierung des Substratinputs zur Beschickung der Modellbiogasanlage

Substrate	Anteil an Gesamt-Frischmasse	Frischmasse	Kapazität/Fläche	Transportentfernung
Rindergülle	30 %	4608 t/a	256 GV	2 km
Mais	20 %	3072 t/a	50 ha	5 km
Gras	50 %	7681 t/a	211 ha	17 km

Auslegung der Fermenter

Die Vergärungseinheit der Modell-Biogasanlage besteht aus zwei Fermentern (Fermenter und Nachgärer gleicher Größe) und einem Gärrestlager zur sechsmonatigen Speicherung des Gärrests. Zur Dimensionierung von Fermenter und Nachgärer wird eine Substratdichte von 1 m³/t FM und eine Gesamtverweilzeit (Fermenter + Nachgärer) von 150 Tagen angenommen. Dies ergibt eine Lagerkapazität von 3556 m³ für den Fermenter, 3556 m³ für den Nachgärer und 7576 m³ für das Gärrestlager. Daher werden Abmessungen von 16 × 16 m für die Fermenter und 13 × 27 m für das Gärrestlager angenommen.

Anpassung der Modell-Biogasanlage an eine bedarfsorientierte Stromproduktion

Erweiterung der Gasspeicherkapazität

Im Referenzszenario ist zur Gasspeicherung nur der erste Fermenter mit einer Folienhaube abgedeckt. Im Lastwechsel-Szenario wird die zur fluktuierenden Verstromung erforderliche Gasspeicherkapazität durch die zusätzliche Abdeckung des zweiten Fermenters und des Gärrestlagers gewährleistet (Abbildung 1). Dieses Vorgehen stellt eine kostengünstigere Alternative zu dem Bau eines externen Gasspeichers dar. Hierdurch kann die Gasspeicherkapazität von 2h (Referenzszenario) auf 12 h (Lastwechsel-Szenario) erhöht werden.

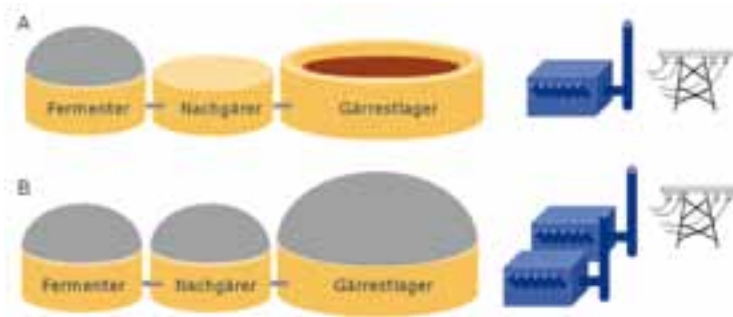


Abbildung 1: Auslegung der Biogasanlage für die konstante Stromerzeugung (A) und die bedarfsorientierte Stromerzeugung (B).

Anpassung der Verstromungseinheit

Um den Vergleich zwischen Referenzszenario und Lastwechsel-Szenario zu vereinfachen, werden in beiden Fällen eine Gasproduktion von $318 \text{ m}^3/\text{h}$, ein elektrischer Wirkungsgrad von 37 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 45 % angenommen (entsprechend $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ -Durchschnittsleistung).

Der Betrieb von BHKWs in Teillast ist aufgrund höheren Verschleißes und deutlich geringeren elektrischen Wirkungsgrades nicht zu empfehlen. Zur Anpassung der Verstromung ist der Taktbetrieb (Ein- und Ausschalten der Motoren) zu bevorzugen (Fraunhofer IWES, 2009, 2010).

Im Referenzszenario erfolgt die konstante Verstromung durch eine $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ -BHKW-Einheit. Im Gegensatz dazu ist beim Lastwechsel-Szenario der Taktbetrieb zweier BHKWs erforderlich. Hierfür wird die Verwendung eines kleineren BHKWs mit $168 \text{ kW}_{\text{el}}$ und eines größeren BHKW mit $490 \text{ kW}_{\text{el}}$ Leistung ermittelt. Die Dimensionierung des kleineren BHKWs berücksichtigt die Notwendigkeit der Deckung des Eigenwärmebedarfs der Fermenter. Die elektrische Leistung des kleineren BHKWs beträgt daher ein Drittel der elektrischen Leistung des größeren BHKWs. Der Taktbetrieb ermöglicht drei Leistungsstufen 168 , 490 und $658 \text{ kW}_{\text{el}}$ für die Anpassung der Stromproduktion an den Strombedarf.

Anpassung der Verstromung an den Tageslastgang

Für das Lastwechsel-Szenario wird die Biogasnutzung beispielhaft an die täglichen Schwankungen des Haushaltsstrombedarfs eines Winterfeiertags (1. Weihnachtstag) angepasst. Dieser stellt einen Extremfall mit sehr hohen Lastspitzen dar. Die Modellanpassung erfolgt für dieses Extremereignis und wird auf das gesamte Jahr übertragen.

In Abbildung 2 wird der Verlauf der Tages-Lastganglinie des Strombedarfs dem der konstanten Stromproduktion gegenübergestellt (A). Die Anpassung der Stromerzeugung an den Lastgang (B) verdeutlicht, dass Zeiten niedrigen Strombedarfs mit dem kleineren BHKW gut angenähert werden können, während extreme Lastspitzen zwischen 10:00 und 14:00 Uhr sowie zwischen 18:00 und 21:00 Uhr auch in Kombination beider BHKWs nicht ausreichend abgedeckt werden können. Die Ermittlung der elektrischen Leistungswerte der BHKWs basiert auf zwei Voraussetzungen:

- Die Durchschnittsleistung für die Tagesstromproduktion beträgt $500 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Die elektrische Leistung des kleineren BHKWs beträgt ein Drittel der des größeren BHKWs.

Durch Integration der stündlichen Leistungsanpassung werden die im vorherigen Absatz genannten Leistungswerte von $168 \text{ kW}_{\text{el}}$ für das kleinere BHKW und $490 \text{ kW}_{\text{el}}$ für das größere BHKW ermittelt.

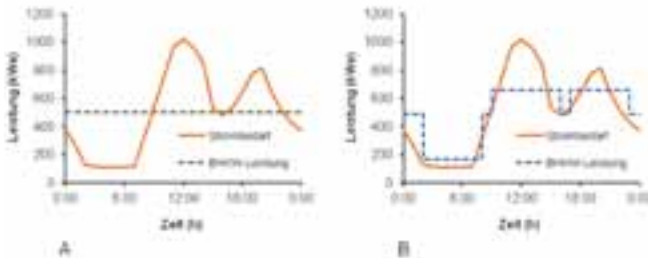


Abbildung 2: Tages-Lastganglinie sowie Verlauf der konstanten und bedarfsangepassten Stromproduktion.

Ermittlung der benötigten Gasspeicherkapazität

Die maximalen Tagesschwankungen der Biogasproduktion einer Biogasanlage im konstanten Betrieb werden auf Basis der Auswertung von Laborversuchen abgeschätzt. Hierzu dienten Versuchsergebnisse der Universität Hohenheim (Preißler 2006) zur Biogaskinetik der Vergärung von Weizenkorn [Raumbelastung von $6 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \times \text{d})$] in Durchflussfermentern bei einmaliger Fütterung pro Tag. Die maximalen Schwankungen belaufen sich auf 25 % der Biogasmenge. Auch hierbei handelt es sich um ein extremes Szenario, weil ein schnell abbaubares Substrat (gequetschtes Weizenkorn) mit hoher Raumbelastung verwendet wird (Abbildung 3). Die Tages-Schwankungen der Biogasproduktion und mögliche Stillstandszeiten des BHKWs werden in der Praxis bei konstantem Betrieb über kleine Gasspeicher gepuffert, die zwischen zwei und sechs Stunden Biogasproduktion vorhalten können (Fraunhofer IWES 2009, 2010). Daher wird im Referenzszenario die Abdeckung von einem einzelnen Fermenter mit einer Folienhaube, entsprechend einer Lagerkapazität von 2 h verwendet.

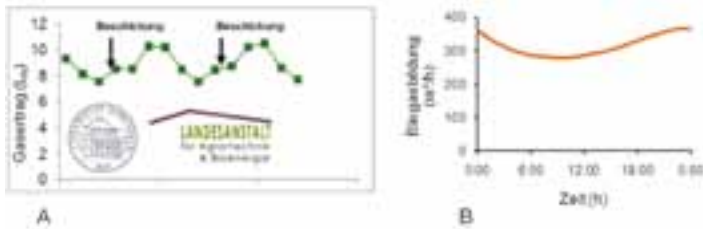


Abbildung 3 Verlauf Biogasproduktion im Laborversuch (A) und entsprechende Modellierung auf Anlagenmaßstab (B).

Durch die Abdeckung von beiden Fermentern und von dem Gärrestlager wird im Lastwechsel-Szenario eine Speicherkapazität von 12 h erreicht. Diese erwies sich als ausreichend. Die für den Tagesverlauf ermittelten Füllstandsmengen im Gasspeicher schwanken bei der bedarfsangepassten Verstromung des produzierten Biogases zwischen knapp 40 und 70 %, und bieten somit eine ausreichende Pufferkapazität.

Anpassung der Prozesskontrolle

Für den Taktbetrieb müssen die BHKW-Einheiten in Abhängigkeit vom Tageslastgang gestartet und heruntergefahren werden. Daher stellt das Lastwechsel-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario deutlich höhere Anforderungen an die Prozesssteuerung (Mess- und Regeltechnik).

Anpassung des Wärmenutzungskonzepts

Im Lastwechsel-Szenario ist der BHKW-Betrieb so vorgesehen, dass ausreichend Wärme zur Deckung des Eigenwärmebedarfs vorhanden ist.

Für beide Szenarien wird der gleiche Wärmepreis von 2 ct €/kWh und die gleiche Wärmemenge angenommen. Der Einfluss der bedarfsangepassten Stromerzeugung auf die externe Wärmenutzung (Wärmenutzungskonzept) wird nicht berücksichtigt, obwohl es sich dabei um einen kritischen Faktor für einen wirtschaftlichen Erfolg von Biogasanlagen handelt. Allgemeingültige Aussagen lassen sich kaum machen, da die Auswirkungen vom Wärmeabnahmeprofil des konkreten Verbrauches abhängen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die bedarfsorientierte Stromerzeugung den Bau eines Wärmespeichers erfordern könnte, ohne den es zu Akzeptanzproblemen des Wärmeabnehmers käme.

Wirtschaftlichkeitsanalyse

Investitionskosten

Die Investitionskosten werden in Form von Kostenfunktionen separat für den Fermenter, den Nachgärer und den restlichen Anlagenbau ermittelt. Skalierende Größe der Kostenfunktionen sind das Nutzvolumen des Fermenters und Nachgärers bzw. die BHKW-Leistung. Die Grundlage für die verwendeten Gleichungen bilden Daten des KTBL (2009) und des Bundesmessprogramms der FNR (2009).

Betriebs- und Wartungskosten

Die Wartungskosten werden ebenfalls basierend auf Fallstudien des FNR-Bundesmessprogramms (2009) in Abhängigkeit von der Anlagengröße ermittelt. Sonstige Betriebskosten, bestehend aus Substratkosten und Transportkosten für Substrat und Gärrest, werden getrennt berücksichtigt. Die Substratpreise bezogen auf die Frischmasse sind wie folgt: Rindergülle 0 €/t, Maissilage 35 €/t, Gras aus Intensiv-Grünland 28 €/t. Dazu kommen Transportkosten von 0,160 €/t × km für Substrat und Gärrest (Fraunhofer UMSICHT 2009). Die Transportentfernung der Substrate und die Substratmenge sind in Tabelle 1 dargestellt. Für den Gärresttransport wird eine durchschnittliche Transportentfernung von 10 km angenommen.

Wärmeverkauf

Zur Ermittlung der Erlöse aus dem Wärmeverkauf wird ein thermischer Wirkungsgrad von 45 % angenommen. 19 % der Gesamtwärmemenge wird genutzt, wobei 41 % für die Fermenterheizung benötigt wird und 39 % unverwertet bleibt. Es wird ein Wärmepreis von 2 ct/kWh angenommen. Hinsichtlich des Wärmeverkaufs wird kein Unterschied zwischen dem Referenzszenario und dem Lastwechsel-Szenario gemacht.

Stromverkauf

Die Stromgestehungskosten werden nicht berechnet, sondern es wird eine willkürliche Annahme getroffen. Da alle anderen Parameter vorab festgesetzt wurden, kann aufgrund dieser willkürlichen Annahme im Modellierungsprogramm die dazugehörige Kapitalrendite berechnet werden. Durch ein Interpolationsverfahren wird der Zielwert von 10 Jahren für die Kapitalrendite ermittelt. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden ausführlicher beschrieben.

Mehrkosten durch die bedarfsangepasste Stromerzeugung (Lastwechsel-Szenario)

Die bedarfsangepasste Stromerzeugung verursacht Mehrkosten gegenüber einem konstanten Betrieb. Als vereinfachende Hypothese für die Berechnung wird angenommen, dass diese Mehrkosten sich nur auf die Investition beziehen, nicht auf den Anlagenbetrieb. Es wird die Annahme getroffen, dass die Anpassung an den Lastwechsel nur einen geringen Einfluss auf die Betriebskosten der Biogasanlage haben sollte. Vor einer Übertra-

gung der Lastwechsel-Technologie auf den Praxismaßstab sind die Betriebskosten jedoch schwer abzuschätzen.

Die zusätzlichen Investitionen (Abbildung 4) für die Anpassung der Biogasanlage an die bedarfsangepasste Stromerzeugung verteilen sich wie folgt: 115 k€ für zusätzliche Gasspeicherkapazität, 209 k€ für den Ersatz eines BHKWs durch zwei BHKWs unterschiedlicher Leistungen und 100 k€ für den Ausbau der Prozesssteuerung und -kontrolle. Somit belaufen sich die Mehrkosten der Investition (und des Lastwechsel-Szenarios, da keine sonstige Kosten berücksichtigt wurden) auf insgesamt 424 k€.

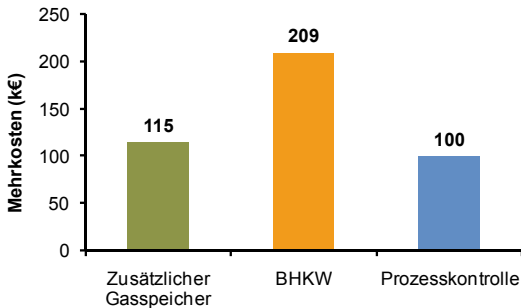


Abbildung 4: Aufteilung der Mehrkosten für die bedarfsangepasste Stromproduktion.

Ermittlung der Stromgestehungspreise beider Szenarien

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse beider Szenarien basiert auf der Ermittlung der Stromgestehungskosten für eine vorgegebene Kapitalrendite von 10 Jahren. Die jährliche Aktualisierung des Cash flows basiert auf folgenden Hypothesen: Abzinsung 8 % und Inflationsrate konstant bei 2 %. Die gesamte Investition für den Bau der Biogasanlagen wird mit einem Kredit-Zinssatz von 10 % beaufschlagt. Die Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass die Vorgabe einer zehnjährigen Kapitalrendite bei einem Stromgestehungspreis von 19,5 ct €/kWh_{el} für die konstante Stromerzeugung (Referenzszenario) bzw. von 22 ct €/kWh_{el} für die bedarfsangepasste Stromerzeugung (Lastwechsel-Szenario) realisiert wird. Dieses entspricht einer 13 %-Erhöhung der Stromgestehungskosten.

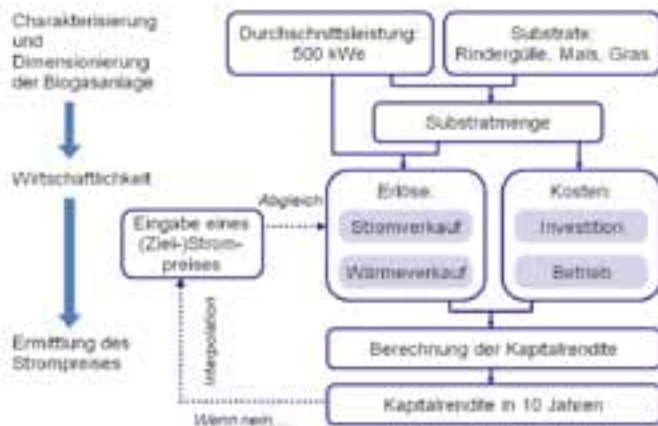


Abbildung 5: Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

Fazit

Wenngleich eine Bedarfsdeckung von extremen Lastspitzen unter den getroffenen Annahmen nicht vollständig erreicht wird, so zeigt die Studie doch, dass ein Lastwechsel zwischen 168 und 658 kW_{el} realisierbar ist. Dies entspricht einer 74 %-Variation der elektrischen Leistung, welche durch eine geringe Erhöhung der Stromgestehungskosten von ca. 13 % erreicht werden kann. Ein Preisunterschied in dieser Größenordnung könnte zukünftig über Flexibilitätsprämien oder andere Mechanismen, wie z.B. Kompensationsmodelle aus Einsparungen in Stromnetzen abgedeckt werden. Betrachtet wird zudem ein Extremfall des Tageslastgangs, so dass die Tagesschwankungen des Strombedarfs im Jahresmittel vermutlich deutlich geringer ausfallen und somit gut abgedeckt werden könnten. Eine Anpassung der Substratmenge bzw. der Reaktionsbedingungen wird in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt. Dieses Vorgehen ist aufgrund der langsamen Kinetik der anaeroben Biologie für den kurzfristigen Lastwechsel nicht anwendbar, könnte jedoch für die Abdeckung von langfristigen, saisonalen Schwankungen, z.B. des Wärmebedarfs, von Bedeutung sein. In einem solchen Szenario könnte z.B. auf eine Reduzierung der Substratzufuhr bzw. einen Substratwechsel zurückgegriffen werden. Die dadurch entstehende geringere Auslastung der Biogasanlage würde höhere Stromgestehungskosten bewirken. Als eine Optimierungsmöglichkeit wäre ein vermehrter Einsatz von schwer abbaubaren preiswerteren Substraten bei Perioden mit geringerer Last möglich. Bei einer geringen Raumbelastung könnte zudem eine erhöhte Biogasproduktion aus schwer abbaubaren Substraten erzielt werden.

Literatur

BMU (2011a): Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien - Vorblatt. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. BMU - KI III 4. 17.05.2011.

BMU (2011b): Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG-Erfahrungsbericht) - Entwurf. Gemäß § 65 EEG vorzulegen dem Deutschen Bundestag durch die Bundesregierung. Stand 03.05.2011.

BMW (2010): Förderung der Direktvermarktung und der bedarfsgerechten Einspeisung von Strom aus Erneuerbaren Energien. r2b research to business energy consulting; CONSenTEC Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH.

EEG 2012. Erneuerbaren-Energien-Gesetz. Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Bundesgesetzblatt Teil I, Nr. 42, S. 1934, 04.08.2011.

FNR (2009): Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow.

Fraunhofer IWES (2009): Technische Potenziale einer variablen Stromeinspeisung durch Biogasanlagen. N. Gerhardt. Bericht. Fraunhofer IWES, Kassel.

Fraunhofer IWES (2010): Die Rolle des Stromes aus Biogas in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen. Endbericht. Bofinger S., Braun M., Costa Gomez C., Daniel-Gromke J., Gerhardt N., Hartmann K., Jentsch M., Kirschner D., Reimann T., Saint-Drenain Y.-M., Schumacher B., Schünemeyer F., Stetz T.

Fraunhofer UMSICHT (2009): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz – Ergebnisse der Markthebung 2007-2008. Wolfgang Urban, Heiko Lohmann, Kai Girod.

KTBL (2009): Faustzahlen Biogas. 2. Auflage. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Damstadt.

Preißler D., Mukengele M., Brulé M., Oechsner H. (2006): Persönliche Mitteilung. Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie. Universität Hohenheim, Stuttgart.

Schmack Biogas AG (2011): Anforderungen an Biogasanlagen zur Erzeugung von Mittellast, Spitzenlast und Regelenergie. Hanna Emanuel. Schmack Biogas AG.

Flexible Biogasproduktion in der Direktvermarktung

H. Fabian Jacobi*, Marcus Trommler, Eric Mauky

Adresse: DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH,
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

*E-Mail: fabian.jacobi@dbfz.de

Abstract

Mit der Zunahme der Stromeinspeisung aus fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen wie Solar- und Windkraft ergibt sich eine zunehmende Notwendigkeit Erzeugungsspitzen und -senken über den flexiblen Betrieb anderer Stromproduzenten auszugleichen. Bioenergie ist die einzige der drei großen erneuerbaren Energiequellen, deren Umwandlung in Strom steuerbar ist. Im Fall von Biogas bedingt ein hoher Flexibilisierungsgrad bei stabiler, konstanter Führung des biologischen Prozesses jedoch den Einsatz großer Gasspeichervolumina für BHKW-Stillstandszeiten. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Flexibilisierung des biologischen Prozesses selbst untersucht, um den Bedarf an notwendigem Gasspeicher gering zu halten. Gleichzeitig sollte dabei eine maximale Flexibilisierung der Energieproduktion bei gleicher Gesamtproduktionsmenge erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Flexibilisierung des Gasproduktionsprozesses bis zu 40 % weniger Gasspeichervolumen benötigt wird und damit signifikante Einsparungen möglich sind.

Schlagwörter: Biogas, Flexible Biogasferzeugung, Direktvermarktung, bedarfsgesteuerte Stromerzeugung, Gasspeicher

Flexible Biogasproduktion in der Direktvermarktung

Mit dem EEG wurde insbesondere seit dem Jahr 2000 der Ausbau von erneuerbaren Energien stark angereizt. Die Förderung erfolgt und erfolgte stets kostenorientiert, um eine technologieoffene Entwicklung der Erneuerbaren zu ermöglichen. Die Kostenorientierung der Vergütung ermöglichte einen starken Ausbau, so dass 2011 erneuerbare Energien mit 20,3 % einen signifikanten Anteil am deutschen Stromverbrauch ausmachten (BMU, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, 2012). Dieser stark wachsende Anteil erneuerbarer Energien im Bereich der Stromversorgung führt schon heute zu Veränderungen in der Preisfindung im Stromhandel. Mittel- und langfristig bedeutet der starke Anstieg der Energieversorgung durch erneuerbaren Energien einen fundamentalen Wandel in der Energieversorgungsstruktur von einer zentralen zu einer stärker dezentralen Bereitstellung von Energie, deren Planbarkeit zugleich mit dem Anstieg erneuerbarer fluktuierender Energien abnimmt.

Aus diesem Grund wurde mit der Novelle zum EEG-2012 eine Marktöffnung von EEG-Anlagen und im Fall von Biogasanlagen eine Förderung für eine flexible bedarfsgesteuerte Erzeugung von elektrischer Energie aus Biogas initiiert. Durch diese ersten Schritte wurde ein Weg eingeschlagen, der den Ausbau erneuerbarer Energien von dem Markteinführungsinstrument EEG in die vorhandenen Energiemärkte überführen wird. Konkret wird dies durch die Managementprämie für die Direktvermarktung von EEG-Strom und die Flexibilitätsprämie für den zusätzlichen Aufbau von Konversionskapazitäten im Biogasbereich angestrebt. Neben der Flexibilitätsprämie, die die technische Flexibilisierung der Anlage refinanzieren soll, sind auch zusätzliche Erlöse möglich, wenn die Stromerzeugung aus Biogas in Hochpreisphasen in denen das Stromangebot knapper ist, verlegt werden und dadurch überdurchschnittliche Stromerlöse generiert werden können. Eine Schwierigkeit ist darin begründet, dass der Zuwachs des elektrischen Stroms auf Basis erneuerbarer Energien selbst die Marktpreise beeinflusst und zumindest aktuell zu einer Verringerung des Abstands der Tageshöchst- und Tagestiefstpreise (peak-off-peak-spread) führt.

Flexibilisierung von Biogasanlagen

Von den erneuerbaren Energien ist vor allem die Bioenergie flexibel und bedarfsgerecht einsetzbar, weswegen sie in einem Energiesystem, das zukünftig vor allem auf erneuerbaren Energien basieren soll, ein wichtiges Korrektiv für fluktuierende Wind- und Solarenergie darstellen kann. Abbildung 1 zeigt Flexibilisierungsansätze für Biogasanlagen im Überblick.

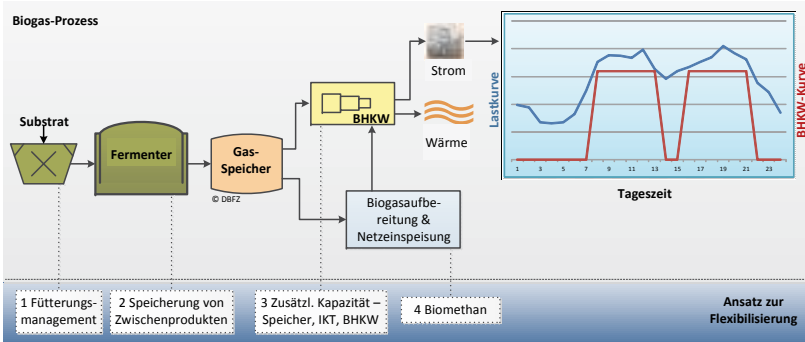


Abbildung 1: Flexibilisierungsansätze von Biogasanlagen (Quelle: Eigene Daten).

Neben der bisher hauptsächlich Flexibilisierung durch Zwischenspeicherung des kontinuierlich produzierten Gases vor Ort bestehen mehrere Möglichkeiten die Verstromung bedarfsgesteuert auszuführen. Eine völlige zeitliche und örtliche Entkopplung von Gasproduktion und Verstromung erlaubt die Aufbereitung und Einspeisung in das Gasnetz. Eine Steuerung der Gasproduktion ist weiterhin durch die grobe Trennung der biochemischen Prozessstufen und die Speicherung leicht umsetzbarer Zwischenprodukte (z.B. Hydrolysat) vor der gezielten Einbringung in die Methanisierungsstufe gegeben. Schließlich erlaubt die gezielte Substratdosierung, wie im Folgenden dargestellt, ebenfalls eine Kontrolle über den zeitlichen Verlauf der Gasproduktion.

Heutzutage vermeiden Biogasanlagen Veränderungen in der Produktionsrate und produzieren einen gleichmäßigen Strom an Biogas. Weder die Biogasproduktion noch ihre Umwandlung in Elektrizität ist mit den Anforderungen des Stromnetzes oder den Marktpreisen gekoppelt. Um aber die ökonomischen Vorteile der Direktvermarktung nutzen zu können, müssen Biogasanlagen von der kontinuierlichen zur bedarfsgesteuerten Verstromung wechseln. Diese findet dann nur zu bestimmten Tageszeiten statt, zu denen Erlöse oberhalb des durchschnittlichen Marktpreises erzielt werden können. Das Biogas, welches in der verbleibenden Zeit produziert wird, muss zwischengespeichert werden. Die installierten Gasspeichergrößen sind dafür in der Regel nicht ausreichend. Um den notwendigen Speicherbedarf und -zubau minimal zu halten und gleichzeitig eine maximale Flexibilität der Anlage zu erlauben, erscheint die *bedarfsgesteuerte Biogasproduktion* als eine attraktive Option.

Die dynamische Führung des biologischen Prozesses ist bisher nicht Stand der Praxis und auch kaum untersucht. In aktuellen Forschungsarbeiten werden am DBFZ die technischen und biologischen Grenzen der dynamischen, bedarfsgesteuerten Biogasproduktion ermittelt. Dazu wurden Laborversuche mit Mais- und Zuckerrüben durchgeführt und realistische Szenarien für BHKW-Laufzeiten den erreichten, dynamischen Biogasproduktionsraten gegenübergestellt. Die Fütterungen wurden dazu an den täglichen Beginn der gedachten BHKW-Laufzeit platziert. Es wurde versucht, die gesamte Tagesration so innerhalb der gedachten BHKW-Laufzeit einzubringen, dass ein Einbruch der Gasproduktion innerhalb der BHKW-Laufzeit stattfand und der Füllstand des Gasspeichers zur Zeit der BHKW-Abuschaltung nahezu bei null lag. Dabei konnten beispielsweise 70 % der täglichen Gesamtproduktion innerhalb von 12 h (simulierter BHKW-Laufzeit) produziert werden (Abbildung 2).

Im Umkehrschluss wurde die Produktion in der zweiten Tageshälfte (simulierter BHKW-Stillstandszeit) auf 30 % der Tagesproduktion gedrosselt. Weiterhin wurden Szenarien untersucht, bei denen die BHKW-Laufzeit auf 16 bzw. 8 h reduziert wurde.

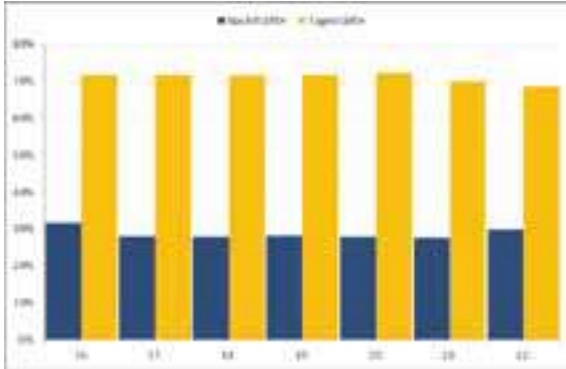


Abbildung 2: Verschobene Verteilung der Gasproduktion auf Tag- und Nachthälfte bei einer Raumbelastung von 3,5 kg oTS / (m³*d) bei der Cofermentation von Mais- und Zuckerrübensilage (Quelle: eigene Daten).

Abhängig von der angesetzten täglichen BHKW-Laufzeit und den daraus resultierenden Zeiten, in denen das produzierte Gas zwischengespeichert werden muss, ergeben sich Anforderungen hinsichtlich der minimalen Größe der Gasspeicher. Bei durchgehend gleichförmiger Biogasproduktion liegen die benötigten Gasspeichervolumina oberhalb der Volumina, die bei einer gezielten Drosselung bzw. Forcierung der Gasproduktion benötigt werden. So konnten auf Basis der Laborversuche mit bedarfsgesteuerter Biogasproduktion Einsparungen im Bereich der notwendigen, auf der Anlage vorzuhaltenden Gasspeicherkapazitäten von bis zu 40 % gegenüber der herkömmlichen gleichförmigen Biogasproduktion ermittelt werden. Basierend auf dafür erhobenen Herstellerangaben zu Kosten von Gasspeicherkapazitäten konnten daraus signifikante Einsparpotentiale ermittelt werden, die sich durch die bedarfsgesteuerte Biogasproduktion ergeben können. Dabei wurden externe Doppelmembrangasspeicher sowie Folienhauben (Abbildung 3) berücksichtigt.

Es wurden für die Berechnungen die jeweils günstigsten Behälterformen angenommen, sodass im Einzelfall häufig mit abweichenden Kosten zu rechnen ist. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Im Fall externer Speicher sind die Kosten für das Fundament nicht enthalten.
- Die tatsächlich möglichen Zubaugrößen für Folienhauben sind von Fermenteran- zahl, Fermenterdesign, Platzangebot und Anlagengenehmigung abhängig, wodurch abweichende Kosten entstehen können.
- Der Wert für den bestehenden Speicher wurde jeweils auf Kostenbasis des zuzu- bauenden Speichers errechnet. Damit ergibt sich aus der Differenz aus Bestand und Gesamtinvestition die notwendige Zusatzinvestition.

- Beim Austausch von Folienhauben muss beachtet werden, dass die alte Folienhaube nicht mehr als Bestand angerechnet werden kann. Das zu errichtende Volumen ist damit größer als im Falle externer Speicher.
- Der Zubau mehrerer kleiner Speicher ist immer erheblich teurer als der Zubau eines großen Speichers. Bei der Berechnung wurde immer der Zubau eines Speichers zugrunde gelegt.
- Weitere Kosten, zum Beispiel durch Genehmigungsverfahren, wurden nicht berücksichtigt.

Anhand der Differenz der gestrichelten und durchgezogenen Linien lässt sich in Abbildung 3 jeweils die Differenz in den insgesamt zu installierenden Gasspeichern für die verschiedenen Szenarien bei verschiedenen Anlagengrößen ermitteln.

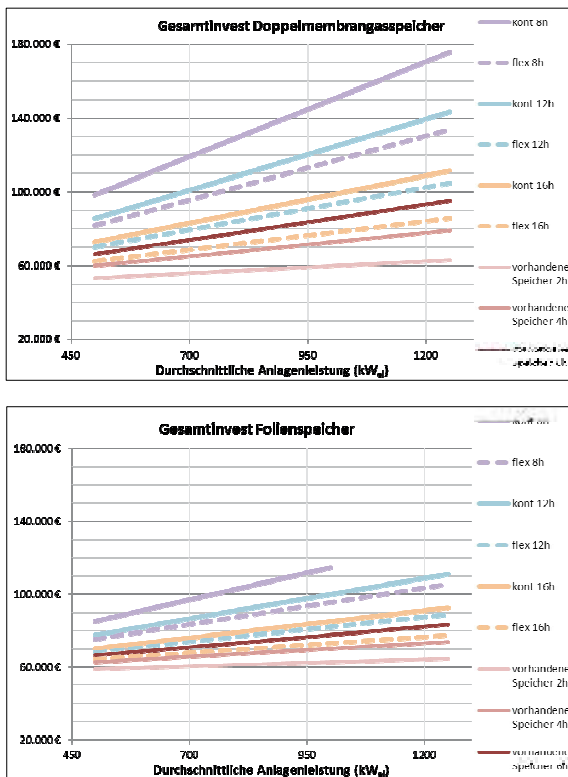


Abbildung 3: Unterschiede im Gesamtinvestitionsbedarf für externen Doppelmembrangasspeicher und Folienspeicher nach Anlagengröße, geplanter täglicher Verstromungsdauer und Betriebsweise. „kont“ steht für Szenarien kontinuierlicher Gasproduktion, „flex“ für solche mit flexibler Gasproduktion, jeweils mit Angabe der täglichen BHKW-Laufzeiten (Quelle: eigene Daten).

Fazit

Insgesamt zeigte sich bei den durchgeführten Analysen, dass die flexible Biogasproduktion einen Beitrag zur Minderung der notwendigen Investitionen für Anlagen leisten kann, die an der Direktvermarktung und damit der bedarfs- und marktgesteuerten Energieerzeugung teilnehmen wollen. Durch die Senkung der Kosten für eine Flexibilisierung der Betriebsweise von Biogasanlagen wird ein Beitrag für die notwendige bedarfsgerechtere Energiebereitstellung erbracht. Für die Biogasbranche ist dies eine Option die Bereitstellung von Grundlaststrom zugunsten einer flexiblen Stromerzeugung anzupassen und somit das Potential und den Wert von Biogas und insbesondere Biogasstrom für das Gesamtenergiesystem zu steigern.

Laufende Untersuchungen betreffen weitere Investitionsaspekte der Anlagenflexibilisierung und sollen zu einer integrierten Gesamtbetrachtung von prozessbiologischen und anlagenseitigen Ansätzen zur Flexibilisierung führen und zugleich auch die Möglichkeiten der Vermarktung von Strom aus Biogas an den Strom- und Regelenergiemärkten analysieren.

MultiSens – Multipositionssensorik und lanzenbasierte Probenahme zur Optimierung und Flexibilisierung von Biogasprozessen

Stefan Junne*¹, M. Nicolas Cruz-Bournazou¹; Michael Fenske³, Christian Hälsig³, Alexander Hörig², Erich Kielhorn¹, Peter Neubauer¹, Sandra Päßler², Winfried Vonau²

¹ Fachgebiet Bioverfahrenstechnik, Institut für Biotechnologie, TU Berlin

² Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg

³ teleBITcom GmbH

Adresse: TU Berlin, Institut für Biotechnologie, Fachgebiet Bioverfahrenstechnik,
Ackerstrasse 71-76, ACK24, 13355 Berlin
*E-Mail: stefan.junne@tu-berlin.de
www.bioprocess.tu-berlin.de

Abstract

Die bestehenden Kontrollsysteme in Biogasanlagen basieren auf Sensoren, die an einer Stelle fest integriert sind und keine ausreichenden Informationen über den Zustand des Prozesses und der Mikroorganismen wiedergeben. In Biogasreaktoren bestehen zudem Gradienten, die kaum Rückschlüsse auf den Prozessstatus durch die üblichen randgängigen Messungen zulassen. Dies führt dazu, dass die Etablierung einer Prozesskontrolle und -steuerung häufig ungenügend oder schlichtweg nicht möglich ist. Ein Ansatz, den vorherrschenden Gradienten Rechnung zu tragen, ist die Etablierung von variabler Probenmesstechnik und Multipositionssensorik zur Optimierung der Prozesskontrolle. So wird die Messung an Stellen ermöglicht, die als kritisch betrachtet und an denen frühzeitig Störungen erkannt werden können. Es kann zudem die Bedeutung der Aufrechterhaltung von Gradienten auf die Prozessleistung evaluiert werden.

Zur Etablierung einer variablen Messtechnik werden Lanzensysteme und Teleskope in einem interdisziplinären Ansatz integriert und für die Messung an Biogasanlagen optimiert. Dabei spielt die Übertragung der Daten mit Funktechnik eine besondere Rolle, da eine entsprechende kabelbasierte Infrastruktur zur Aufrüstung der Sensorik an bestehenden Anlagen oftmals fehlt.

An ausgewählten industriellen Anlagen werden technische Modifikationen vorgenommen, um die beschriebene Methodik exemplarisch zu validieren. Dabei werden auch neue Sensoren integriert und hinsichtlich der Aussagekraft sowie der generellen technischen Einsetzbarkeit überprüft. Um sensitive Parameter festzulegen, werden begleitend mit modernsten Laborverfahren Off-line-Analysen des Metaboloms durchgeführt und typische Medieneigenschaften in einem Testzeitraum untersucht. Schließlich werden die Labormessdaten in Bezug auf den Messpunkt der Lanzen-basierten Probenahme und den dort gewonnenen On-line-Daten korreliert. So kann auch der Einfluss von Schichten und die Bedeutung des Rührers für den Prozess bewertet werden.

Mit der beschriebenen Methodik ergeben sich neue Möglichkeiten der Prozesskontrolle zur Stabilisierung der Anlagen. So kann z.B. die Vorgehensweise bei Feed-Wechseln an die

jeweilige Anlage angepasst werden. Das entwickelte Konzept ist dabei so ausgelegt, dass alle Geräte kommerziell erhältlich und an praktisch allen Anlagen einsetzbar sind. Es kann gezeigt werden, dass sich der Einsatz von Multipositionssensorik, Lanzen-basierter Probenahme und portabler Messgeräte lohnt, wenn Anlagen generell störungsanfällig sind oder flexibel betrieben werden. Schließlich können durch ein orts aufgelöstes intelligentes Probenahmesystem, das an eine Prozessüberwachung gekoppelt ist und eine Prozessstatus-abhängige Entnahmezeit vorgibt, Kosten und Aufwand eingespart werden. Durch diese kombinierte Methodik der Probenahme und Überwachung kann die Prozessstabilität erhöht und die Anlagensteuerung Modell-basiert verbessert werden.

Schlagwörter: Multipositionssensorik, intelligente Probenahme, Prozessüberwachung, Prozesssteuerung

Einleitung

Das Leistungspotenzial der bestehenden Biogasanlagen in Deutschland wird nicht voll ausgenutzt. Es gibt Hinweise darauf, dass ein erheblicher Teil der Anlagen bei Unterlast betrieben wird, d.h. unterhalb der geplanten Leistung. Die unzureichende Mess- und Regeltechnik, die bei vielen Anlagen immer noch vorherrscht, wird als einer der Gründe für eine ineffiziente Produktion gesehen (Schütte, 2007). Das ist auch eines der Ergebnisse des Biogas-Messprogramms II des Johann Heinrich von Thünen-Instituts („Biogas-Messprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich“) (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, 2010). Neben der fehlenden Erfassung wichtiger Prozessparameter tritt noch ein weiterer Aspekt bei der Überwachung hinzu, der es verhindert, Prozessstörungen in einem frühen Stadium zu erkennen: Sensoren sind in der Regel wandnah installiert. Die Probenahme erfolgt ebenfalls meist aus dem Randbereich der Behälter. So werden Zonen überwacht, die für den Prozess unter Umständen wenig oder überhaupt nicht repräsentativ sind. Die beträchtliche Heterogenität in der flüssigen Phase, bedingt durch die Größe der Reaktoren und der teilweise unzureichenden Durchmischung, wird dabei völlig außer Acht gelassen. Das bedeutet, dass weder die direkten On-line-Messungen noch die entnommenen Proben repräsentative Ergebnisse liefern, da die Verhältnisse an anderen Punkten des Reaktors ganz andere sein können. Damit steigt das Risiko, dass Prozessstörungen zu spät und nicht zunächst am Entstehungsort erkannt werden. Eine effektive Prozesskontrolle ist nicht möglich. Ein weiterer Aspekt, der oftmals völlig vernachlässigt wird, ist die Überwachung der bestehenden Gradienten. Deren Aufrechterhaltung, z.B. auch von wandnahen Biofilmen, kann für die Prozessstabilität von entscheidender Bedeutung sein. Allerdings ist sie Anlagen-spezifisch zu betrachten, da Gradienten selbst bei identisch betriebenen Anlagen stark variieren können. Daher ist eine Anlagen-spezifische Lösung notwendig, um die Bedeutung von Gradienten und Störungen im Einzelfall abschätzen zu können. Erst mit einem sich stetig vermehrenden Datensatz wird unter Einbeziehung statistischer Modell-basierter Ansätze eine generelle Aussage über die Bedeutung von Gradienten und optimalen Messpunkten an Anlagen möglich sein. Hierbei spielt auch die Datenerfassung, das Datenmanagement und die Daten-getriebene Modellierung eine bedeutende Rolle.

Das bisher mangelhafte Wissen erschwert eine Überwachung der Anlagen und führt zu einer geringen Flexibilität der Fahrweise, will man nicht höhere Betriebsrisiken in Kauf nehmen. Auch können die meist Labor-basierten experimentell ermittelten Erkenntnisse schwer auf den Großmaßstab übertragen werden, wenn repräsentative Verhältnisse in der Flüssigphase nicht erfassbar sind. Auf der anderen Seite ist ein Scale-down-Ansatz hin zum Labormaßstab kaum möglich. Zur Verbesserung bedarf es einer Schnittstellentechnologie zwischen wissensbasierter, an den Endprozess ausgerichteter Grundlagenforschung und praxisnaher Optimierung, die direkt individuell an Anlagen durchgeführt werden kann. Grundlage dafür ist auf jeden Fall eine Verbreiterung des Verständnisses der Verhältnisse in Praxisanlagen, die statistisch relevant sind. Dies bedingt eine Beprobung einer Anlagemenge, die weit über das Maß der bestehenden Versuchsanlagen hinausgeht. Lösungen zu identifizieren, die eine Verbreiterung des Wissens mit vertretbaren Kosten erlauben, stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Daten aus einer kritischen Anlagenanzahl erlaubt die Etablierung einer Optimierungsplanung, ähnlich einer modellbasierten Versuchsplanung. So kann das Konzept zwei Seiten bedienen:

- (i) die Labor-basierte Forschung, Modellbildung und Simulation kann als Scale-down aus der Praxis besser auf die tatsächlichen Verhältnisse hin ausgerichtet werden, und
- (ii) industrielle Anlagen können individuell und wissensbasiert optimiert bzw. flexibilisiert werden.

Deshalb werden im laufenden Projekt „MultiSens“ neuartige, mobile Probenahmesysteme und Sensoren entwickelt und zum Einsatz gebracht, die es ermöglichen, geeignete Standorte für die Probenahme und die Überwachung im Reaktor zu definieren. Zu diesem Zweck werden Sensoren für wichtige Prozessparameter (z.B. Temperatur, pH-Wert, Redoxpotential und Leitfähigkeit) und Stichprobeneinheiten verkleinert und in Lanzen integriert, die vorhandene Probenöffnungen passieren und die Konzentrationsunterschiede (Gradienten) im Kern der flüssigen Phase identifizieren können. So soll ein intelligentes Probenahme- und Überwachungssystem für den Anlagen-unabhängigen Einsatz entwickelt werden.

Bisher eingesetzte Sensorik in der Flüssigphase

Von 2005 bis 2009 führte das Johann Heinrich von Thünen-Institut (ehemals Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft) das Bundesmessprogramm zur Bewertung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen, kurz Biogas-Messprogramm (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, 2010), durch. Es ergab unter anderem, dass das Gros der Anlagen messtechnisch nur unzureichend ausgestattet ist. Zur Gasanalyse verfügen lediglich 70 % der untersuchten Anlagen über Gasvolumenmessgeräte, 60 % besitzen Gasanalysatoren.

Einer der am häufigsten verwendeten Online-Sensoren zur Überwachung von Biogasanlagen ist die pH-Elektrode. Der optimale pH-Wert für die Hydrolyse und Acidogenese liegt wesentlich tiefer um 5 bis 6 (Babel et al. 2004; Lay et al. 1997). Es kann auf Grund dieser Tatsache durchaus sinnvoll sein, Gradienten im Reaktor aufrecht zu erhalten. Größere Schwierigkeiten bei der online pH-Messung im Reaktor sind Biofilmbildung und fehlende Inertheit gegenüber wechselnden Substraten. Hinsichtlich des ersten Problems gibt es Ansätze automatischer Reinigung u.a. mit Hilfe von Ultraschall und integrierter Spülung (Alvarez-Ramirez et al. 2002; Vanrolleghem et al. 2003).

Für die Prozessüberwachung werden außerdem Leitfähigkeits- und Redoxpotentialensensoren genutzt. Die üblichen edelmetallbasierten Elektroden weisen allerdings zahlreiche Probleme für den Einsatz in Biogasanlagen auf. Zur schlechten Reproduzierbarkeit der Potenziale von edelmetallischen Redoxelektroden (Messfehler von ± 25 mV) kommen weitere Nachteile dieser Elektrodensorte hinzu. So werden die Elektroden unbrauchbar, wenn katalytische Gifte, wie SO_2 oder andere Schwefelverbindungen an deren Oberfläche gelangen. Auch Eiweißstoffe verursachen Inaktivierungen der Edelmetalloberflächen. Die Gegenwart von gasförmigem Sauerstoff bzw. Wasserstoff im Untersuchungsmedium beeinflusst das Halbzellenpotenzial. Untersuchungen zum nahe liegenden Einsatz von Kohlenstoffelektroden haben gezeigt, dass dort keine hohe Reproduzierbarkeit der Elektrodenpotentiale gegeben ist und diese somit keine Alternative zu den Edelmetallelektroden bilden.

Multipositionsprobenahme zur Identifikation von Inhomogenitäten

In gerührten Bioreaktoren werden üblicherweise die ideale Durchmischung aller Inhaltsstoffe und damit homogene Verhältnisse angestrebt. Im Labormaßstab lässt sich dies annähernd erreichen. Mit steigender Reaktorgröße bis hin zum industriellen Großmaßstab lassen sich homogene Verhältnisse im Behälter jedoch immer weniger realisieren. Je nach Geometrie des Reaktors sowie der Art und Weise der Durchmischung treten lokale und zeitliche Konzentrationsunterschiede im Behälter auf. Diese können zudem von den vorherrschenden laminaren Strömungsbedingungen verstärkt werden. Damit sind industrielle Prozesse im Großmaßstab durch inhomogene Verhältnisse bestimmt.

Besonders deutlich lässt sich dies am Beispiel von Biogasreaktoren ersehen. Ein derzeit üblicher Hauptvergärer einer Biogasanlage hat einen Durchmesser von 15–20 m bei einer Füllhöhe von ca. 6 m. Damit ergeben sich Füllvolumina von ca. 1.000–2.000 m³. Teilweise werden bereits Betonreaktoren von bis zu 40 m Durchmesser und 20 m Höhe gebaut. Aufgrund baulicher Gegebenheiten wie der flexiblen Dachkonstruktion werden die Rührer meist an der Behälterwandung installiert (Abbildung 1).

Weiterhin reduzieren viele Anlagenbetreiber den Einsatz der installierten Rührwerke, da deren Energieverbrauch einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt und die Erlöse aus dem Stromverkauf schmälert. Zudem sind die Rührblätter hohen Scherkräften ausgesetzt und durch Partikel in der Kultur entsteht ein erheblicher Abrieb, so dass die Rührblätter oftmals nach wenigen Jahren ausgetauscht werden müssen. Dies führt aus ökonomischer Sicht dazu, dass das Rühren generell als problematisch betrachtet und wenn möglich reduziert werden muss. Dadurch sind Biogasreaktoren oft nur unzureichend durchmischt und weisen ein laminares Strömungsfeld auf. Es treten lokale und zeitliche Substrat-, Säure-, Temperatur- und pH-Gradienten sowohl in axialer als auch horizontaler Richtung auf, die im laminaren Strömungsfeld erhalten bleiben.



Abbildung 1: Edelstahlbiogasreaktor, Innenansicht mit Tauchrührer im Hintergrund, Foto: ThyssenKrupp Stainless AG.

Um Gradienten zu charakterisieren und zu verstehen, bedarf es einer robusten und reproduzierbaren Methodik im Labor. Dabei werden neben üblichen Parametern wie FOS/TAC vor allem gelöste Metabolite detektiert, die als Signalstoffe für die Prozessleistung dienen können. Dazu zählen volatile Fettsäuren und Alkohole, aber auch Stickstoff- und Schwefelsalze. In einer Beispielstudie an einer zweistufigen Anlage bestehend aus Hydrolyse-Becken und Hauptvergärer, wurden in einem ersten Schritt Proben an verschiedenen Punkten und aus verschiedenen Tiefen des Hydrolysebeckens (s. Abbildung 2) entnommen und im Labor analysiert.

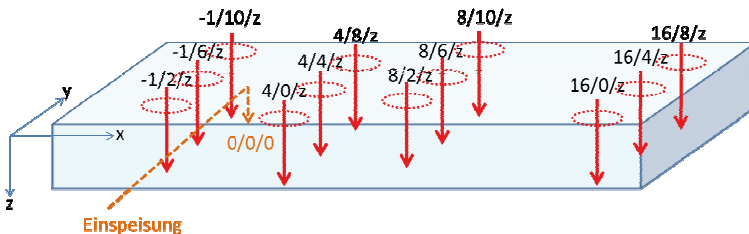


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Probenahmestellen in x- und y-Richtung in einem Hydrolysebecken (Länge und Breite) (in z-Richtung (Tiefe) je vier Messungen bei 0 m, 0,5 m, 1 m und 1,5 m).

Nach erfolgter Laboranalyse lassen sich Gradienten in einem Verteilungsmuster darstellen, wie z.B. die Konzentration an Essigsäure (Abbildung 3), und der optimale Ort für einen entsprechenden Störsensor bestimmen, wenn die Gradienten wie in diesem Beispiel signifikant größer sind als die Bestimmungsgenauigkeit.

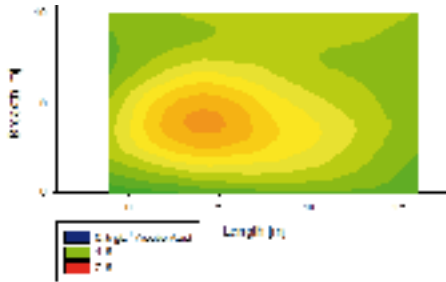


Abbildung 3: Schematisches Verteilungsmuster (Draufsicht) der Essigsäurekonzentration in einem Hydrolysebecken, gemittelte Werte für Probenahme in vier Schichttiefen (0m, 0,5m, 1m, 1,5m). Die „kritische“ Zone mit erhöhter Essigsäurekonzentration ist orange eingefärbt.

Vertikal-variable Lanzen-basierte Probenahme

Erste Lanzenprototypen zur variablen Probennahme wurden entwickelt. Das Probevolumen beträgt 50-100 ml. Die Messungen werden derzeit in einer Höhen von 2 m (vom Boden aus gemessen) bzw. 4 m Tiefe (in Bezug auf das Flüssigkeitsniveau) im Inneren eines Gärreaktors durchgeführt, um mögliche Gradienten von der Wand bis hin zur Behältermitte zu identifizieren. Dabei wird eine maximale horizontale Eindringtiefe von 3 m erreicht, die in der nächsten Entwicklungsstufe auf 5 m ausgeweitet wird.

Zur Mehrschichtbeprobung in Biogasreaktoren haben die Autoren eine Lanzen-basierte Probenahme speziell für den Einsatzbereich bei Biogasanlagen entwickelt, deren Apparatur auch nachträglich zu installieren ist. Dabei wird ein seitlicher Zugang direkt in die Flüssigphase genutzt, die Lanze über einen Kugelhahn in den Fermenter eingeführt und die an der Spitze befindliche Probenahmekammer über ein Einsteckrohr geöffnet (Abbildung 4a).



Abbildung 4a (links): Schematische Darstellung einer Probenahmelanze für Biogasfermenter. Das Außenrohr wird über eine Halterung und einen Kugelhahn in den Reaktor eingeführt. Die Probenahmekammer (Kopfteil, orange) wird von außen über ein Einsteckrohr (hier mit Griff) geöffnet und geschlossen.



Abbildung 4b (rechts): Einbringung einer Probenahmelanze in den Hauptfermenter einer Biogasanlage. Lanze: Material POM, Außendurchmesser 45 mm, Innendurchmesser 36 mm, Probevolumen: 100 mL.

Mit dieser Methodik lassen sich derzeit Eindringtiefen von über 3 m realisieren, was angesichts der Größe der Reaktoren gering erscheint, aber bereits die Beprobung von Schichten erlaubt, die deutlich außerhalb der laminaren Wandströmung liegt. Bei der praktischen Ausführung vor Ort (Abbildung 4b) wurde auf eine Rohrstütze verzichtet, da die Einbauten eine ausreichende Führung für die Lanze bieten. Stabile Lanzenkonstruktionen bis zu 6 m sind ausführbar. Da die Schichthöhe, aus der Proben genommen werden, durch die Lage des Zugangsstützens definiert ist, werden in einem weiteren Schritt flexible Probenahmeverrichtungen über den Kopfraum eingebracht und in der Flüssigkeit versenkt. So werden unterschiedliche Probenahmetiefen erzielt. Aus den Erkenntnissen kann dann entschieden werden, in welcher Höhe weitere Stützen zur horizontal eingebrachten Lanze angebracht werden.

Stationäre Lanzentechnik als Einstieg in die Multipositionssensorik

Die Autoren haben in einem weiteren Entwicklungsschritt Sensorköpfe mit Mehrfachsensoren (pH-, Temperatur- und Redoxpotentialbestimmung) entwickelt (Abbildung 5a). Die Elektroden sind direkt an eine Funkübertragung angeschlossen. Damit können die kontinuierlich erhobenen Messwerte über das Mobilfunknetz ortsunabhängig abgerufen werden. Die über lizenzfreien Kurzstreckenfunk eingehenden Messwerte werden über das GSM-Netz in eine Datenbank eingespeist und stehen über ein Webportal zur Verfügung. Mit dieser Technik ist es möglich, bei Parameterüberschreitungen (und damit Prozessstörungen) gezielt Datenpakete zu übermitteln und dezentral auszuwerten. Insbesondere bei der Nachrüstung von Anlagen entfällt durch die Verbindung mit der Funktechnik die Verkabelung, die oftmals an den Anlagen nicht vorhanden ist. Lediglich eine externe Stromzufuhr wird benötigt.

Die Langzeitmessung elektrochemischer Parameter in einer Biogasanlage stellt besondere Anforderungen an die Sensorik. Aufgrund der Zusammensetzung des Biogasmediums kann es leicht zu Veränderungen an den Elektrodenoberflächen, Verstopfung der Diaphragmen der Referenzelektroden oder zur Bildung eines Biofilmes kommen. Um diese Veränderungen an den Elektroden beurteilen zu können, wurden Voruntersuchungen an der Anlage mit verschiedenen Elektroden durchgeführt. Dabei zeigten sich folgende Elektroden für die Langzeitmessung an der stationären Messlanze als geeignet.

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| 1. pH-Messung: | pH-Glaselektrode (V11 pH-Glas) |
| 2. Redoxmessung: | Pt-Redoxelektrode (Pt-Perle) |
| 3. Referenzelektrode: | Ag/AgCl 3M KCl mit KCl-Überdruck |

Die oben aufgeführten Elektroden wurden in je drei wasserdichten Messköpfen eingebaut, welche an einem Edelstahlrohr in 0,1 m, 1,0 und 1,6 m unter der Oberfläche befestigt wurden (s. Abbildung 6a). Die Messköpfe sind mit einem Schutzkorb versehen, der die Elektroden vor mechanischen Beanspruchungen schützt. Am oberen Ende der Messlanze befindet sich ein Elektrolyt-Referenzgefäß, welches die Referenzelektroden mit Elektrolyt (in diesem Fall KCl) versorgt und den Überdruck auf den Diaphragmen gewährleistet. Da der Füllstand des Hydrolysebeckens schwankt, wurde der obere Messkopf schwimmend installiert. Damit kann eine Füllhöhen schwankung von bis zu 80 cm ausgeglichen werden (Abbildung 5b).



Abbildung 5a: Messlanze mit Messköpfen.



Abbildung 5b: eingebaute Messlanze mit Schwimmer.

Die Messwerte werden kontinuierlich alle 15 Minuten gespeichert und über ein GSM-Modul versendet. In Abbildung 6 sind die pH-, Redox- und Temperatur-Messwerte der stationären Messlanze exemplarisch über eine Woche vom 14.08. bis 18.08.2012 dargestellt.

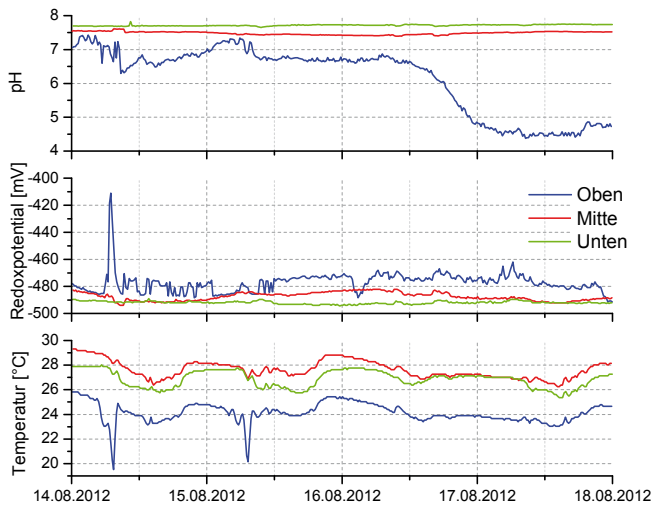


Abbildung 6: Multipositionsmessung mit stationärer Messlanze.

Die blauen Kurven zeigen die Messwerte des oberen Messkopfes. Da sich dieser sehr nah an der Oberfläche befindet, werden die Messwerte stark von den Umgebungsluftbedingungen beeinflusst. So zeigt das obere Redoxpotential einen deutlich unruhigeren Verlauf im Vergleich zu den tieferen Redoxmessungen. Im Durchschnitt liegt das obere Redoxpotential ca. 10 mV höher. Diese Differenz kann auf den Einfluss des Luftsauerstoffes auf die obere Schicht zurückgeführt werden. Der Verlauf am 14.08. bis auf -410 mV kann mit der Zuführung größerer Substratmengen und der damit verbundenen Einkopplung von Sauerstoff in die obere Schicht verknüpft werden.

Die mittlere Temperaturmessung zeigt den höchsten Verlauf, bedingt durch die größte mikrobiologische Aktivität im mittleren Bereich. In Richtung Oberfläche kühlt das Medium bei geringerer Umgebungstemperatur entsprechend ab. Obwohl das Becken regelmäßig gerührt wird, bildet sich ein Temperaturgradient von ca. 3 °C zwischen der mittleren und der oberen Messung aus.

Bei der pH-Messung an der obersten Position ist ab dem vorletzten Betrachtungstag ein ungewöhnlich starker Abfall zu beobachten. Gerade im Vergleich mit den anderen Messstellen ist hier von einer Messstörung auszugehen. Generell zeigt der Verlauf zu früheren Zeitpunkten bereits größere pH-Schwankungen an dieser Position. Dies ist auf den Eintrag des Mediums und seiner Verteilung sowie auf die stark schwankende mikrobiologische Aktivität zurückzuführen.

Ausblick

Die bestehende Lanzentechnik wird für die Integration von miniaturisierten Sensor-Systemen angepasst. Dabei müssen die Lanzen gleichzeitig die notwendigen Anforderungen für Online-Messungen und der Probenahme eines ausreichenden Volumens erfüllen. Die eingearbeiteten Sensoren werden bezüglich ihrer Kalibrierung und Standzeiten getestet. Es ist die Schaffung einer Multiparametermesssonde mit miniaturisierten und optimierten Sensoren zur Bestimmung von pH-Wert, Redoxpotential sowie der Leitfähigkeit vorgesehen (Konstruktionszeichnung Abbildung 7).



Abbildung 7: Schematische Darstellung des Kopfteils einer Probenahmelanze mit integrierten Sensorelektroden.

Wegen der für chemosensorische Messungen extremen Umgebungsbedingungen innerhalb des Reaktormediums genügen insbesondere weder konventionelle Redox- noch Referenzelektroden den hohen Ansprüchen im Vorhaben, die u.a. in einer Maximierung der bedienerfreundlichen zu gestaltenden Wartungsintervalle der Messtechnik bestehen. Die zu entwickelnde neue Redoxelektrode als Bestandteil des projektgemäßen Multisensors soll aus elektronenleitendem Glas als Elektrodenmaterial bestehen. Es gibt eine Reihe von

(auch eigenen) Untersuchungen, die die prinzipielle Anwendbarkeit solcher Gläser belegen (Patent-Nr.:DE102009007851A1). Die konkrete Ausgestaltung der Redoxelektrode ist ebenso Projektgegenstand wie die Art und Weise der konstruktiven Vereinigung zur Multiparametersonde. Neben der horizontal variablen Lösung wird eine vertikal verschiebbare Lösung zur Einbringung über den Kopfraum erarbeitet. Funk soll hierbei zur Datenübertragung sowie zur Ortung des Sensorkopfes während der Datenerfassung bzw. Probenahme genutzt werden.

Eine wesentliche Komponente der Messwerterfassung an unterschiedlichen Positionen ist die Zusammenführung der Messergebnisse in einer Datenbank. Dazu bietet sich Funk für die Vernetzung in der Biogasanlage an. Die eingesetzten Funkübertrager können autonom auch über Monate im Innenraum der Fermenter arbeiten. Übliche Fermenter sind über die Folienabschlüsse nach Oben für Funkwellen der gewählten Frequenzen offen, so dass eine unbegrenzte Mobilität über die Fermenterfläche gegeben ist. Auch Schwimmschichten oder Schaum behindert nicht die Datenübertragung. Die energieautonomen Sensoren an der Lanze sind so als Baueinheit mit dieser flexibel nutzbar, ohne dass Folgeaufwand für Verkabelung und Zulassung entsteht. Quasistationäre Messpunkte, die an interessanten Positionen nachgerüstet werden, können ebenfalls in das Funknetz eingebunden werden. So sind Öffnungszeiten von Überströmklappen, Füllstände von Gasspeichern oder der Nachweis der Dichtigkeit von Abdeckfolien ohne Ergänzung der Verkabelung messbar.

Modell-basierte Versuchsplanung

Um diesen Ansatz mit einem wissenschaftlichen Verständnis der Biogasproduktion zu begleiten, werden Proben offline analysiert. Um die allgemeine Korrelation relevanter Prozessparameter aufzuklären, wird die kritische Zusammensetzung des Einsatzmaterials, dessen Einfluss auf die Heterogenität in der flüssigen Phase, die Zusammensetzung der Gasphase und der Einfluss auf die Energieerzeugung (Ausbeute) ausgewertet. Das übergeordnete Ziel ist es zu überprüfen, ob der vorgeschlagene Ansatz in der Lage ist, Störungen sehr früh zu erkennen und klare Aussagen über den aktuellen Prozess-Status zu geben. Um den Informationsgehalt der limitierten Sensorik zu maximieren, stellen modellbasierte Methoden eine wichtige Unterstützung dar. Dadurch kann die optimale Lage der Sensoren bezogen auf die Relevanz für ein Prozessmodell und damit für eine Überwachung oder sogar Steuerung statistisch relevant ausgewählt werden. Es ist somit möglich, bei einer bestimmten Anzahl von Messungen die Positionierung so auszuwählen, dass Regressionsmodelle mit der größten möglichen Genauigkeit angepasst werden können. Modell-basierte Optimierung wird dann angewendet, um die Sensitivität der Messstellen in Abhängigkeit der Zeit und der Position berechnen zu können. Auf Grund der stark nichtlinearen Dynamik des Prozesses und der ständigen Änderungen im Prozesszustand ist zu erwarten, dass die optimale Positionierung der ‚Hot Spots‘ auch eine schwer vorhersagbare Dynamik erfassbar macht. Durch die Verknüpfung von der Orts- und Zeitauflösung mit der Modellierung (z.B. mit genetischen Algorithmen) wird eine intelligente Probenahme geschaffen, die spezifisch an jede Anlage angepasst werden kann.

Danksagung

Die Autoren danken für die Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ des Bundesumweltministeriums, FKZ 03KB059.

Literatur

Alvarez-Ramirez, J., et. al.(2002): Feedback control design for an anaerobic digestion process. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 77(6),S. 725-734.

Babel, S., et. al. (2004): Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester. *Water Research*. 38(9), S. 2417-2423.

Johann Heinrich von Thünen-Institut (2010): Biogas-Messprogramm II. Hrsg. v. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Lay, J.J., et al. (1997): Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion. *Water Research*. 31(6), S. 1518-1524.

Schütte, A. (Hrsg.) (2007): Gülzower Fachgespräche Band 27; Messen, Steuern, Regeln in der Biogaserzeugung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow.

Vanrolleghem, et al. (2003): On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: state of the art. *Water Science and Technology*. 47(2), S. 1-34.

Effekte von Enzymen im Biogasprozess – Stand und erste Ergebnisse des Verbundvorhabens BiogasEnzyme

Jörg Kretzschmar*, Teresa Suárez Quiñones¹, Katrin Pätzolt¹, Monika Heiermann¹

*DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

¹Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)

Adresse: DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

*E-Mail: joerg.kretzschmar@dbfz.de

Abstract

Im Verbundvorhaben „BiogasEnzyme“ wird die Wirkung hydrolytischer Enzyme auf die Biomethanisierung faserreicher Einsatzstoffe untersucht. Dabei wird zum einen die Wirkungsweise der applizierten Enzyme auf die Umsetzungsgeschwindigkeit sowie auf die Biogas- /Methanausbeute einzelner Einsatzstoffe erforscht. Zum anderen werden sekundäre Effekte des Enzymeinsatzes auf die Fließfähigkeit des Reaktorinhalts identifiziert. Im Rahmen eines Upscalings werden Versuche im Labor-, Technikums- und Praxismaßstab durchgeführt. Bisher liegen vor allem Ergebnisse aus diskontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Gärversuchen im Labormaßstab vor. Diese zeigen nur geringe bzw. keine Effekte des Enzymeinsatzes auf die Biogasausbeute. Die Primärwirkung (Produktfreisetzung) eines eingesetzten Cellulase/Hemicellulase Komplexes konnte in enzymkinetischen Untersuchungen an Maissilage mittels HPLC nachgewiesen werden.

Schlagwörter: Anaerobe Vergärung, Effizienz, hydrolytische Enzyme, Labor-, Technikums-, Praxisanlagenmaßstab.

Einleitung

Biogas kommt wegen seiner besonderen Eigenschaften, wie z.B. der Speicherfähigkeit und der Möglichkeit der Aufbereitung zu Biomethan als Erdgassubstitut, eine bedeutende Rolle im Bereich der erneuerbaren Energien zu. Die Steigerung der Effizienz des Biogasprozesses ist daher von großer Bedeutung und trägt erheblich zur Verbesserung der Nachhaltigkeit dieser Technologie bei. Der Einsatz von Enzymen zur Steigerung der Effizienz des Hydrolyse-Schrittes stellt möglicherweise einen Ansatz dar, den Gesamtprozess effektiver zu gestalten. Teilweise wird dies bereits in Praxisanlagen durchgeführt. Die Effizienzsteigerung sowie die beobachteten Effekte in der Praxis sind allerdings sehr heterogen und wenig wissenschaftlich belegt. Die Berichterstattung zur Wirkung von Enzymen ist eher gegensätzlich. In der Praxis wird teilweise von gesteigerter Biogasbildung, verringerter Rührwerksleistung und prozessstabilisierender Wirkung berichtet. Im Labormaßstab konnten Effekte auf die Methanisierung und Viskosität verschiedener Einsatzstoffe nachgewiesen werden [1,2]. Es liegen jedoch auch wissenschaftliche Untersuchungen vor, in denen nur ein geringer [3,4] oder kein Einfluss hydrolytischer Enzyme [5] festgestellt wurde. Derzeit besteht keine endgültige Klarheit über die Wirksamkeit und die Wirtschaftlichkeit des Enzymsatzes in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Um die Wirkung von Enzymen im Biogasprozess besser zu verstehen und zu optimieren, müssen die Bedingungen des Enzymsatzes und damit einhergehende mögliche Effekte im Labor-, Technikums- und Praxisanlagenmaßstab genauer untersucht werden. Im Verbundprojekt „Biogasenzyme“ werden zunächst im Labormaßstab verschiedene hydrolytische Enzyme (z.B. Cellulase/Hemicellulase, Protease, Pektinase) in diskontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Gärversuchen unter Variation der Einsatzstoffe sowie einzelner Prozessparameter (z.B. Temperatur, Enzymdosierung und -zugabeort) untersucht. Zusätzlich wird das Substratfreisetzungsvermögen ausgewählter Enzyme sowie der Einfluss von Cellulasen auf die Viskosität von Fermenterinhalt und Gärresten erforscht. Im Technikums- und Praxisanlagenmaßstab kommen ausgewählte hydrolytische Enzyme zum Einsatz, um einerseits die im Labor beobachteten Wirkungen zu bestätigen und/oder andererseits eventuelle Skalierungseffekte im Rahmen der Versuchsdurchführungen zu analysieren. Dieser Beitrag konzentriert sich auf vorliegende Ergebnisse der diskontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Gärversuche, enzymkinetische Untersuchungen des eingesetzten Cellulase/Hemicellulase-Komplexes und Untersuchungen zur Fließfähigkeit des Fermenterinhalt.

Methoden

Einsatzstoffe

Für die diskontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Gärversuche im Labormaßstab wurden verschiedene praxisübliche Einsatzstoffe eingesetzt. Zu den untersuchten Materialien gehörten Wintergerste-Ganzpflanzensilage (GPS), Maissilage und Grassilage. In den enzymkinetischen Versuchen mittels eines Cellulase/Hemicellulase-Komplexes wurde Maissilage als Substrat verwendet.

Gärversuche

Die durchgeführten diskontinuierlichen Gärversuche erfolgten nach VDI 4630 mit Hilfe von Eudiometern. Tabelle 1 gibt einen Überblick die verwendeten Substrate und Enzyme.

Tabelle 1: Eingesetzte Substrate und Enzyme der diskontinuierlichen Gärversuche, die Enzymkonzentrationen beziehen sich auf g/kg oTM des Einsatzstoffes (Substrat + Gülle)

Substrat	Cellulase/Hemicellulase g/kg oTM	Protease g/kg _{oTM}	Pektinase g/kg _{oTM}
Wintergerste-GPS	10	2,0	0,5
Maissilage	10	2,0	0,5
Grassilage	10	2,0	0,5

Die diskontinuierlichen Gärversuche wurden in zwei unterschiedlichen Varianten durchgeführt. In einer Versuchsvariante wurden die einzelnen Enzyme und das jeweilige Substrat direkt mit dem Inokulum vermischt. In einer zweiten Variante wurden die Substrate mit den Enzympräparaten in der gleichen Konzentration für 48 h bei 40 °C vorbehandelt (externe Vorbehandlung) und anschließend im Gärversuch eingesetzt. Inaktivierte Enzymkonzentrationen wurden durch Erhitzung der Enzyme auf 100 °C (über Nacht) bereitgestellt.

In den quasi-kontinuierlichen Gärversuchen kamen als Substrat Maissilage und Wintergerste-GPS in Kombination mit Rindergülle zum Einsatz (Tabelle 2), die Durchführung orientierte sich an der VDI 4630. Abweichungen gab es im Falle der Steigerung der Raumbelastung bei den Versuchen, in denen Wintergerste GPS als Einsatzstoff diente. Hier wurden die Steigerungsraten der Raumbelastung (B_R) der VDI 4630 (0,5 Einheiten aller 14 Tage) überschritten. Für alle weiteren quasi-kontinuierlichen Versuche galten die in Tabelle 2 dargestellten Parameter.

Tabelle 2: Prozessparameter der quasi kontinuierlichen Versuche

Substrate	V_{Reaktor} l	V_{Effektiv} l	HRT d	B_R g _{oTM} /(l*d)
Wintergerste GPS	15	10	60	3,0
Maissilage	10	8	60	3,0

Die Zugabe der Enzyme begann nach einer hydraulischen Verweilzeit (HRT=60 d) mit Zielraumbelastung ($B_R=3,0 \text{ g}_{\text{oTM}}/(\text{l}*\text{d})$) und erfolgte täglich mit dem Substrat direkt in die Fermenter (Rührkesselreaktoren). Bei den Versuchen mit Maissilage wurde die Protease nicht einzeln sondern in Kombination mit dem Cellulase/Hemicellulase-Komplex eingesetzt Die eingesetzten Enzymkonzentrationen sind in Tabelle 3 dargestellt. Weiterhin wurde ein Referenzreaktor ohne Enzymzugabe betrieben.

Tabelle 3: Enzymdosierung während der quasi kontinuierlichen Versuche

Zeitraum	Cellulase/Hemicellulase g/kg _{oTM}	Protease g/kg _{oTM}	Pektinase g/kg _{oTM}
Woche 1	7	2	0,5
Woche 2	5	1	0,35
Woche 3	3	0,5	0,2
ab Woche 6	1	0,5	0,2

Viskosität

Im Rahmen der quasi-kontinuierlichen Versuche wurde, zur Beurteilung des Enzym Einflusses auf die Viskosität des Fermenterinhalt, das Drehmoment der Rührwerke bei konstanter Umdrehungszahl (50 rpm) aufgezeichnet.

Enzymkinetische Versuche mittels eines Cellulase/Hemicellulase-Komplex

Im Rahmen dieses Untersuchungsschwerpunktes wurden mittels HPLC Metabolite aus dem enzymatischen Polysaccharidabbau nachgewiesen, um die Aktivität der Enzympräparate in Abhängigkeit von der Enzymkonzentration, dem pH-Wert und der Temperatur zu bestimmen. Die Untersuchungen erfolgten mit variiert Enzymkonzentration (2, 5 und 10 g/kg oTM Cellulase/Hemicellulase) bei einer Temperatur von 40 °C und einem pH Wert von 4,6 (eingestellt mit Acetatpuffer). Die Inkubationszeit betrug eine bzw. zwei und drei Stunden, in der ersten Stunde wurde alle 15 min eine Probe entnommen. Die Geschwindigkeit der Zuckerbildung in den gepufferten Suspensionen wurde als Glukose ermittelt.

Ergebnisse & Diskussion

Diskontinuierliche Gärversuche

Abbildung 1 zeigt den Einfluss der Enzymzugabe auf die Methanausbeute. Als Enzyme kamen dabei ein Cellulase/Hemicellulase-Komplex, eine Protease sowie eine Pektinase zum Einsatz. Es wird deutlich, dass die direkte Zugabe der hydrolytischen Enzyme (Cellulase/Hemicellulase Komplex, Protease, Pektinase) in der empfohlenen Dosierung keine relevante Steigerung der spezifischen Biogasbildung erzielt. In einer weiteren Versuchsreihe wurde versucht, die Wirkung einer externen Enzymvorbehandlung der Substrate auf die spezifische Biogasbildung im diskontinuierlichen Gärtest nachzuweisen. Wie in den vorangegangenen Versuchen mit direkter Enzymzugabe (siehe Abbildung 1) konnten in dieser Versuchsvariante ebenfalls keine relevanten Steigerungen der Biogasbildung durch die Enzymvorbehandlung beobachtet werden.

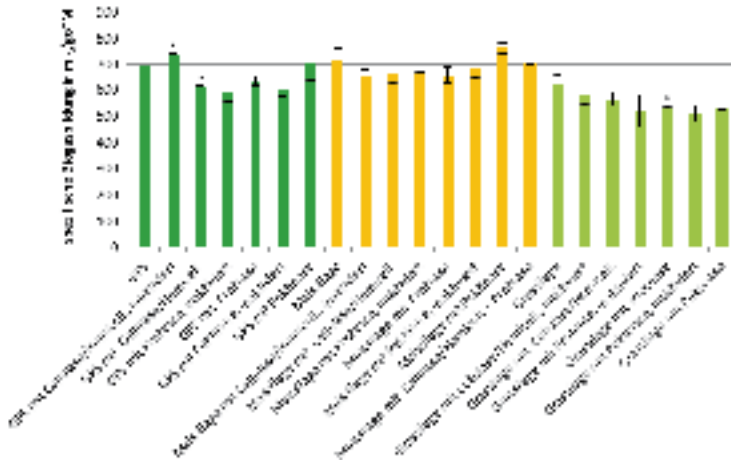


Abbildung 1: Ergebnisse der diskontinuierlichen Gärversuche mit direkter Enzymzugabe. (n=3, Abweichungen aufgrund von technischen Ausfällen sind mit* gekennzeichnet).

Quasi-kontinuierliche Gärversuche

Abbildung 2 zeigt die Methan-ertrag von Wintergerste-GPS und Rindergülle. Die direkt in die Fermenter dosierten Enzyme führten bei dieser Versuchsreihe zu keiner relevanten Steigerung der Methan-ertrag im Vergleich zum Referenzreaktor.

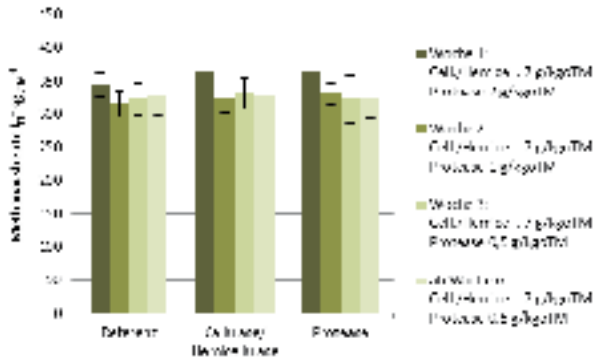


Abbildung 2 Einfluss der Enzyme auf die Methan-ertrag bei der Vergärung von Wintergerste-GPS und Rindergülle (HRT: 60 d, B=3,0 g/(l*d)) im Vergleich zur enzymfreien Referenz.

Weitere, hier nicht dargestellte ermittelte Prozessparameter wie z.B. spezifische Biogasbildung, FOS/TAC und $\text{NH}_4\text{-N}$, zeigten ebenfalls keine Unterschiede zwischen den behandelten und unbehandelten Varianten. In den quasi-kontinuierlichen Gärversuchen mit Maissilage konnten geringfügige Anstiege in der Methanausbeute beobachtet werden. Unabhängig von der Art des Enzyms wurde in den ersten zwei Wochen der Enzymzugabe zunächst eine Abnahme der Methanausbeute im Vergleich zu der Zeit vor dem Enzymeinsatz beobachtet (siehe Abbildung 3). Ab Woche 3 des Enzymeinsatzes stieg die Methanausbeute an. Grund dafür kann ein Verzögerungseffekt der Enzymwirkung sein. Die ermittelten Methanausbeuten von Maissilage waren beim Einsatz des Cellulase/Hemicellulase-Komplexes am höchsten. Dieser in Kombination mit Protease brachte im Vergleich dazu geringere Ausbeuten. Die Applikation der Pektinase zeigte die geringste Methanausbeute. In den Reaktoren mit Wintergerste-GPS und Rindergülle (siehe Abbildung 4) konnte eine derartige Steigerung der Methanausbeute nach Zugabe der Enzyme nicht beobachtet werden. Allerdings ist ein direkter Vergleich beider Versuchsdurchführungen schwierig, da in den jeweiligen Versuchsansätzen auf unterschiedliche Referenzen zurückgegriffen wird. Während im einen Fall ein Referenzreaktor betrieben wird, dienen im anderen Fall die Daten vor der Enzymzugabe als Referenzbasis.

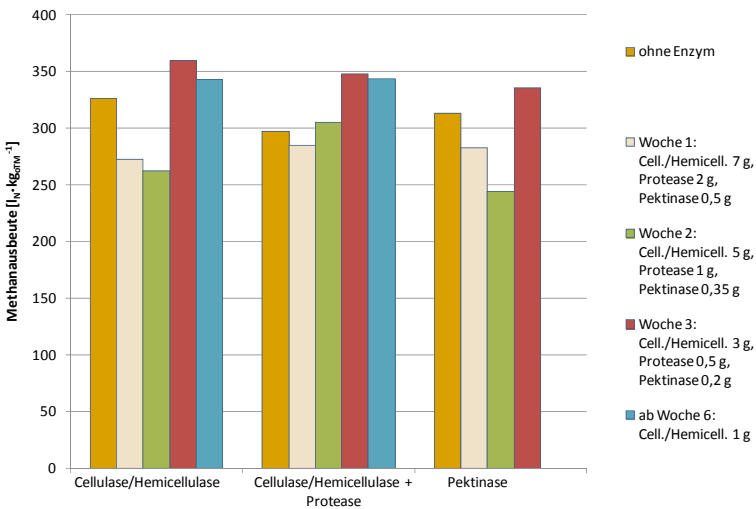


Abbildung 3: Einfluss der Enzyme auf die Methanausbeute bei der Vergärung von Maissilage und Rindergülle [HRT: 60 d, $B=3,0 \text{ g}/(\text{l} \cdot \text{d})$].

Der untersuchte viskositätssenkende Einfluss der Enzyme auf die Viskosität des Fermenterhalts konnte im Rahmen der quasi kontinuierlichen Versuche nicht nachgewiesen werden. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse exemplarisch für die Versuche mit Wintergerste GPS und Rindergülle dargestellt.

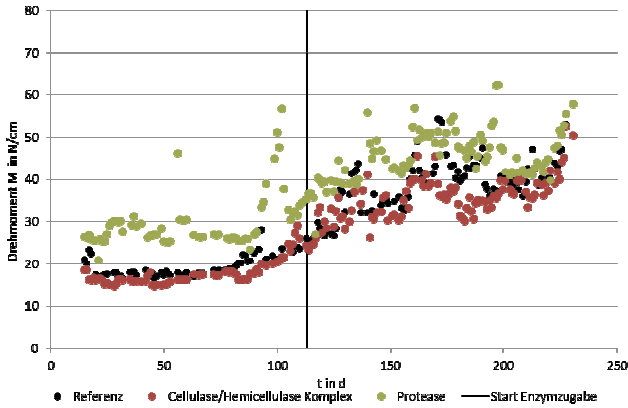


Abbildung 4: Einfluss der zugegebenen Enzyme auf Drehmoment der Rührwerke in den quasi- kontinuierlichen Versuchen mit Wintergerste GPS und Rindergülle.

Es ist kein Unterschied zwischen der Referenz und den Reaktoren mit Enzymzugabe erkennbar. Der in Abbildung 4 sichtbare Anstieg des Drehmoments der Rührwerke, ist auf den steigenden TM-Gehalt im Fermenter sowie sich am Rührwerk angesammelte Faserbestandteile des Substrates zurückzuführen.

Substratfreisetzungsversuche

Die Untersuchungen der Enzymkinetik des Cellulase/Hemicellulase-Komplexes (siehe Abbildung 5) zeigt eine Zunahme der Zuckerfreisetzung aus Maissilage mit steigender Enzymkonzentration. Bei einer Inkubationszeit von 180 min wurde die maximale Konzentration an freien Zuckern gemessen. Die höchste Freisetzung von Glukose wurde bei einer Enzymkonzentration von $10 \text{ mg/g}_{\text{oTM}}$ beobachtet.

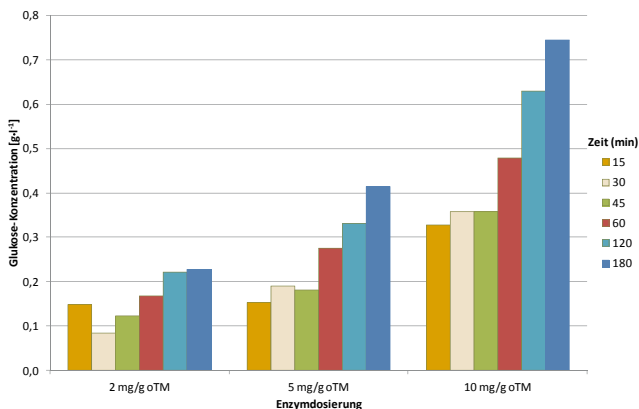


Abbildung 5: Freisetzung von Glukose aus Maissilage bei unterschiedlichen Inkubationszeiten in Abhängigkeit von der Enzymkonzentration, T: $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pH Wert: 4,6.

Diskussion

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse können mehrere Vermutungen für den bisher fehlenden Nachweis der effizienzsteigernden Wirkung von Enzymen im Labormaßstab diskutiert werden. Eine Möglichkeit kann in der Hemmung der Enzyme im Fermenter gesehen werden. Dies kann zum einen eine Folge des heterogenen Fermenterinhalts und darin möglicherweise vorliegenden unbekanntem Hemmstoffen sein. Zum anderen kann sich der pH-Wert im Fermenter ($\sim 7,6$) negativ auf die Aktivität der Enzyme, wie z.B. auf den eingesetzten Cellulase/Hemicellulase Komplex mit einem pH-Wert Optimum im Bereich von 4,5-6,0 (Herstellerangaben) auswirken. Ein weiterer Erklärungsansatz ist im mikrobiellen Abbau der Enzyme bzw. in der Kombination aus Hemmung und mikrobiellen Abbau zu sehen. Unabhängig von diesen beiden Möglichkeiten kann noch eine weitere Überlegung in Betracht gezogen werden. Diese bezieht sich auf den Abbau der Substrate im Fermenter bzw. die, den Abbau beeinflussende Verweilzeit eines Biogasfermenters. Die eingesetzten hydrolytischen Enzyme katalysieren spezifische Reaktionen der Hydrolyse. Daher kann nur unter bestimmten Umständen mehr Substrat aufgespalten und damit mehr Biogas gebildet werden. Dies gilt theoretisch für folgende Fälle:

1. die Verweilzeit im Fermenter ist zu niedrig um die verfügbaren Substrate durch die Bakterien allein abzubauen, die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit führt zu einem erhöhten Substratumsatz in kürzerer Zeit
2. die eingesetzten Enzyme sind generell in der Lage mehr bzw. anderer Substrate als die im Fermenter enthaltenen (Enzyme der) Bakterien aufzuspalten

Insbesondere aus dem zweiten Punkt folgt, dass der Einsatz von hydrolytischen Enzymen in Biogasreaktoren mit hohen Verweilzeiten bzw. gut hydrolysierbaren Substraten nicht unbedingt zur Erhöhung der Biogausausbeute beitragen muss, da in diesem Fall ohne zusätzliche Hilfsmittel ein guter Substratabbau gewährleistet werden kann. Die beiden genannten Fälle werden in Abbildung 6 veranschaulicht [6,7].

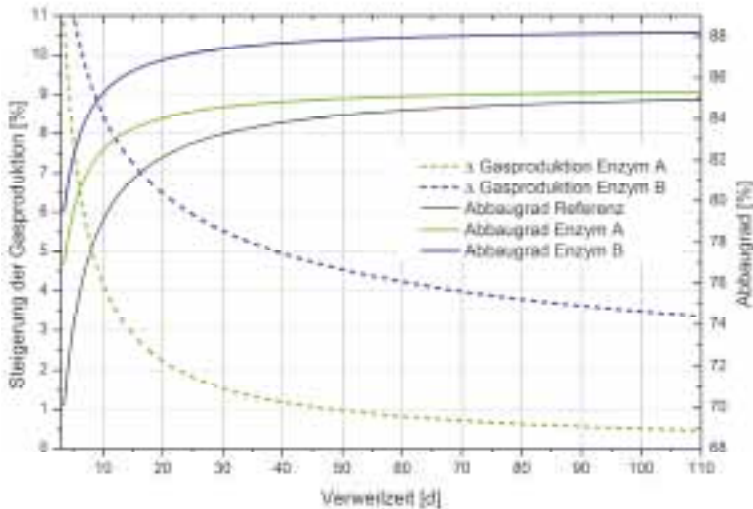


Abbildung 6: Prozentuale Steigerung der Gasproduktion durch Enzymeinsatz sowie Vergleich der Substratabbaugrade in Abhängigkeit der Verweilzeit. Enzym A veranschaulicht eine erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit, Enzym B zeigt den Effekt beim Abbau von zusätzlichem Substratbestandteilen, berechnet mit Hilfe des „DBFZ-Biogas Modell“ [7], [8].

Wird wie in Abbildung 6, für die Hydrolyse eine Reaktion erster Ordnung angenommen, stellt die Zugabe von Enzymen in einen Biogasreaktor die Erhöhung der Geschwindigkeitskonstante der Reaktion dar. Bei hinreichend langer Verweilzeit führt diese Erhöhung, wie für den Abbaugrad durch Enzym A in Abbildung 6 veranschaulicht, nur noch zu einem geringen Anstieg des Substratumsatzes bzw. der Gasausbeute. Im Falle von Enzym B in Abbildung 6 führt der Enzymeinsatz zu einer, direkt von der Menge an zusätzlich umgesetztem Substrat abhängigen, Steigerung der Biogasproduktion.

Zusammenfassung

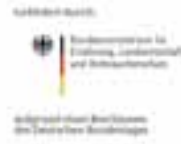
Die in diesem Beitrag vorgestellten, ersten Ergebnisse des Verbundvorhabens „BiogasEnzyme“ zeigen im Rahmen von diskontinuierlichen und quasi-kontinuierlichen Versuchen im Labormaßstab keine bzw. nur geringe effizienzsteigernde Effekte des Einsatzes hydrolytischer Enzyme auf die Biogasbildung, die Methanausbeute und die Viskosität. Außerhalb des Biogasprozesses konnte im Rahmen von enzymkinetischen Untersuchungen die Aktivität eines, in den Gärversuchen eingesetzten Cellulase/Hemicellulase-Komplexes anhand der Glukosefreisetzung aus Maissilage nachgewiesen werden. Für den derzeit fehlenden Nachweis der Erhöhung der Effektivität des Biogasprozesses durch den Einsatz hydrolytischer Enzyme können Punkte wie die Hemmung der Enzyme (z.B. pH Wert, unbekannte Hemmstoffe), der mikrobieller Abbau der Enzyme sowie optimaler Substratabbau in den untersuchten Fermentern bzw. bei den gewählten Prozessparametern ($HRT\ 60\ d$, $B_R=3,0\ g_{OTM}/(l*d)$) als Ursachen vermutet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Suárez Quiñones, Teresa; Plöchl, Matthias; Budde, Joern; Heiermann, Monika: Do hydrolytic enzymes enhance methane formation of agricultural feedstock. In: *Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science, Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft*. Erding : Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009, S. 137-149.
- [2] Hilde, Annika; Plöchl, Matthias; Heiermann, Monika; Budde, Joern; Suárez Quiñones, Teresa; Prochnow, Anette: Weniger Rühren durch Enzyme? In: *Biogas Journal* Bd. 4 (2010).
- [3] Suárez Quiñones, Teresa; Suárez, Ploechl, Matthias ; Budde, Joern ; Heiermann, Monika: Enhanced Methane Formation through Application of Enzymes: Results from Continuous Digestion Tests. In: *Energy & Fuels* Bd. 25 (2011), Nr. 11, S. 5378-5386.
- [4] Kretzschmar, Joerg; Mueller, Liane: Hydrolytic enzymes within the process of biogas production. In: *EU BC&E Proceedings 2012*. Mailand, 2012. ISBN 978-88-890407-54-7, S. 679-682.
- [5] Brulé, J. ; Vogtherr, M. ; Lemmer, A. ; Oechsner, H. ; Jungbluth, T.: Effect of enzyme addition on the methane yields of effluents from a full scale biogas plant. In: *Landtechnik* Bd. 66 (2011), Nr. 1.
- [6] Schumacher, Britt; Hofmann, Josephine ; Pröter, Jürgen: Verfahrensüberblick zur Desintegration von Biomasse. In: *Biogas Journal* Bd. 1 (2012).
- [7] Schumacher, Britt; Mauky, Eric; Pröter, Jürgen: Einsatz von Desintegrationsverfahren in der Biogastechnologie - Ein Verfahrensüberblick. In: BECKMANN, D. ; MEISTER, M. (Hrsg.): *Technische Systeme für die Lebenswissenschaften – 16. Heiligenstädter Kolloquium*. Heiligenstadt, 2012. ISBN 978-3-00-039458-4, S. 101-107.
- [8] Mauky, Eric; Fritsche, Barbara; Schreiber, André; Liebetrau, Jan; Schmidt, Thomas: Robustes Prozessmodell zur dynamischen Simulation der anaeroben Fermentation, *DBFZ Report Nr. 8*. Leipzig : Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2011.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter den Förderkennzeichen 22027707, 22006510, 22027608, 22028008, 22027808, 22027908 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Projektpartner im Verbundvorhaben sind das Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V. (ATB), das Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. (PFI), das Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ), die ASA Spezialenzyme GmbH, die Archea Service GmbH und die BiogasNord AG.



Vergleichende Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren - mikrobiologische, verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung und Optimierung

Hilke Würdemann^{*1}, Antje Kleyböcker¹, Tobias Lienen¹, Marietta Liebrich¹, Manuel Brehmer², Matthias Kraume², David Balussou³, Russell McKenna³, Lucie Moeller⁴, Kati Görsch⁴, Roland Müller⁴, Andreas Zehnsdorf⁴, Doren Zirkler⁵, Martin Kaupenjohann⁵

¹ Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

² Technische Universität Berlin, Fachgebiet Verfahrenstechnik (TU Berlin, VT)

³ Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

⁴ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig (UFZ)

⁵ Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bodenkunde (TU Berlin, BK)

Adresse: Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ)

Telegrafenberg, 14473 Potsdam

*E-Mail: wuerdemann@gfz-potsdam.de

Abstract

Für eine verstärkte Verwertung von Rest- und Abfallstoffen in Biogasanlagen wird ein zuverlässiges, technologisch flexibles System benötigt, da Substratumstellungen Störungen wie Übersäuerung, Schaum und Schwimmschichten verursachen können, die die Durchmischung und/oder die effektive Ausnutzung der Anlage beeinträchtigen. Zudem treten aufgrund unvorteilhaft geregelter Umwälzungen, Dosier- und Abzugseinheiten in Biogasanlagen regelmäßig Kurzschlussströme auf. Eine Tracerstudie zeigte, dass im Extremfall bis zu 72 % des zugeführten Substrats direkt nach einer Dosierung unvergoren wieder abgeführt wurde. Im Durchschnitt lagen die Verluste in den untersuchten Anlagen zwischen 16 % und 33 % der maximalen Methanausbeute.

Als Beitrag zur Steigerung der Anlageneffizienz wurden verschiedene Prozessstörungen an großtechnischen Biogasanlagen analysiert sowie in Laborfermentern simuliert, um den Prozess unter kontrollierten Bedingungen zu studieren und Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Es wurde ein Frühwarnindikator entwickelt, der bereits zwischen drei und sieben Tagen vor dem Eintreten auf eine Übersäuerung hinweist. Dieser Zeitraum ist für die Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Stabilisierung des Prozesses ausreichend. Unter Einsatz des Indikators wurde eine stufenweise Erhöhung der Raumbelastung vorgenommen. Dabei diente der Frühwarnindikator zur Steuerung der Additiv-Zugabe. In verschiedenen Laborversuchen konnten Raumbelastungen von 6,0 und 9,5 kg_{oTS} m⁻³ d⁻¹ mit Fettanteilen von bis 87 % bei Methanausbeuten von 0,9 m³ kg_{oTS}⁻¹ erfolgreich gefahren werden. Zwischen zwei Erhöhungen der Substratfracht erwies sich ein Zeitintervall von acht Tagen als notwendig, um die Methanausbeute im Erwartungsbereich zu halten. Eine Übertragung des entwickelten Steuerungsverfahrens auf den großtechnischen Maßstab und seine Erprobung in der Praxis stehen noch aus.

Um die Betriebserfahrungen der Betreiber in Bezug auf die Schaumbildung einzubeziehen wurde eine Umfrage durchgeführt. Circa 80 % der befragten Betreiber waren wenigstens einmal von einem Schaumereignis betroffen. Eigene Laboruntersuchungen deuten darauf hin, dass Proteine und Polysaccharide eine wesentliche Rolle in der Bildung bzw. Stabilisierung von Schaum im Biogasreaktor spielen. An einer mit Klärschlamm und Fett beschickten Biogasanlage wurde ein Schaumereignis untersucht. Genetische Fingerprint-Analysen zur Charakterisierung der mikrobiellen Biozönose der im Winter zur Schaumbildung neigenden Anlage wiesen auf die Beteiligung des fädigen Candidatus *Microthrix parvicella* an der Schaumbildung bzw. Schaumstabilisierung hin. Eine Langzeitbeobachtung des betroffenen Reaktors zeigte jahreszeitliche Änderungen der Abundanz von *M. parvicella*, die mit der Umgebungstemperatur und der Zufuhr von Fett als Co-Substrat korrelierte. In der Praxis wäre nun zu überprüfen, inwieweit durch eine Temperaturerhöhung die Schaumbildung im Winter eingeschränkt bzw. vermieden werden kann.

Eine ökonomische Betrachtung zeigte, dass unter den aktuellen Rahmenbedingungen die Verstromung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen die wirtschaftlichste Alternative ist. Prozesshemmungen, wie Übersäuerung oder Schaumbildung, haben einen negativen Einfluss auf die ökonomische Bilanz der Anlagen. Im Fallbeispiel (Übersäuerung einer Abfallanlage) lagen die Verluste bei 5,7 ct/kWh_{el}. Auf Basis der ökonomischen Analyse wurden auch die CO₂-Vermeidungskosten berechnet. Es zeigte sich, dass Biogasanlagen, die Gülle mit Bioabfällen co-vergären, am nachhaltigsten arbeiten, da sich die CO₂-Vermeidungskosten auf nur etwa 100 €/t_{CO₂-Äq.} belaufen.

Schlagwörter: Durchmischung, Tracerstudie, Frühwarnindikator, Übersäuerung, Prozessstabilisierung, Schaum, Ökonomische Bewertung

Einleitung

Sowohl aus ökologischen Gründen als auch unter dem Aspekt der Nutzung heimischer Ressourcen ist eine effiziente Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen von großer Bedeutung. Aufgrund saisonaler und markttechnisch bedingter Schwankungen in Bezug auf die Substratverfügbarkeit und im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung von Reststoffen ist eine technologisch flexible Biogasanlage notwendig, um Prozessstörungen zu vermeiden. Jede Substratumstellung kann Prozessstörungen wie Schaumbildung, Schwimmschichtenbildung und Übersäuerung im Biogasreaktor verursachen. Diese Störungen können zu wochenlangen Ausfällen der Biogasproduktion führen, die die Anlage nicht nur in eine wirtschaftlich bedrohliche Situation führen, sondern sich auch negativ auf die Ökobilanz auswirken. Ein wesentliches Entwicklungshemmnis für die effiziente Nutzung von organischen Reststoffen sind die noch nicht im Detail erforschten Mechanismen, die den Prozessstörungen zugrunde liegen. Ein umfassenderes Prozessverständnis in Bezug auf die Mikrobiologie und die Verfahrenstechnik in Biogasanlagen ist eine notwendige Voraussetzung für die Etablierung effizienter Verfahren. Ziel der Untersuchungen des Forschungsverbundes ist daher die Entwicklung eines Frühwarnsystems für den gezielten Einsatz von Additiven als zeitnah wirksame Steuerungsmöglichkeit zur Vermeidung von Prozessstörungen und zur Etablierung eines Hochleistungsbetriebs. Hierfür wurden Untersuchungen an verschiedenen großtechnischen Biogasanlagen und begleitende Untersuchungen im Labormaßstab in folgenden Themenbereichen durchgeführt:

- Übersäuerung (GFZ, TU Berlin VT)
- Schaumbildung (UFZ, GFZ, TU Berlin VT)
- Schwimmschichtenbildung (GFZ, TU Berlin VT, UFZ)
- Fluidodynamik
 - Durchmischung und Verweilzeitbestimmung (GFZ, DBFZ)
 - Optimierung der Rührtechnik und Rührbedingungen(TU Berlin VT)
- Ökonomie (KIT) und Ökologie (TU Berlin BK, DBFZ)

Charakterisierung der Durchmischung in Biogasanlagen

Zur Bestimmung des Verweilzeitverhaltens in Biogasanlagen wird das Substrat mit einer definierten Menge eines Tracers (Uranin) markiert und anschließend die Zeitspanne bis zum Nachweis des Tracers im Output der Anlage und der Verlauf der Konzentrationsabnahme bestimmt. Tracerstudien liefern zudem auch Aufschluss über das Zusammenwirken von Fermenter- und Rührwerksdesign sowie der Rührwerksbetriebsweise. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde die Durchmischung an zwei großtechnischen Biogasanlagen charakterisiert. Die Ergebnisse der Tracerstudie konnten mit Hilfe von Modellen, die eine Kompartimentierung im Reaktor simulieren, erfolgreich abgebildet werden. Das Verweilzeitverhalten der füllstandsgeregelten Reaktoren war abhängig davon, zu welchem Zeitpunkt nach der Substratzufuhr der Gärrestabzug ausgelöst wurde. Im Extremfall wurden bis zu 72 % des zugeführten Substrats direkt nach einer Dosierung abgezogen und verminderten entsprechend die Methanausbeute (Kleyböcker et al. 2007). An einer großtechnischen Biogasanlage führte das im Durchschnitt zu einer um 33 % (Reaktor 1) bzw. 16 % (Reaktor 2) verringerten Methanausbeute.

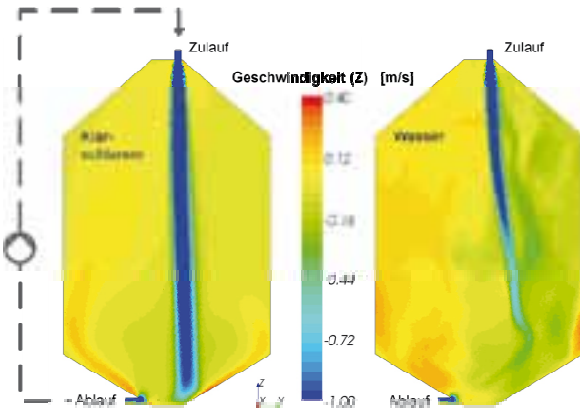


Abbildung 1: Momentaufnahme des Strömungsprofils in einer großtechnischen Biogasanlage unter Zugrundelegung der Viskosität von Klärschlamm (links) und Wasser (rechts).

Bei Untersuchungen an einer weiteren Anlage zeigte der in der Umwälzung beobachtete Verlauf der Tracerkonzentration, dass Substrat und Tracer schon 5 min nach Dosierung den Reaktor von oben nach unten über eine Distanz von ca. 30 m durchströmt hatten. Im Rahmen einer CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) zur Abbildung des Strömungsverhaltens wurden die auftretenden Stagnationszonen lokalisiert und visualisiert. Der Einfluss des Viskositätsverhaltens des Klärschlamms auf das Geschwindigkeitsprofil im Vergleich zu dem von Wasser wurde in Abbildung 1 dargestellt. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder wurde dabei auf die unter Einsatz eines laminaren Strömungsrohrs experimentell ermittelten rheologischen Werte des Gärsubstrats zurückgegriffen. CFD-Simulationen ohne Berücksichtigung der komplexen Rheologie würden daher zu erheblichen Fehlern führen (Brehmer et al. 2011). Um Produktionsausfälle durch defekte Rühr-

werke und kostspielige Reparaturen zu vermeiden, werden zunehmend externe Pumpen für die Umwälzung der Gärsubstrate eingesetzt. Wie die CFD-Simulation und die Tracerstudie zeigten, steht dem Vorteil einer vereinfachten Wartungsmöglichkeit das erhöhte Risiko einer Ausbildung von größeren Stagnationsvolumina und somit einer deutlich reduzierten Methanausbeute entgegen.

Ein Vergleich der gemessenen Tracerkonzentrationen im Ablauf des Biogasreaktors mit den berechneten Konzentrationen am Auslass eines ideal durchmischten Rührkessels zeigte, dass die Durchmischung des Biogasreaktors unter Annahme einer Stagnationszone (62,5 % des Reaktorvolumens) und einer dynamischen Zone (37,5 % des Reaktorvolumens) simuliert werden kann. In der dynamischen Zone führte die niedrige Verweilzeit von etwa vier Tagen zu einem vorzeitigen Substrataustrag. Dem Modell entsprechend werden 19 % des täglich zugeführten Substrates innerhalb eines Tages wieder abgeführt. Wäre der Reaktor dagegen ideal durchmischt, würden nur 11 % des frischen Substrats ausgetragen werden. Dementsprechend gehen an dieser Anlage täglich 8 % des Substrats zur Erzeugung von Energie verloren (Kleyböcker et al. in prep.).

Frühwarnindikatoren zur Vermeidung von Prozessstörungen unter Einsatz von Additiven

Zur Entwicklung eines Frühwarnindikators wurden Übersäuerungen durch Substratüberfrachtungen im Labormaßstab gezielt herbeigeführt. Während der Übersäuerung konnten deutliche Änderungen der Verläufe verschiedener Parameter wie der Gasproduktion, dem pH-Wert, den Gaskomponenten (CH_4 , CO_2 , H_2) und den kurzkettigen Säuren (CH_2O_2 bis $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_2$) beobachtet werden. Als Steuergröße im Hinblick auf die Prozessstabilität sind die Parameter weniger geeignet, weil sie erst eindeutig auf eine Überfrachtung des Systems hinweisen, wenn die Übersäuerung bereits erfolgt ist (Kleyböcker et al. 2012b). Die in Untersuchungen des GFZ entwickelten Frühwarnindikatoren (Phosphat in der wässrigen Phase [FWI-PO4]); Verhältnis organischer Säuren zu Calcium (FWI-VFA/Ca, Patentschrift: DE102008-044204A1: Verfahren zur Prozesssteuerung von Bioreaktoren) haben sich als geeignete Parameter für die Anzeige der Gefahr einer Übersäuerung in zwei Biogasanlagen erwiesen, die Klärschlamm und Fette als Substrat verwendeten (Kleyböcker et al. 2012b). Der Frühwarnindikator (FWI-VFA/Ca) zeigte zwischen drei und sieben Tage vor dem Eintreten die Gefahr einer Übersäuerung an. In Abbildung 2 wurde ein typisches Beispiel für den Verlauf dargestellt. Dieser Zeitraum erwies sich für die Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Stabilisierung des Prozesses als ausreichend. Der FWI-VFA/Ca konnte in Verbindung mit dem Einsatz von Additiven zur erfolgreichen Erhöhung der Raumbelastung genutzt werden (Kleyböcker et al. 2012a). Hierbei stellte sich heraus, dass eine Zugabe von Calciumoxid (CaO) den Prozess besonders nachhaltig stabilisiert. Aufgrund seiner Flockungseigenschaft trägt es zur Bildung von Aggregaten bei, die im Wesentlichen aus Calcium, Phosphat und organischem Kohlenstoff (vor allem langkettige Fettsäuren und extrazelluläre polymere Substanzen [EPS]) bestehen. Durch die Festlegung von organischen Säuren spielten die Aggregate eine entscheidende Rolle bei der Prozessstabilisierung, weil hierüber die Verfügbarkeit langkettiger Fettsäuren reguliert und damit offensichtlich ihre inhibierende Wirkung vermindert wurde. Die Aggregate fungierten als eine Art „Puffer“ im Reaktor und förderten gleichzeitig auch die Kompartimentierung im voll durchmischten Reaktor (Kleyböcker et al. 2012a). Die mit der Aggregatbildung einhergehende schnelle Abnahme der Konzentration der lang- und kurzkettigen Säuren trotz niedrigem pH-Wert und zu hohem Wasserstoffpartialdruck ($> 0,1$ mbar) weist auf die ent-

scheidende Bedeutung der Aggregatbildung für die Stabilisierung des Prozesses hin. Offensichtlich entstanden infolge der Aggregatbildung Mikrohabitats, in denen die Acetogenese und die Methanogenese bereits abliefen, während diese Prozesse in der wässrigen Phase noch gehemmt waren. Untersuchungen zur Zusammensetzung der kurzkettigen organischen Säuren während einer Übersäuerung zeigten, dass sich stets zuerst Essigsäure und dann Propionsäure akkumulierte. Die beiden Säuren bildeten den größten Anteil der kurzkettigen organischen Säuren (> 50 %). Gleichzeitig war jede Übersäuerung von einer starken Zunahme der Phosphatkonzentration gekennzeichnet, die auf die Freisetzung des gespeicherten Polyphosphats durch Phosphat-akkumulierende Mikroorganismen (PAO) zurückgeführt werden kann (Kleyböcker et al. 2012a).

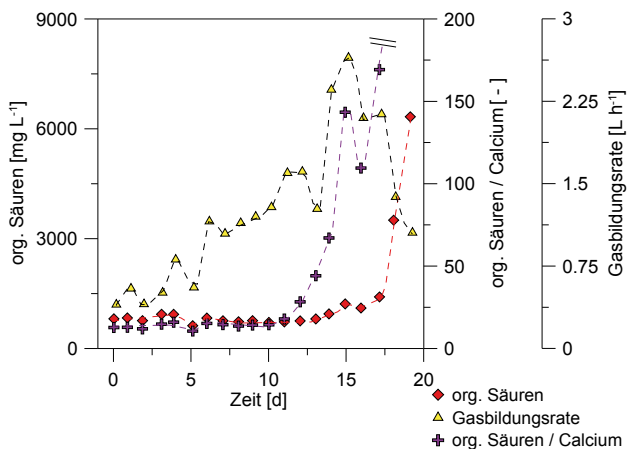


Abbildung 2: Organische Säuren, Gasbildungsrate und das Verhältnis der organischen Säuren zu Calcium vor und während einer kontrolliert herbeigeführten Übersäuerung als typisches Beispiel für den Konzentrationsverlauf.

Fingerprinting-Analysen wiesen nach, dass verschiedene Vertreter der PAO im Gär Schlamm vorhanden waren (*Dechloromonas* sp. und *Candidatus Accumulibacter phosphatis*, Liebrich et al. 2012). Außerdem zeigten die Verläufe von Essigsäure, Propionsäure und Phosphat stets einen ähnlichen Trend. Essig- und Propionsäure dienen den PAO während der Phosphatrücklösung als Substrat. Sind die Säuregehalte hoch, ist genug Substrat für die Phosphatrücklösung vorhanden, hingegen wird bei niedriger Säurekonzentration weniger Phosphat zurückgelöst. Im Rahmen des Projektes konnten zwei Frühwarnindikatoren entwickelt werden, die sich zur Steuerung der Additivzugabe zur Vermeidung von Übersäuerungen im Rahmen verschiedener Laborversuche eigneten. Eine Anwendung des Systems in der Praxis steht noch aus.

Schaumbildung im Biogasreaktor - Praxiserfahrungen

Eine Umfrage unter 15 Biogasabfallanlagen-Betreibern aus Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen machte die hohe Relevanz des Problems Schaumbildung deutlich: 80 % der Betreiber hatten bereits Erfahrungen mit übermäßiger Schaumbildung und den daraus resultierenden Betriebsstörungen im Biogasreaktor. Zwei Betreiber beschrieben Schaumbildung in der biologischen Entschwefelungsstufe. Lediglich ein Betreiber gab an, noch nie Probleme mit Schaum im Biogasreaktor gehabt zu haben (Moeller et al. 2012a). Bisher gibt es keine ausreichenden Erfahrungen zur Prognose von Schaumereignissen und deren Auswirkungen. Neben Ereignissen mit geringeren Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb berichtete ein Abfallanlagenbetreiber von einer extrem starken Schaumbildung, die zur Zerstörung der Dachkonstruktion seiner Biogasanlage führte und letztendlich Kosten von rund 500.000 Euro verursachte.

Folgende Gründe wurden von den Betreibern als Ursachen für die Schaumbildung angenommen: plötzlicher Temperaturanstieg, Überfütterung, Nährstoffmangel sowie ungünstiges Rührmanagement. Am häufigsten wurde die Verwendung von „risikoreichen“ Substraten wie Schlachtabfälle, Molkereiabwasser, verunreinigte Fettabscheiderinhalte, Papierfaserstoffe und Klärschlämme, die fadenförmige Mikroorganismen beinhalten, in Zusammenhang mit Schaumbildung genannt.

Eigene Laboruntersuchungen von unterschiedlichen Biogasschäumen zeigten, dass vier von elf untersuchten Schaumproben erhöhte Proteingehalte im Vergleich zum Gärmaterial besaßen. Während bei einer Biogasanlage der Proteingehalt im Gärmaterial bei 3 g/L lag, war er mit 5,7 g/L im Schaum um etwa den Faktor zwei höher. Dies deutet auf eine wesentliche Rolle des Proteingehalts bei der Schaumbildung hin (Moeller et al. 2012b). Außerdem wurde eine erhöhte Konzentration von Ölsäure im Schaum einer weiteren Biogasanlage nachgewiesen (38,8 % Ölsäure in Bezug auf die Gesamtkonzentration aller langkettigen Fettsäuren im Schaum vs. 5,5 % Ölsäure im Reaktorinhalt). Die Rolle der Ölsäure im Schaumbildungsprozess ist allerdings bis jetzt nicht geklärt worden. In einem weiteren Schaum war die Konzentration von Kohlenhydraten erhöht. Laborexperimente mit Gärs substrat aus einer stabil laufenden Biogasanlage zeigten, dass hier vor allem Polysaccharide einen Einfluss auf die Schaumbildung haben. Nach Zugabe von 1 % (w/w) Pektin wurde eine Kohlenhydrat-Konzentration von 6,2 g/L im Schaum gegenüber 5,4 g/L im Gärmaterial festgestellt.

Als wirkungsvollste Maßnahmen bei Schaumereignissen wurden von Anlagenbetreibern die sofortige Minderung der Substratzufuhr (sog. Hungerkur), das Abpumpen eines Teils des Gärmaterials und das Verdünnen desselben mit Wasser beschrieben. Die Anpassung des Betriebsmanagements, z. B. durch Zugabe von Spurenelementen oder Veränderung des Rühr- und Fütterungszyklus, führte in manchen Fällen zu einer dauerhaften Lösung eines längerfristig andauernden Schaumproblems.

Schaumbildung in Biogassystemen kann auch durch Zugabe von Antischaummitteln bekämpft werden. Sieben in der Praxis verwendete Antischaummittel wurden hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Biogasprozess untersucht. Es handelt sich um silikonfreie Mehrkomponentensysteme, die langkettige Alkohole, Fettsäuren und ihre Derivate sowie Kieselsäure beinhalten. Sie zeigten in praxisrelevanten Konzentrationen keine negative Wirkung in Bezug auf die Biogasbildung und den Methangehalt.

Vier von sieben Entschäumern wurden co-vergoren und zu Biogas umgesetzt (siehe Tabelle 1). Drei verschiedene Testmethoden zur Prüfung der Effektivität der Antischaummittel zeigten, dass Rapsöl als der am häufigsten verwendete Entschäumer, die schlechteste Wirkung hatte (Moeller et al. in prep.).

Tabelle 1: Einfluss der Antischaummittel (ASM) auf die Biogasbildung (Volumen (V_{Biogas}) entspricht Mittelwert aus drei Parallelansätzen mit der Standardabweichung σ (V_{Biogas}))

	Versuchsdauer [d]	Mit Antischaummittel		Ohne Antischaummittel (Kontrolle)	
		V_{Biogas} [mL _N]	σ (V_{Biogas}) [mL _N]	V_{Biogas} [mL _N]	σ (V_{Biogas}) [mL _N]
ASM 1	42	1.417	26,4	882	95,6
ASM 2	48	984	67,0	935	7,31
ASM 3	23	871	25,3	970	22,6
ASM 4	29	1.587	151	1.115	9,84
ASM 5	19	1.024	3,31	983	9,08
ASM 6	19	964	19,8	983	9,08
Rapsöl	56	2.682	177	1.109	163

Microthrix parvicella als Schaumverursacher in einem Biogasreaktor

Während eines Schaumereignisses wurde eine deutliche Veränderung der Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose in einer Biogasanlage beobachtet, die Klärschlamm zusammen mit Fettsäureabscheiderinhalten vergärt. In allen Reaktoren wurde *Candidatus Microthrix parvicella* mit einem genetischen Fingerprinting-Verfahren (PCR-DGGE [Polymerase-Kettenreaktion Denaturierende Gradienten Gelelektrophorese] mit allgemeinen Primern für Bacteria) nachgewiesen, der dafür bekannt ist, dass er in Klärwerken an der Schaumbildung beteiligt ist. Durch seine fädige Struktur und die Abgabe von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) könnte *M. parvicella* auch die Schaumbildung im Reaktor begünstigt haben. Im schäumenden Reaktor sowie in der Schaumprobe aus diesem Biogasreaktor waren die Banden dieses Bakteriums im Fingerprint-Gelbild erheblich intensiver als in den drei weniger betroffenen Reaktoren. Dieser halbquantitative Befund deutet auf eine ursächliche Beteiligung an der Schaumbildung hin. In einem relativen Quantifizierungsschritt mit Hilfe der quantitativen PCR und einem für *M. parvicella* spezifischen Primer konnten die Ergebnisse verifiziert werden. Relativ zur Menge der gesamten bakteriellen DNA wurde im schäumenden 2. Reaktor der Kaskade und im Schaum mehr DNA von *M. parvicella* gefunden als in nicht-schäumenden Reaktoren (Lienen et al. 2012). Aufgrund seiner Fähigkeit Lipide zu akkumulieren hatte dieser Mikroorganismus vermutlich in dem zur Co-Vergärung von Fetten genutzten Reaktor einen Selektionsvorteil und konnte sich daher im Vergleich zu den Reaktoren ohne Lipidzufuhr besser gegenüber den übrigen Bakterien durchsetzen. Bisher ist allerdings noch wenig darüber bekannt, ob er sich in Biogas-

anlagen vermehren kann, da er sich nur bedingt in Reinkultur kultivieren lässt. Da aus der Literatur bekannt ist, dass *M. parvicella* sensitiv gegenüber höheren Temperaturen ist, wurde der zur Schaumbildung neigende Reaktor über den Zeitraum eines Jahres auf das Vorhandensein von *M. parvicella* analysiert. Das genetische Fingerprinting zeigte, dass er zwar über das ganze Jahr im Reaktor nachweisbar war, sich der relative Anteil in den kälteren Monaten (Oktober bis März) aber deutlich erhöhte. Zur Verifizierung dieser Beobachtung wurde wiederum eine quantitative PCR mit einem für *M. parvicella* spezifischen Primer durchgeführt. Diese Untersuchung bestätigte die Analysen des genetischen Fingerprintings und zeigte ebenfalls eine höhere Abundanz von *M. parvicella* in den kälteren Monaten an. Auf Grundlage dieser Beobachtung wurden Laborversuche zur Temperatursensitivität von *M. parvicella* und zur Vermeidung von Schwimmschichtbildung durchgeführt. Mit Erhöhung der Reaktortemperatur konnte eine Verringerung der Schwimmschicht festgestellt werden. Bereits nach einer geringen Temperaturerhöhung von 6°C nahm das Vorkommen von *M. parvicella* signifikant ab (Lienen et al. in prep.).

Chemische Eigenschaften und Umweltwirkung von Gärresten

Entscheidend für die Nachhaltigkeit der Energieproduktion ist die Schließung von Nährstoffkreisläufen. Die Biomasse sollte deshalb nach der Vergärung zurück auf die Produktionsflächen gebracht werden. Über die chemische Zusammensetzung von Gärrückständen aus Rest- und Abfallstoffen und ihre Wirkung auf den Boden ist bislang jedoch wenig bekannt. Aus diesem Grund wurden die Gärrückstände von verschiedenen Biogasanlagen über ein Jahr monatlich chemisch analysiert (Tabelle 1). Außerdem wurden die Mineralisierung dieser Gärreste und die Nährstofffreisetzung in einem Respirationsexperiment untersucht. Zur Simulation von Pflanzenwurzeln, die die ökologischen Bedingungen im Boden beeinflussen, wurden Anionenaustauscherharze in die Respiration Gefäße integriert.

Die gemessenen Elementkonzentrationen in den Gärresten zeigten starke Schwankungen (Tabelle 1). Die statistische Auswertung ergab, dass über einen Zeitraum von mindestens fünf Monaten integriert werden muss, um verlässliche Mittelwerte zu erhalten (Zirkler et al., 2012a). Gärreste aus Substraten, die Klärschlamm enthielten (K1), zeigten erwartungsgemäß besonders hohe Konzentrationen an Phosphor und Eisen. Die Größenordnungen der Elementkonzentrationen stimmen gut mit den von Pötsch et al. (2004) ermittelten überein. Die Grenzwerte der Abfall- und Klärschlammverordnung (AbfKlärV) für Schwermetalle wurden nicht überschritten.

Die C-Mineralisierung in den Gärresten während des Respirationsexperiments stieg in folgender Reihenfolge an: K1 < Gü < M (Abbildung 3). Die C-Mineralisierung des Gärrestes K1 lag unterhalb der C-Mineralisierung der als Referenz zeitgleich untersuchten Stallmiste. Der höhere Anteil an Schwermetallen in diesem Gärrest kann zu einer Hemmung der Mikroorganismen und deshalb zu einer geringeren Abbaurate führen. Andererseits könnte aber auch ein höherer Abbaugrad infolge des Abbaus in der Kläranlage zu einer geringeren Bioverfügbarkeit des organischen Materials und somit zu einer geringeren C-Mineralisierung geführt haben. In der Variante mit dem Gärrest M wurde dagegen sogar mehr C mineralisiert als zugegeben wurde (fast 120 %). Das bedeutet, dass durch die Zugabe des Gärrestes M mehr bodeneigener Kohlenstoff abgebaut wurde als in der ungedüngten Kontrolle. Dieses Ergebnis ist ein erster Hinweis auf sogenannte Priming-Effekte (verstärkte Mineralisierung der organischen Substanz durch Substratzufuhr) (Zirkler et al. 2012b).

Tabelle 2: Chemische Kenngrößen von Gärresten. Mittelwerte aus über 12 Monate erhobenen Daten. Standardabweichung in Klammern. Gü=Gülle-Gärrest, Kl=Klärschlamm-Gärrest, M=Mais-Gärrest (N, P, K, Ca und Mg in g/kg TM, Cu, Zn, Pb, Cd und Ni in mg/kg TM)

	TM in %	pH	C/N	N	P	K	Ca	Mg	Cu 800 ¹	Zn 2.500 ¹	Pb 900 ¹	Cd 10 ¹	Ni 200 ¹
Gü	3,67	7,76	3-4	57-76	17 (7)	48 (33)	26 (10)	3 (1,6)	115 (44)	387 (44)	16 (15)	0,3 (0,2)	15 (6)
Kl	2,76	7,26	4-5	57-76	26 (5)	15 (4)	25 (4)	4 (0,6)	68 (18)	449 (11)	13 (6)	0,9 (0,5)	22 (7)
M	6,97	7,53	5-6	63-84	10 (5)	62 (24)	18 (6)	5 (1,5)	25 (24)	106 (30)	1,5 (0,9)	0,2 (0,09)	4 (4)
Gärrest Rindergülle ²	4,18	7,96	-	63	10	64	25	9	73	304	6,5	0,6	10
Gärrest Schweine-gülle ²	3,03	7,95	-	120	20	62	36	9	190	865	9	1,8	16

¹ Grenzwert AbfklärV

² Pötsch et al. 2004

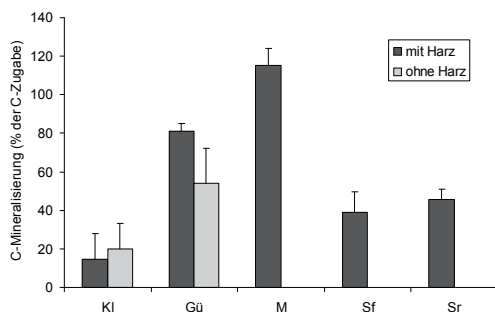


Abbildung 3: C-Mineralisierung normiert auf die C-Zugabe durch Gärrest bzw. Stallmist. Gärrest M und Stallmiste wurden nur mit Austauscherharz inkubiert. Kl = Klärschlamm-Gärrest, Gü = Gülle-Gärrest, M = Mais-Gärrest, Sf = Stallmist frisch, Sr = Stallmist verrottet (Stallmiste dienen als Referenz).

Die Konzentrationen von verfügbarem NO_3^- stiegen durch die Zugabe von Gärrest M gegenüber der Kontrolle um durchschnittlich 60 % und durch die Zugabe von Gärrest Kl um durchschnittlich 80 %. Diese erhöhten Konzentrationen lassen sich dadurch erklären, dass während der Vergärung der organischen Substanz im Biogasreaktor organischer N in anorganischen umgewandelt wurde. Dieses erhöhte Angebot an mineralischem N ergibt dann eine größere NO_3^- -Verfügbarkeit im Boden als beispielsweise beim Stallmist. Auch K und P waren nach Gärrest- aber auch nach Stallmistdüngung in höheren Mengen verfügbar als in ungedüngtem Boden. Phosphor war nach Kl- und Gü-Düngung verfügbarer als nach Sr- (verrotteter Stallmist) oder M-Düngung. Die Versorgung mit K wurde vor allem durch die Gärreste Gü und M gesteigert (Zirkler et al. 2012a).

Die Untersuchungen führen zu dem Schluss, dass aufgrund der hohen Variabilität in der chemischen Zusammensetzung von Gärresten aus Rest- und Abfallstoffen genaue Analysen der Gärreste über längere Zeiträume vor der Ausbringung auf landwirtschaftliche

Nutzflächen notwendig sind. Aufgrund der mit Stallmistern vergleichbaren oder höheren Nährstoffverfügbarkeit eignen sich Gärreste prinzipiell gut als Dünger. Jedoch können sie je nach Ausgangsmaterial auch schnell abgebaut werden und ihre Düngewirkung damit nur kurz- bzw. mittelfristig entfalten. Zur weiteren, naturnäheren Untersuchung der Umweltwirkungen der Gärreste müssen der Einfluss von Pflanzenwurzeln und insbesondere mögliche Priming-Effekte beobachtet werden.

Ökonomische Bewertung

Um die monetären Auswirkungen von Prozesshemmungen zu quantifizieren, wurde eine Praxisanlage ökonomisch bewertet, die aufgrund einer Übersäuerung die Raumbelastung reduzieren musste. Hierzu wurde angenommen, dass die Bioabfallanlage über 100 Tage mit einer um den Faktor zwei verminderten Raumbelastung (Reduktion von 2,5 bis 1,25 kg_{oTR} m⁻³ d⁻¹) arbeitet. Dies hat eine Verminderung der Biogasbildungsrate um 75 % zur Folge. Mit Hilfe einer Kosten-Leistungs-Berechnung wurde die ökonomische Bilanz unter Berücksichtigung der verringerten Raumbelastung berechnet (s. Abbildung 4). Die in die Berechnung eingehenden Leistungen stammen aus den Vergütungen entsprechend dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz-2009 (EEG-2009) für den eingespeisten Strom, sowie aus den Wärmeerlösen und den Vergütungen für die Bioabfallannahme. Die Stromgestehungskosten setzten sich für den Hauptteil aus den investitionsabhängigen Kosten sowie den Wartungs-, Personal-, Durchsatz- und Transportkosten zusammen. Unter Berücksichtigung der Prozesshemmung wurden die spezifischen Erlöse mit ca. 22 ct/kWh_{el} und die Stromgestehungskosten mit ca. 16 ct/kWh_{el} bestimmt. Die Betriebsänderung verursacht im Vergleich zum ungehemmten Zustand einen spezifischen Verlust in Höhe von ca. 6 ct/kWh_{el}.

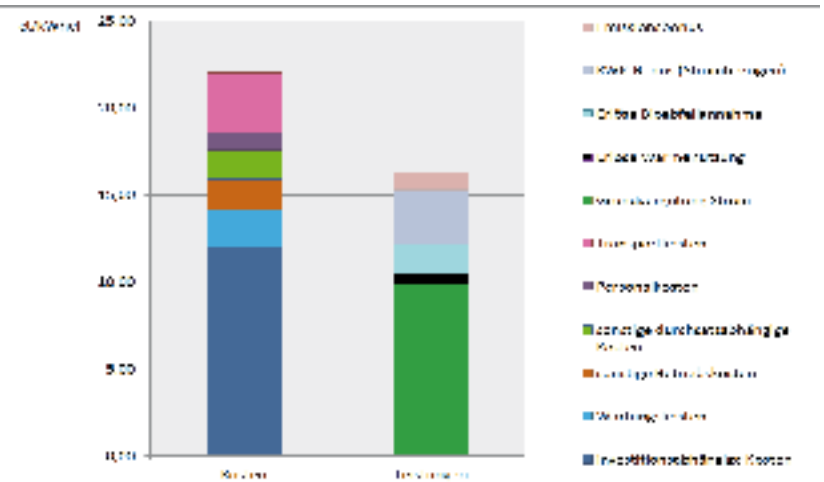


Abbildung 4: Kosten und Leistungen der Bioabfallanlage nach der Betriebsänderung (Mai 2011).

Nachfolgend ist eine Sensitivitätsanalyse unter Abnahme einer konstanten Biogasbildungsrate um 75 % mit den Ergebnisgrößen Stromgestehungskosten, Erlöse und Betriebsergebnis der Anlage bei Variation der jährlichen Betriebsdauer von 0 h bis 7.000 h dargestellt (Abbildung 5). Der schattierte Bereich entspricht der Dauer, in welcher weitere Übersäuerungen auftreten könnten (+/-10% der Dauer der nominalen Prozesshemmung, hier angenommen um ca. 2.500 h laut Anlagenbetreiber).

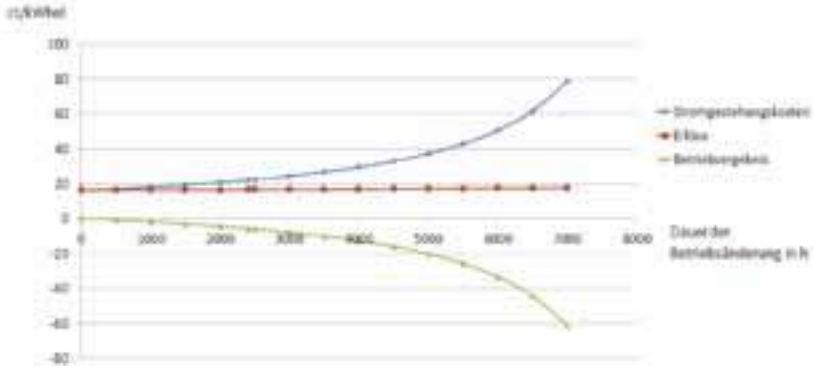


Abbildung 5: Stromgestehungskosten, Erlöse und Betriebsergebnis der Bioabfallanlage in Abhängigkeit der Dauer der Betriebsänderung.

Beitrag des Projekts zu Nachhaltigkeitsaspekten

Für die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten wurden die im Methodenhandbuch des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ (2010) angegebenen Referenzwerte für den deutschen Kraftwerkspark, für Importsteinkohlekraftwerke, neue Erdgas-GuD-Kraftwerke sowie für den Grenzstrom-Mix (Erdgas-GuD- und Importsteinkohlekraftwerke) gewählt. Auf dieser Datenbasis ergeben sich für eine Referenzanlage (NaWaRo2), die 2,15 Mio m³/a Biomethan aus Maissilage und Getreide erzeugt, mit ca. 245 €/t_{CO₂-Äq.} die höchsten CO₂-Vermeidungskosten (Abbildung 6), hauptsächlich aufgrund des hohen THG-Potenzials (ca. 77 g_{CO₂-Äq.}/kWh, Verursacht durch einen Methanschluß während der Biomethanverstromung) im Falle einer Verstromung des erzeugten Biomethans. Für die zwei anderen Referenzanlagen, die 9.000 t/a Bioabfälle, 6.000 t/a Fette, 41.000 t/a Klärschlamm (KS Abfall 2) und 32760 t/a Speisereste, Tierblut, Flotatschlamm, Melasse, 22.675 m³/a Rindergülle (Gülle-Abfall) co-vergären, liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei ca. 240 bzw. 105 €/t_{CO₂-Äq.}. Im Falle eines nicht abgedeckten Gärrestlagers für die Referenzanlage Gülle-Abfall würden die CO₂-Vermeidungskosten bis zu ca. 220 €/t_{CO₂-Äq.} steigen. Der Einsatz von 9.200 t/a nachwachsenden Rohstoffen in der Referenzanlage Nawaro1 (500 kW_{el}) führt zu CO₂-Vermeidungskosten von ca. 225 €/t_{CO₂-Äq.}. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit der Studie von Stenull (2010) überein, die CO₂-Vermeidungskosten von 217 €/t_{CO₂-Äq.} für die Co-Vergärung von Maissilage und Getreide für eine 500 kW_{el}-Biogasanlage unter Annahme von Stromgestehungskosten von 16 ct/kWh_{el} sowie mit einer Wärmenutzung von 70 % ermittelte.

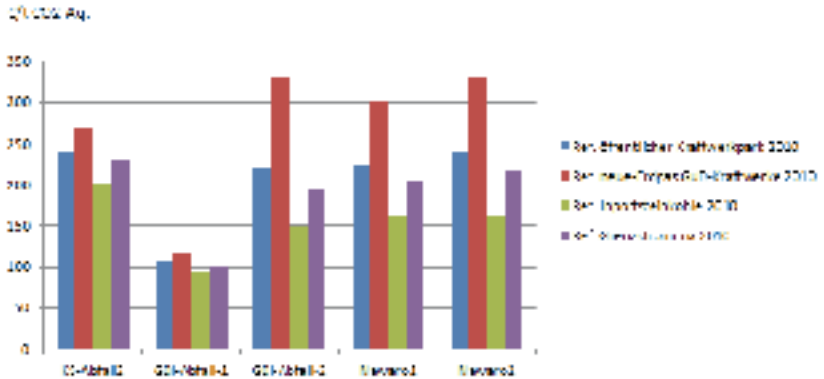


Abbildung 6: CO₂-Vermeidungskosten der Referenzanlagen.

Literatur

Balussou, D.; Kleyböcker, A.; McKenna, R.; Möst, D.; Fichtner, W. (submitted 2012): An economic analysis of three operational co-digestion biogas plants in Germany. *Waste and Biomass Valorization*, 3, 1, S. 23-41.

Brehmer, M.; Kraume, M. (2011): Rheologie von Gärsubstraten und deren Einfluss auf die Durchmischung von Biogasanlagen. 14. Köthener Rührer-Kolloquium.

Liebrich, M.; Kleyböcker, A.; Würdemann, H. (2012): Influence of the microbial community and mineral formation on the process performance of biogas production. Tagungsband Fourth International Symposium on Biomass and Waste, Venedig.

Lienen, T., Kleyböcker, A., Würdemann, H. (2012): Candidatus *Microthrix parvicella* and Candidatus *Cloacamonas acidaminovorans*: Indicator organisms for foam formation and protein concentrations in full-scale biogas plants? Tagungsband Fourth International Symposium on Biomass and Waste, Venedig.

Lienen, T.; Kleyböcker, A.; Würdemann, H. (in prep.): Slight temperature increment in anaerobic biogas digester leads to disintegration of provoked floating layer, microbial community shift and reduction of the filamentous bacterium *Microthrix parvicella*.

Klärschlammverordnung (AbfKlärV) 1992, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 12 G v. 24.2.2012 | 212.

Kleyböcker, A.; Liebrich, M.; Kraume, M.; Wittmaier, M.; Würdemann, H. (2012a): Comparison of different procedures to stabilize biogas formation after over-acidification – influence of aggregate formation on process stability. *Waste Management*. 32, S. 1122-1130.

Kleyböcker, A.; Seyfarth, D.; Liebrich, M., Verstraete, W., ; Kraume, M.; Würdemann, H. (2012b): Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digesters. *Bioresource Technology*, 123, S. 534-541.

Kleyböcker, A.; Brehmer, M.; Lienen, T.; Teitz, S.; Würdemann, H.; Kraume, M. (in prep.): Characterisation of mixing conditions and determination of the residence time distribution using uranine as a tracer at waste treatment anaerobic co-digesters.

Kleyböcker, A.; Lerm, S.; Miethling-Graff, R.; Vieth, A.; Wittmaier, M.; Würdemann, H. (2007): Genetic fingerprints to characterise microbial communities during organic overloading and in large-scale biogas plants. Internationale Biogaskonferenz "Progress in Biogas", Stuttgart-Hohenheim.

Moeller, L., Görsch, K., Müller, R., Zehnsdorf, A. (2012a): Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung – Erfahrungen aus der Praxis. *Landtechnik* 67/2, S. 108-111.

Moeller, L., Goersch, K., Neuhaus, J., Zehnsdorf, A., Mueller, R.A. (2012b): Comparative review of foam formation in biogas plants and ruminant bloat. *Energy, Sustainability and Society* 2:12.

Patent: Verfahren zur Prozesssteuerung von Bioreaktoren (Process control of biogas plant comprises measuring quantities of organic acids and calcium ions during operation of biogas plant in predetermined intervals, determining ratio of these quantities and comparing it with previous intervals). Erfinder: Kleyböcker, Anne, 10245 Berlin, DE; Würdemann, Hilke, 14482 Potsdam, am 10.06.2010 veröffentlicht.

Pötsch, E. M.; Pfundtner, E.; Resch, R.; Much, P. (2004): Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 10. Alpenländisches Expertenforum, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein.

Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.) (2012): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 04, Leipzig 2012.

Zirkler, D., Dominik, P., Peters, A., Kaupenjohann, M. (2012a): Gärreste aus der Biogasproduktion – Chemische Zusammensetzung und Nährstoffverfügbarkeit. 7. Marktredwitzer Bodenschutztag.

Zirkler, D., Dominik, P., Peters, A., Kaupenjohann, M. (2012a): Digestates from biogas production: Chemical composition and effectson priming in soils. 4th International Congress Eurosoil, Bari (Italy).

Kombinierte Wärmelieferung aus einer Biogasanlage und einem Biomasseheizwerk

Christian Letalik

Adresse: C.A.R.M.E.N. e. V.
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: cl@carmen-ev.de, www.carmen-ev.de

Grundlagen

Es ist bekannt, dass immer noch zahlreiche bestehende Biogasanlagen (BGA) über kein oder ein nur unzureichendes Wärmenutzungskonzept verfügen. Nach einer Befragung des Deutschen Biomasseforschungszentrums gemeinnützige GmbH (DBFZ), die im Rahmen des neuesten EEG-Monitoring-Berichtes – DBFZ Report Nr. 12 vom März 2012 – bei Anlagenbetreibern durchgeführt wurde, beziehen rund 80 % aller bundesdeutschen Biogasanlagen den KWK-Bonus für mehr oder weniger große Anteile des erzeugten Stroms. Die tatsächliche Menge der in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten und auch extern genutzten Abwärme ist dabei nur mit Einschränkungen zu quantifizieren. Auf Basis der Befragungsergebnisse erhobene vorsichtige Schätzungen des DBFZ belaufen sich auf Größenordnungen von einer durchschnittlichen 45 %-igen externen Wärmenutzung nach Abzug der Eigenwärmebedarfsmengen in Fermentern, Nachgärbehältern und evtl. Hygienisierungsstufen. Etwa die Hälfte der Anlagenbetreiber, so der Monitoring-Report, nutzt zwischen 20 % und 70 % der nach Eigennutzung noch verfügbaren Wärme. Die Bandbreite ist erfahrungsgemäß groß zwischen Betrieben, die überhaupt keine Wärme abgeben und Betrieben, die 100 % der nach Eigennutzung noch verfügbaren Wärme in externe Nutzungskonzepte überführen.

Bei den im Jahr 2011 neu in Betrieb genommenen Anlagen sind es gut drei Viertel aller Neuanlagen, die den KWK-Bonus in Anspruch nehmen. Auch der mit der Novelle des EEG 2009 von 2 Cent auf 3 Cent/kWh erhöhte KWK-Bonus hat nicht zu den erhofften Anreizen bei Bestandsanlagen für eine verstärkte Wärmenutzung geführt.

Gleichzeitig kämpfen nicht wenige Biomasseheizwerke mit dem Phänomen einer sich öffnenden Schere zwischen Wärmegestehungskosten und Wärmeeinnahmen. Oftmals sind die mit Inbetriebnahme der Anlage vereinbarten Wärmepreise nicht so vertraglich dynamisiert, dass Kostensteigerungen auf der Rohstoffseite (z. B. Kosten für Holzhackschnitzel und/oder Öl/Gas für die Spitzenlast, aber auch steigende Personal- und Stromkosten) egalisiert werden können. In diesem Fall drohen negative Betriebsergebnisse, die nicht selten zu einer Schieflage des gesamten Projektes führen können.

In einigen Fällen konnten derartige Bioenergieprojekte in Form einer Kooperation aus Biogasanlage und Biomasseheizwerk zum beiderseitigen Nutzen stabilisiert werden:

Eine Biogasanlage liefert aus der BHKW-Abwärme einen Teil der Grundlast für ein in vertretbarer Entfernung liegendes Biomasse-Heizwerk. Die hydraulische Einbindung erfolgt in der bestehenden Heizzentrale des Heizwerkes.

Dabei erzielt die Biogasanlage zusätzliche Einnahmen aus dem Wärmeverkauf bzw. dem zusätzlich gewonnenen KWK-Bonus (EEG 2004 bzw. 2009), das Heizwerk profitiert über den Bezug von relativ preiswerter Grundlastwärme und spart dabei Holzhackschnitzel und insbesondere auch teure fossile Brennstoffe für die Spitzenlast ein.

Ab 1. Januar 2012 müssen neu in Betrieb genommene Biogasanlagen in jedem Fall eine 60 %-ige Wärmequote nachweisen, um überhaupt die aktuellen EEG-Vergütungen in Anspruch nehmen zu können.

Warum also nicht eine bestehende oder eine neu geplante Biogasanlage über eine neue Wärmeleitung an die Heizzentrale eines bestehenden Heizwerkes anbinden, um die Wärme von dort über ein bestehendes Wärmenetz weiter zu verteilen?

Neben dieser Möglichkeit der Vor-Ort-Verstromung am Standort der Biogasanlage mit gleichzeitiger Errichtung einer Wärmeleitung zu einem bestehenden Heizwerk mit Nah- oder Fernwärmenetz könnte auch die Option der Errichtung eines Satelliten-BHKW am Standort der Heizwerkszentrale eine interessante Alternative darstellen. Vorstellbar wäre diese Variante etwa im Zusammenhang mit der Erweiterung einer bestehenden Biogasanlage um zusätzliche Fermenterleistung oder im Fall eines notwendig gewordenen Austauschs eines in die Jahre gekommenen BHKW.

Im Folgenden soll die erst genannte Variante „Verbindung einer bestehenden BGA mit einem Biomasseheizwerk“ unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten genauer betrachtet werden.

Grundlagenermittlung/Auslegung

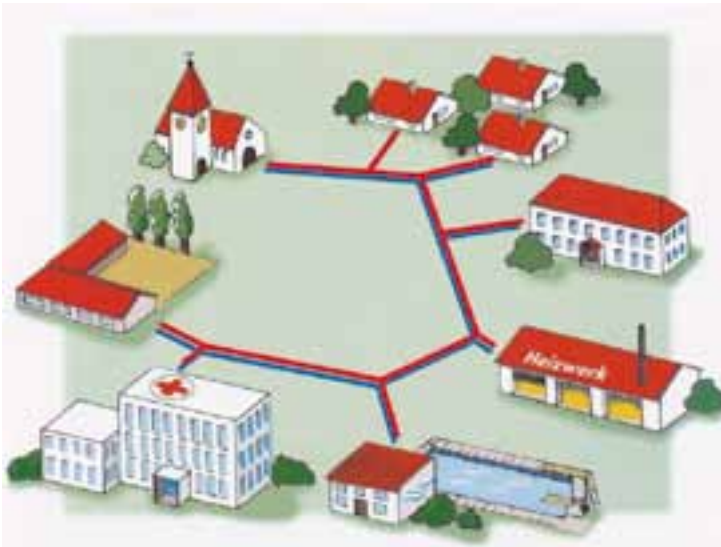


Abbildung 1: Kumulierter Wärmebedarf unterschiedlicher Abnehmer im Wärmenetz

Wo ist ein Biomasseheizwerk (in Kombination mit Abwärme aus Biogasanlage) sinnvoll?

- ++ Schwimmbäder, Krankenhäuser, Wohn- und Seniorenheime, Justizvollzugsanstalten, Hotels, Gasthöfe, (Ganztags-) Schulen und Kindergärten; Mehrzweckhallen;
- ++ Sägewerke (Trockenkammern), Kräutertrocknung
- ++ Molkereien, Brauereien, Schlachthöfe, Gewächshäuser, Textilpflege/Wäschereien;
- ++ bestehende Wohngebiete mit dichter Bebauung, mehrere Stockwerke (Alter/Bauzustand!);

- + (Neu-)Baugebiete mit dichter Bebauung
- + kleinere kommunale Gebäude
- + gemischte Gewerbebetriebe, LW-Betriebe (z.B. Ferkelaufzucht, Geflügelzucht)
- + Industrieanlagen (Prozesswärmebedarf)

- o reine Wohn-/Neubaugebiete in Niedrigenergiebauweise
- o wenige Wohnhäuser (Ein- und Zweifamilienhäuser)
- o kleine/mittlere Einzelobjekte mit geringem Wärmebedarf (z. B. Lagerhallen, Bauhöfe, Sportheime)

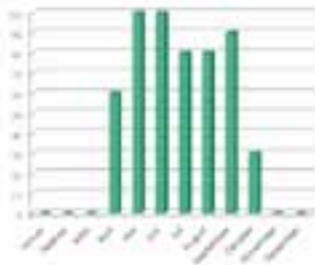


Abbildung 2

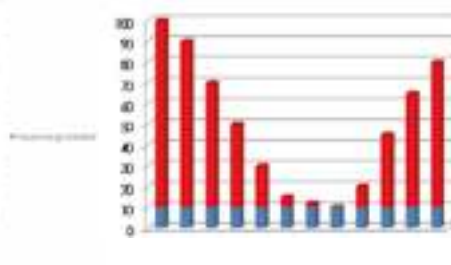


Abbildung 3

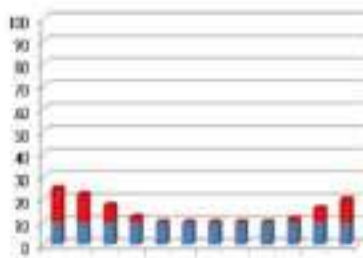


Abbildung 4

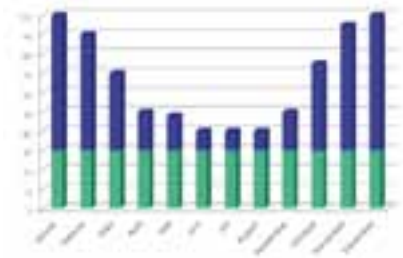


Abbildung 5

Abbildung 2-5: Diverse Jahresdauerlinien: Freibad, Altbau, Niedrigenergiehaus, Klinik.

System Biogasanlage mit Abwärmernutzung

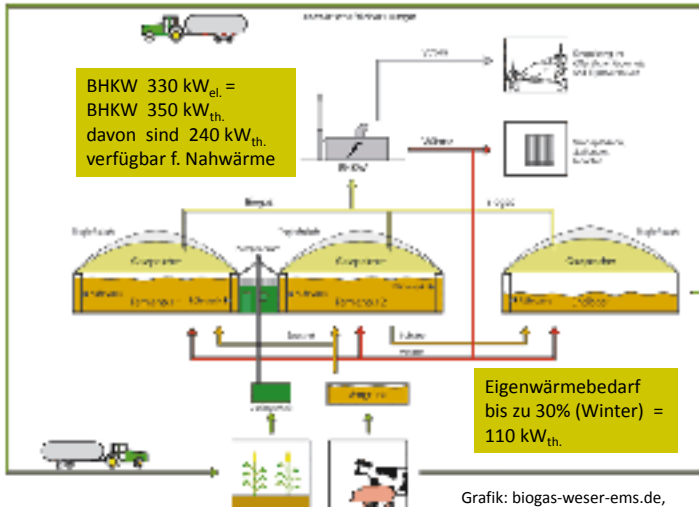


Abbildung 6: Systematische Darstellung einer landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Quelle: www.biogas-weser-ems.de, Beispielzahlen von C.A.R.M.E.N. e. V. ergänzt.

Auslegung eines Biomasseheizwerkes ohne BGA

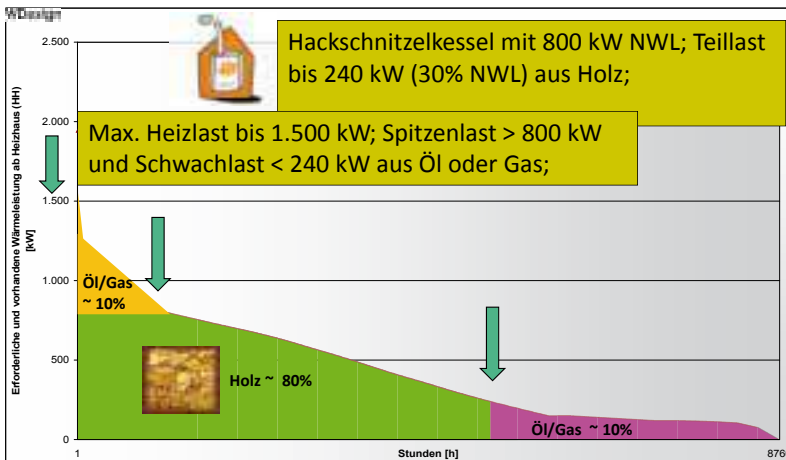


Abbildung 7: Geordnete Jahresdauerlinie eines Nahwärmenetzes mit 1,5 MW maximaler Heizlast, Quelle: Eigene Darstellung.

Auslegung des Biomasseheizwerkes mit BGA

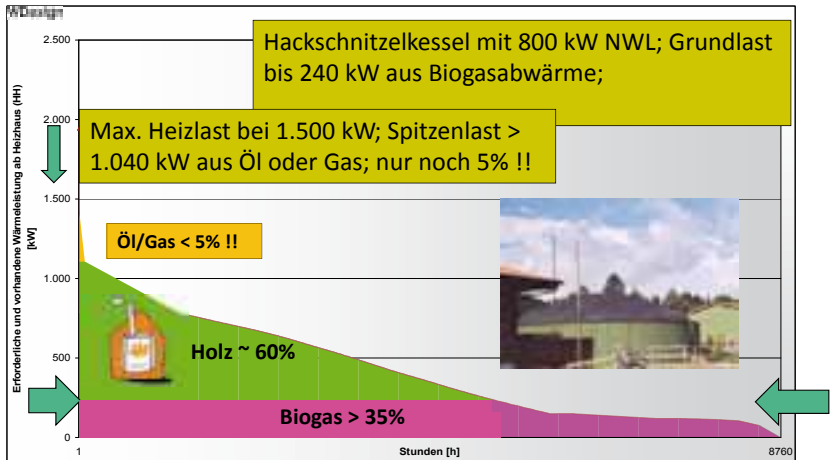
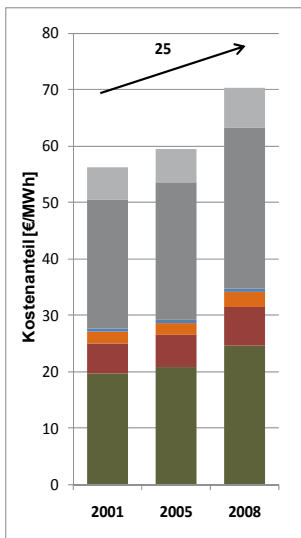


Abbildung 8: Geordnete Jahresdauerlinie eines Nahwärmenetzes, Grundlast aus Biogas; Quelle: Eigene Darstellung.

Gewichtung Brennstoffkosten Biomasseheizwerk



Kostengruppen Wärmegestehungskosten

Verbrauchsgebundene Kosten: ~ 50 %

- Biomassebrennstoffkosten: ~ 30-40 %
- Öl/Gas (Spitzenlast): ~ 15 % (→ ansteigend)
- Stromkosten: ~ 4 %
- Ascheentsorgung: ~ 1 % (ansteigend)
- kapitalgebundene Kosten: ~ 35-40 %
- Betriebsgebundene und sonstige Kosten: ~ 10%



Rahmenbedingungen

- Nachfrage nach Holzbrennstoffen gestiegen
- Brennstoffpreise (Holz + Heizöl!) gestiegen
- => Wertschöpfungspotential für Wärme aus Biomasse gestiegen; Kombination mit Biogas!

Abbildung 9: Aufteilung der Wärmegestehungskosten in einem Biomasseheizwerk, Quelle: Eigene Darstellung.

Effizienz im Nahwärmenetz

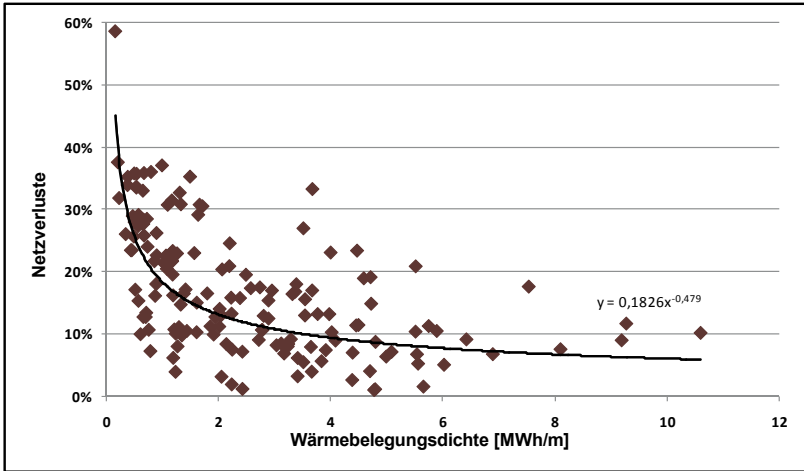


Abbildung 10: Abbildung 10: Netzverluste in einem Wärmenetz in Abhängigkeit von der Wärmebelegungsichte, Quelle: Eigene Darstellung.

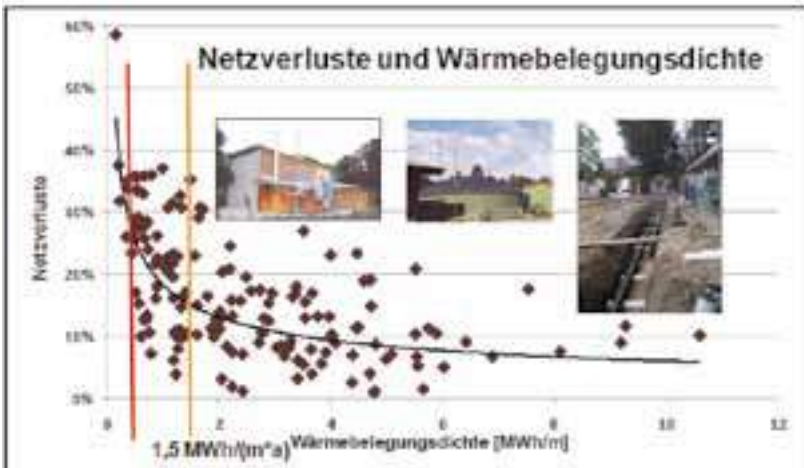


Abbildung 11: Förderkriterium „Netzbelegungsichte“ für Nahwärmenetze, Quelle: Eigene Darstellung.
Rote Linie: $0,5 \text{ MWh}/(\text{m}^2\text{a})$ → Förderkriterium der KfW; gelb: $1,5 \text{ MWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Bayern!)

Monetäre Bewertung/Fazit

- Bei gut ausgelasteten Wärmenetzen von der BGA zur Heizzentrale des BmHW „bezahlt der KWK-Bonus die Wärmeleitung“ (siehe Beispiel). Zusatzeinnahmen über das Wärmegeld liegen bei $(5.000 \times 200 \text{ kWh} + 2.500 \times 150 \text{ kWh}) \times 3 \text{ cent/kWh} = 1.375.000 \times 3 \text{ Cent} = 41.250 \text{ €}$
- Heizwerkbetreiber spart bis zu 60.000 Liter Heizöl. Die durch Biogasabwärme eingesparten Hackschnitzel liegen auf etwa gleichem Kostenniveau (3 cent/kWh).
- Vorgehensweise: Wärmenetzauslegung planen! Eigen-wärmebedarf ermitteln! Vernünftigen Wärmeliefervertrag abschließen (Redundanz?!). Förderlandschaft prüfen!

Aktuelle Entwicklung bis 2011

- Schnell wachsende Anzahl an BGA (ca. 1.000/Jahr); steigende \emptyset -Größen; Wärmekonzepte fehlen oft!
- Hauptfutter ist in erster Linie Mais; Gesamtinvestitionen und Futterpreise etc. (z. B. Kosten BImSchG) steigen,
- Pachtpreise steigen dort, wo Anlagendichte hoch ist,
- Mehr Anlagen mit Wärmenutzung nötig (Boni 2004/09).
- Kombination BGA mit BmHW kann Option sein für beide mit verbesserten ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen.

Zukünftige Entwicklung ab 2012

- Zubau an neuen Biogasanlagen stark gebremst; Vorgehensweise: Erst Wärmesenke identifizieren!
- Inflationsbereinigte EEG – Vergütungen sinken, Futterkosten etc. (z. B. Kosten BImSchG) steigen,
- Bestandsanlagen über zusätzliche Wärmeeinnahmen (Wärmegeld und Bonuszahlungen) stabilisieren,
- Aufteilung der Investitionen für das Wärmenetz; Betreiber BGA baut Zuleitung zur Heizzentrale, Wärmeverteilung an Endkunden übernimmt Betreiber des Biomasseheizwerkes.



Best Practice: Landwirtschaftliche Lehranstalten Triesdorf

Das Bioenergieprojekt „LLA Triesdorf“ liegt im Landkreis Ansbach rund 50 km westlich von Nürnberg. Als Inputstoffe für die Biogasanlage kommen Gülle, Mais, GPS und Grassilage zum Einsatz. Die Rohstoffe stammen von eigenen Anbauflächen der LLA. Die elektrische Leistung der Anlage, die 2009 in Betrieb genommen wurde, liegt bei etwa 150 kW. Die verfügbare thermische Leistung liegt bei etwa 100 bis 150 kW. Mit dieser Abwärme wird ganzjährig die Grundlastwärme für etwa 40 Gebäude der LLA, FH, Molkerei, Büros, Sozialräume etc. bereitgestellt. Mittel- und Spitzenlast kommen aus zwei Hackgutkesseln mit 1,4 und 0,7 MW NWL.



Literatur

DBFZ Report Nr. 12 vom März 2012, URL:

http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Berichte_Projektdatenbank/3330002_Stromerzeugung_aus_Biomasse_Endbericht_Ver%C3%B6ffentlichung_FINAL_FASSUNG.pdf
(Stand: 12.09.2012).

schutzrechtlicher Vorgaben und damit verbundener verbrennungstechnischer Herausforderungen jedoch noch schwierig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Biogasanlagen mit Gras als zentralem Inputsubstrat werden bereits vereinzelt gebaut und erfolgreich betrieben. Hier bestehen noch Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Substratvorbehandlung. Das gilt auch für die Umrüstung bestehender landwirtschaftlicher Biogasanlagen, die bisher vorrangig Maissilage einsetzen.

Schlagwörter: Gras, Heu, Pelletierung, Verbrennung, Biogas, Nutzungskonzepte

Hintergrund zum Projekt „Grünlandenergie Havelland“

Energieerzeugung aus Biomasse ist von zunehmender Bedeutung für die bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme und Strom in Deutschland. Dabei muss deren Bereitstellung nachhaltig erfolgen. Um Nutzungskonkurrenzen zur Nahrungsmittelerzeugung sowie ökologisch negative Auswirkungen bei der Biomassebereitstellung zu vermeiden, sollen daher zunehmend Reststoffe zur Energieerzeugung verwendet werden. In diesem Zusammenhang untersuchten das Deutsche Biomasseforschungszentrum, die Bosch & Partner GmbH sowie das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. im Projekt „Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland“, kurz „Grünlandenergie Havelland“, mögliche Verwertungspfade zur Energieerzeugung von halmgutartigem Grüngut am Beispiel der Modellregion Havelland (Landkreis Havelland und umliegende Gemeinden). Im Fokus steht die Verwertung von anfallendem Gras und Schilf von extensiv bewirtschafteten Flächen, Naturschutz- und Biotopflächen sowie aus der Gewässerpflege. Vor allem die Tatsache, dass diese Substrate als Folge der Pflegemaßnahmen oft in bereits vorliegen und eine weitere Nutzung nicht gegeben ist, macht eine energetische Verwertung interessant.

Das gewählte Untersuchungsgebiet „Havelland“ ist von ausgedehnten Grünlandflächen und einer Vielzahl an Fließgewässern geprägt. Als Folge dieser Flächenstruktur kommt es zu einem erheblichen Aufkommen von Gras und Heu sowie Materialien aus der Gewässerpflege. Ein Teil der vorhandenen Wiesen wird aufgrund des Rückgangs der Viehwirtschaft und einer zunehmenden Nutzung anderer Futterpflanzen nicht mehr für die Futterproduktion genutzt. Aus Naturschutzgründen und als Voraussetzung für den Erhalt der flächenbezogenen Direkt- und Ausgleichszahlungen müssen die Flächen jedoch regelmäßig gepflegt werden, wobei der Grünschnitt meist von den Flächen entfernt werden muss. Materialien aus der Gewässerpflege fallen vor allem bei den stattfindenden Pflegearbeiten der Kanäle an und verbleiben am Gewässerrand. Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, wie hoch das Potenzial der entsprechenden Biomassesortimente ist und welche Infrastruktur sowie potenziellen Wärmeabnehmer in der Region bestehen, die eine energetische Nutzung befördern. Des Weiteren wurden die technischen Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Gras und anderen Halmgütern analysiert. Auf Basis dieser Informationen wurden komplette Nutzungskonzepte – vom Grünland bis zur Biogasanlage/zum Heizwerk – entwickelt und anhand ökologischer und wirtschaftlicher Faktoren bewertet.

Beispielhaft für die energetischen Verwertungspfade Verbrennung und Biogaserzeugung wird hier je ein Nutzungskonzept dargestellt. Zudem erfolgt eine Bewertung der Nutzungskonzepte anhand ihrer technischen Realisierbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit sowie ihres Treibhausgasemissionsminderungspotenzials.

150 kW Heupelletkessel in bivalenter Betriebsweise

Wahl und Charakteristik des Nutzungskonzepts

Da Heu als Brennstoff Schwierigkeiten hinsichtlich der Verschlackung, der Chlorkorrosion und der Feinstaubemissionen bereitet (LAUNHARDT, 2002), sollte der Brennstoff zunächst pelletiert werden. Hierbei können spezielle Additive zugesetzt werden, die sich mindernd, u. a. auf die Chlorkorrosion auswirken. Zudem kann von einem homogenen Brennstoff ausgegangen werden, der eine genauere Anlageneinstellung für eine effizientere Verbrennung erlaubt (HEINZE, 2000). Als Leistungsgröße wurde ein 150 kW Heupelletkessels in bivalenter Betriebsweise mit einem 300 kW Heizölkessel gewählt. Damit fällt der Heupelletkessel in die 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) und muss nicht die Vorgaben der 1. BImSchV einhalten, die bei derzeitiger Fassung mit bestehenden Technologien technisch und ökonomisch kaum umsetzbar ist. Für die Einhaltung der Feinstaubemissionen ist eine geeignete, vergleichsweise kostenintensive Filtertechnologie notwendig, die aufgrund niedrigerer spezifischer Investitionen erst ab einem Leistungsbereich > 100 kW zum Einsatz kommt. Aus diesen Gründen wurde eine Anlagengröße über der kritischen Leistungsgröße von 100 kW gewählt. Gleichzeitig soll eine hohe Auslastung der Anlage gewährleistet werden, weshalb die Wärmeerzeugung des Kessels vorwiegend zur Grundlastabdeckung verwendet und gleichzeitig die Anlagengröße möglichst klein gehalten werden soll. Die Spitzenlast wird mit einem integrierten Pufferspeicher und darüber hinaus mit dem Heizölkessel abgedeckt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die tatsächliche Wärmeerzeugung im Verhältnis 80 %/20 % auf den Grundlast- und den Spitzenlastkessel aufteilen.



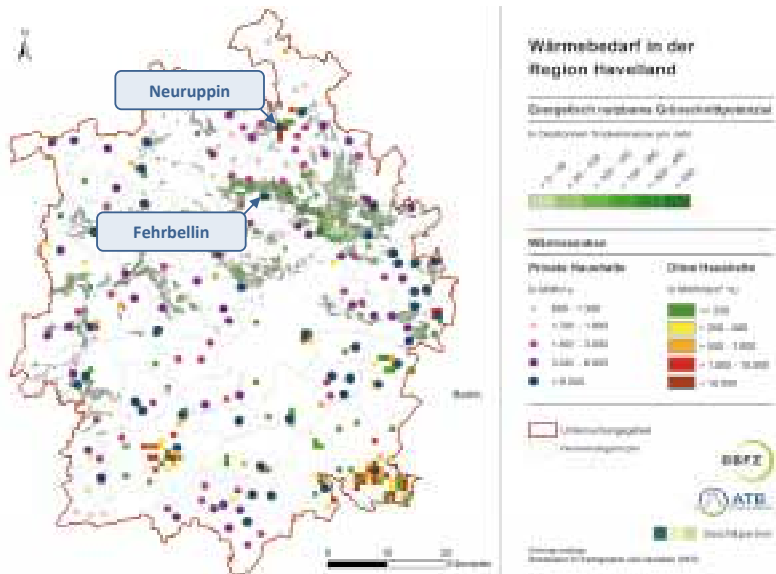


Abbildung 1: Überschüssige Biomasse und vorhandene Wärmesenken im Untersuchungsgebiet Havelland.

Für die Standortwahl des Heizwerks wurden die Nähe zur Rohstoffquelle einerseits und des Wärmebedarfs andererseits einbezogen. Da sich die Pelletierung im dafür nötigen Umfang am günstigsten über ein bestehendes Pelletierwerk im Lohnbetrieb bewerkstelligen lässt, wurde das Pelletierwerk in Fehrbellin ausgewählt. An diesem Standort besteht ein hohes Potenzial an Gras (Abbildung 1). Als Wärmabnehmer bieten sich größere Wohn- oder Bürokomplexe, Industriebetriebe oder Einrichtungen wie z.B. Krankenhäuser an. Solche Objekte befinden sich in der nahegelegenen Stadt Neuruppin, weshalb diese Stadt als Anlagenstandort gewählt wurde.

Vorgehensweise bei der Erarbeitung des Nutzungskonzepts

Um den verbrennungstechnischen Herausforderungen der Anlage zu begegnen wird davon ausgegangen, dass mehrere technische Erweiterungen zu üblichen Holzpelletkesseln verbaut werden. Dazu gehört zur Minderung von Korrosionsschäden an den rauchgasseitigen Wärmeübertragungsflächen die Nutzung geeigneter Werkstoffe, regelmäßige automatisierte Reinigungsintervalle und der Vorgabe von Mindestrücklauftemperaturen (mindestens 60 °C). Zudem soll die Brennkammer, die als vertikal aufgestellte Reaktionsrohre ausgeführt ist, im Falle von Korrosionsschäden leicht austauschbar sein. Um einerseits die Verschlackung der Asche zu vermeiden und andererseits einen möglichst störungsfreien Betrieb der Anlage mit entstandenen Ascheagglomeraten zu gewährleisten, sollte ein wassergekühlter Rost sowie ein System zur Temperaturkontrolle des Feuerraumes und Glutbettes verbaut werden. Anfallende Ascheagglomerate im Bereich des Glutbettes werden durch mechanische Einrichtungen in Bewegung gehalten und in den Aschebehälter ab-

transportiert. Im Vergleich zu bestehenden Holzpelletheizwerken führen die technischen Erweiterungen zu höheren Investitions- und somit Kapitalkosten. Aufgrund des erwarteten höheren Verschleißes wird zudem von einer nur zwölfjährigen Nutzungsdauer ausgegangen, während der kombinierte Heizölkessel eine Nutzungsdauer von 18 Jahren hat. Die Jahreswärmeerzeugung beläuft sich auf durchschnittlich 788.000 kWh. Die Jahresnutzungsgrade liegen bei 75 % für den Heupelletkessel und bei 94 % für den Heizölkessel.

Für die Berechnung der Bereitstellungskosten des Heus zum Pelletwerk dient die Datensammlung des KTBL (KTBL, 2010) als Kalkulationsgrundlage. Daraus lassen sich Anschaffungspreise, Nutzungsdauer, feste und variable Kosten landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte übernehmen. Es wird von den typischen landwirtschaftlichen Maschinen und Verfahrensabläufe in der Heuballenproduktion ausgegangen (83 kW Traktor mit Frontlader, Rotationsmäherwerk, Kreiselzetter, Kreiselschwader, Quaderballenpresse, zwei 3-Seitenkipper, LKW und Tieflader). Die Preise für Betriebsstoffe wurden der aktuellen Situation angepasst und bei Diesel mit 1,20 € veranschlagt. Lohnkosten wurden mit 20 €/h angesetzt. Der Anteil an Neben- und Verlustzeiten bei den Feldarbeiten (inkl. Transport) aufgrund von Störungen und Wartungsarbeiten wurde auf 40 % geschätzt. Die Arbeitsgeschwindigkeit auf dem Grünland wurde mit 8 km/h veranschlagt.

Es wird davon ausgegangen, dass mehrere Kunden mit Heupellets bedient werden, weshalb eine jährliche Heupelletproduktion von 5000 t veranschlagt wurde. Bei der Bereitstellung wird ein Masseverlust von 30 % eingerechnet; 19 % bei der Grünlandbewirtschaftung und 11 % bei der Lagerung.

Die Minderung von Emissionen von Treibhausgasen (THG) wurde in Anlehnung an die im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ erarbeitete Methodik (Thrän et al. 2011) ermittelt.

Bewertung des Nutzungskonzepts

In der Praxis hat die Verbrennung von Heu bisher kaum Relevanz, da die energetische Nutzung verbrennungstechnische Schwierigkeiten mit sich bringt, die bisher nur schwer beherrschbar sind. Grundsätzlich sind bestehende Kesselanlagen bei entsprechender Modifizierung auch zur Verbrennung von Heu geeignet. Derzeit bestehende Anlagen stellen jedoch individuelle Lösungen dar und gehen mit einem hohen Wartungs- und Instandhaltungsaufwand einher. Von einer Praxisreife kann in diesem Zusammenhang daher noch nicht gesprochen werden.

Die Kosten für die Bereitstellung der Biomasse belaufen sich auf insgesamt 125 €/t Pellets (siehe Abbildung 2).

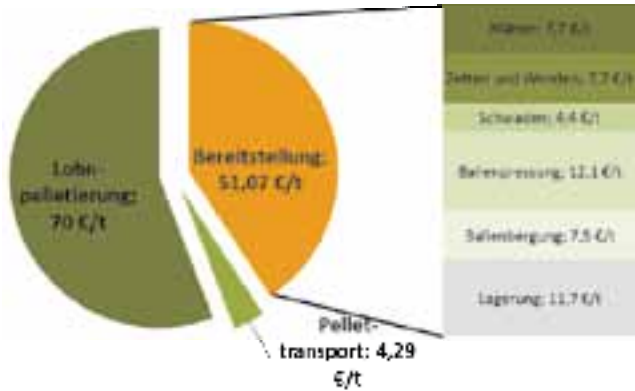


Abbildung 2: Bereitstellungskosten für Heupellets bei Lohnpelletierung in Fehrbellin und Nutzung in Neuruppin.

Flächenprämien wurden hierbei nicht berücksichtigt, da die Wertschöpfung der Wärmezeugung nicht im Bereich der Landwirtschaft liegt und die Flächenprämien daher als landwirtschaftliche Gewinnmarge betrachtet werden.

Die Annuität der Kosten des Heupelletheizwerks ist vergleichend mit einem Holzpellet- und Heizöl betriebenen Heizwerk in folgender Abbildung dargestellt. Bei der Berechnung wurde ein Zinssatz von 5 % verwendet. Unter Sonstiges summieren sich Lohn-, Versicherungs- und Ascheentsorgungskosten. Bei den Investitions- und somit auch Kapitalkosten wurden verfügbare Förderinstrumente berücksichtigt.

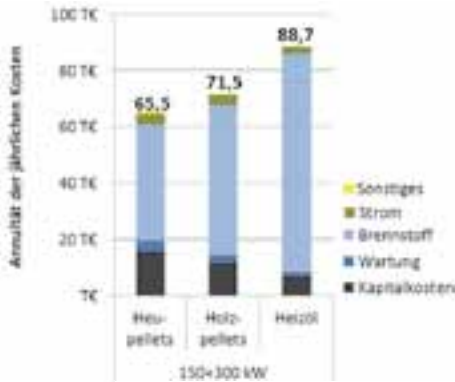


Abbildung 3: Annuität der jährlichen Kosten und THG-Emissionen eines bivalenten 150 kW Heupelletheizwerks im Vergleich.

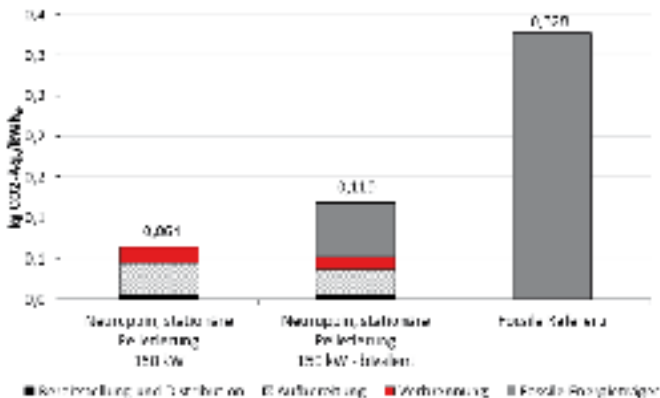


Abbildung 4: THG-Emissionen eines bivalenten 150 kW Heupelletheizwerks im Vergleich zu alternativen Wärmeerzeugungsformen.

Insgesamt ergeben sich bei dem betrachteten bivalenten Heupelletheizwerk Wärmege-stehungskosten von 8,3 €/kWh. Diese sind somit deutlich niedriger als bei der nächst-besten Alternative, dem Holzpelletheizwerk. Bei der Betrachtung der Annuitäten kann daher von jährlich 6 T€ Einsparungen ausgegangen werden, was die wirtschaftliche Vor-züglichkeit dieser Variante hervorhebt.

Für das THG-Minderungspotenzial dienen die Wärmeerzeugung der deutschen Haushalte, berechnet mit 0,328 kg CO₂-äq./kWh_{th} [siehe (UBA 2009) und (UBA 2012b)] als Vergleichs-wert. Gegenüber den fossilen Energieträgern schneidet das bivalente Heupelletkonzept (Abbildung 4) sehr gut ab, sodass eine THG-Einsparung von 64 % realisiert werden kann. Noch besser, jedoch wirtschaftlich schlechter gestellt, wäre der monovalente Einsatz des 150 kW Heupelletheizwerks.

500 kW_{el} Biogasanlage mit 100 % Graseinsatz

Wahl und Charakteristik des Nutzungskonzepts

Als geeigneter Standort für die Installation einer Biogasanlage mit der ausschließlichen Nutzung von Gras als Inputsubstrat erweist sich der Standort Fehrbellin (Abbildung 1). Als geeignete Anlagengröße wurde eine elektrische Anlagenleistung von 500 kW gewählt. Im Vergleich zu kleineren Anlagen bestehen hierfür geringere Investitionskosten. Andererseits werden sie im Vergleich zu den größeren Anlagen (über 500 kW_{el}) mit einer höheren Vergütung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert. Zudem kann die bei der Verstromung entstehende Wärme in diesem Umfang auch an nahe gelegene private Haushalte verkauft werden. Anlagen dieser Größe werden meist durch Landwirte betrieben und sind in den Ablauf eines landwirtschaftlichen Betriebes integriert, wodurch zusätzlich Synergieeffekte geschaffen werden.

Vorgehensweise bei der Erarbeitung des Nutzungskonzepts

Analog zur Berechnung der Bereitstellungskosten für Heu wurden auch hier, soweit vergleichbar, entsprechende Annahmen getroffen. Für die Grassilageernte wurde von den dafür typischen Landmaschinenkombinationen (83 kW-Traktor mit Frontlader, Rotationsmäher, Kreiselwender, Kreiselschwader, 300 kW-Häcksler, zwei Kippanhänger) ausgegangen. Bei der Bereitstellung wurde angenommen, dass die Gesamtverluste bei 20 % der Trockenmasse liegen, wobei 7 % auf dem Feld und 13 % während der Lagerung verloren gehen. Der Massenstrom durch den Häcksler in der Hauptzeit beläuft sich unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Erträgen im betrachteten Einzugsgebiet auf ca. 20 t TS/h_{Hz} (Amon et al. 2007). Die Zeit für die Verdichtung des Welkgutes am Fahrсило wurde mit 3,5 min/t (DLG, 2011), für die Entnahme der Grassilage aus dem Silo und das Befüllen der Biogasanlage mit 5,2 min/t (KTBL, 2010) veranschlagt. Bei einer angenommenen Biogausausbeute von 150 mN³/t FM werden ca. 13.400 t FM/a für den Betrieb einer 500 kW-Anlage benötigt. Aus den Berechnungen des Projekts folgt, dass für den Standort Fehrbellin mit einer durchschnittliche Entfernung von 8 km zu rechnen ist (Sauter et al. 2012). Bei der betrachteten Biogasanlage wird zu 100 % von dem Inputsubstrat Gras ausgegangen. Solche Anlagen gibt es bereits in der Praxis, wenngleich bei der Vergärung des Grases besondere Herausforderungen auftreten. Aufgrund des hohen Fasergehalts neigt Gras zur Verfilzung und Verklumpung. Daher müssen robuste und verschleißfeste Eintragungssysteme und Förderschnecken mit großem Durchmesser verbaut werden. Auch die Überlaufrohre zwischen den Gär- und Lagerbehältern sind etwas größer dimensioniert. In Gärbehältern neigt das Gras zum Aufschwimmen, was die Prozessabläufe stört. Für das Mischen des Materials im Fermenter erweisen sich langsam laufende, großflügelige Rührwerke als vorteilhaft. Um die Abbauprozesse zu beschleunigen und dadurch die Verweilzeit des Substrates im Fermenter zu vermindern, wird zudem eine Hydrolyse vorgeschaltet. Für die besondere Anlagenausstattung zur Bewältigung dieser verfahrenstechnischen und gärbioologischen Herausforderungen bestehen entsprechend hohe spezifische Investitionskosten (5.500 €/kW_{el}), eine verkürzte Laufzeit der Biogasanlage (15 Jahre) und ein erhöhter Eigenstromverbrauch (12 %) für den Antrieb der Pumpen und Rührwerke. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurden übliche Werte aus der Praxis und der Literatur sowie aktuelle Marktpreise verwendet. Erlöse werden durch die Vergütungen nach EEG 2012, der

Grundvergütung und der Vergütung für Einsatzstoffe der Vergütungskategorie II (EEG 2012) sowie durch den Wärmeverkauf erzielt. Voraussetzung für die EEG-Förderung ist u. a. eine mindestens 60 %-ige Nutzung der bei der Stromproduktion anfallenden Wärme. 25 % der Wärme lassen sich zur Beheizung des Fermenters anrechnen. Die restlichen 35 % der Abwärme können verkauft werden, wofür ein Preis von 0,06 €/kWh_{th} unterstellt wurde. Mit dieser Wärme sollen die nahe liegenden Häuser beheizt werden. Dafür ist eine Nahwärmeleitung mit Hausübergabestationen vorgesehen. Für die Berechnung wurde unterstellt, dass die Entfernung vom BHKW bis zum ersten angeschlossenen Haus etwa 300 m und zwischen den Häusern 30 m beträgt. Der durchschnittliche Wärmebedarf je Hauswurde auf 21.750 kWh_{th}/a berechnet (Sauter et al. 2012).

Für die Kalkulation der Biogaserzeugung wurde von einer Biogasausbeute der Grassilage von 480 mN³/t oTM und einem Methangehalt von 52 % ausgegangen. Störungsbedingt muss ein Verlust von 5 % eingerechnet werden. Das BHKW hat Wirkungsgrade von elektrisch 38 und thermisch 43 % und eine Auslastung von 7.500 Volllaststunden pro Jahr. Die Berechnung der direkten und indirekten THG-Emissionen erfolgt analog zur Berechnung für das betrachtete Heupelleteiswerk. Darüber hinaus wurden die Vorgaben der IPCC-Richtlinien (Eggleston et al. 2006) angewendet. Dabei werden sowohl Emissionen von auszubringenden Gärresten als auch Gutschriften für die infolge der reduzierten Mengen an mineralischen Stickstoff-Düngern berücksichtigt. Der durchschnittliche Gehalt am gesamten Stickstoff im Erntegut wurde hierbei mit 18,0 kg/t TM bei Gras unterstellt. Für die Allokation der THG-Emissionen bei der Strom- und Wärmeerzeugung wurde eine vereinfachte Methode angewendet (vgl. Thrän et al. 2011). Die THG-Emissionen für die Wärme beziehen sich auf die 35 % genutzte Wärme.

Bewertung des Nutzungskonzepts

Die Verwertung halmgutartiger Biomasse für die Biomethanisierung eröffnet gute Perspektiven zur energetischen Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe, stellt aber gleichzeitig hohe Ansprüche an die Verfahrenstechnik. Hierfür existieren bereits marktreife Ansätze. Die Befahrbarkeit von extensiven Grünlandflächen kann durch hohe Bodenfeuchten und Überflutung erschwert werden, wodurch sich Erntetermine verzögern können. Eine verspätete Ernte führt zu ungünstigen Vergärungseigenschaften und verminderten Gasausbeuten des Grünschnittes.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Fahrhilfen in den Betrieben vorhanden und bereits abgeschrieben sind. Die gesamten Bereitstellungskosten des Grünschnittes belaufen sich auf ca. 40 €/t FM.



Abbildung 5: Bereitstellungskosten für Grassilage bei einer 500 kW Biogasanlage am Standort Fehrbellin.

Infolge der Reformierung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU wird von einer Flächenprämie in Deutschland von 200 €/ha ab 2013 ausgegangen. Unter der Annahme, dass nur ein Schnitt von den betrachteten Grünlandflächen verwendet wird, können zusätzlich 100 €/ha angerechnet werden. Die Bereitstellungskosten reduzieren sich dadurch deutlich und liegen dann bei ca. 18 €/t FM. Im Folgenden wird von der Gewährung dieser Flächenprämien ausgegangen.

Die Höhe der jährlichen Kosten und Erlöse sind Abbildung 5 zu entnehmen. In den Kapitalkosten sind auch die Installationskosten eines Nahwärmenetzes enthalten. Versicherungs- und Lohnkosten sowie die Kosten der Gärrestaubsbringung wurden unter Sonstiges zusammengefasst.

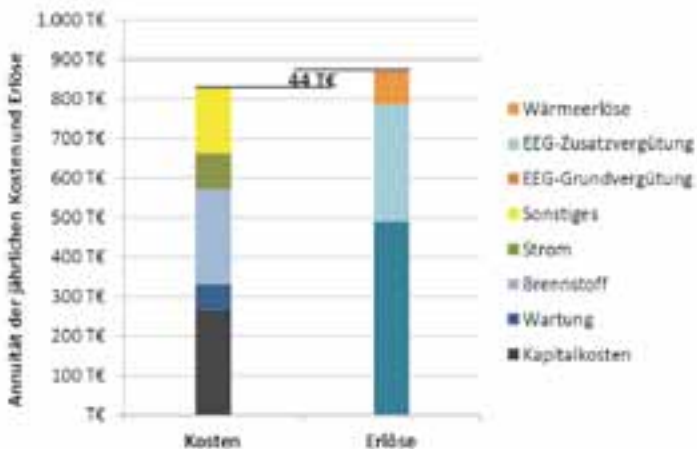


Abbildung 6: Kosten und Erlöse einer 500 kWel-Biogasanlage (100 % Graseinsatz) am Standort Fehrbellin.

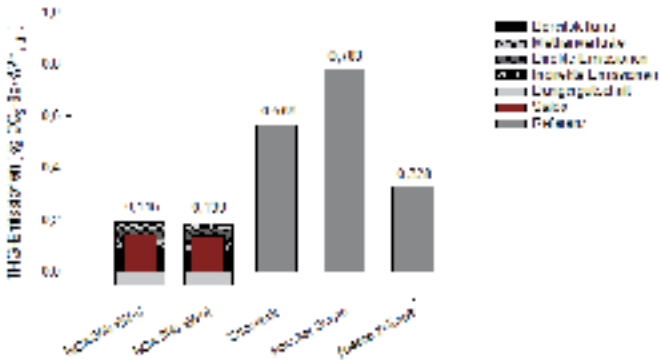


Abbildung 7: THG-Emissionen 500 kWel-Biogasanlage (100 % Graseinsatz) am Standort Fehrbellin im Vergleich zu alternativen Stromerzeugungsformen.

Unter Einbeziehung der Wärmeerlöse ergeben nach diesen Berechnungen Stromgestehungskosten (VDI 2012) in Höhe von 19,8 €/Ct/kWh. Bei einer EEG-Vergütung von 21,0 €/Ct/kWh liegen die jährlichen Erlöse somit 44 T€ über den entsprechenden Kosten. Für die Berechnung des THG-Minderungspotenzials dienen die Emissionen des deutschen Strommixes im Jahr 2011, basierend auf Schätzungen des Umweltbundesamtes (UBA 2012a) und die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen (UBA 2012b) als Vergleichswert. Gegenüber den fossilen Energiesystemen schneidet die Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas sehr gut ab, sodass von einer THG-Einsparung von 81 % ausgegangen werden kann.

Fazit

Die energetische Nutzung der betrachteten Reststoffe aus Landwirtschaft, Naturschutz und Gewässerpflege trifft auf einen breiten Interessentenkreis. Zudem besteht in vielen Gebieten Deutschlands, wie beispielsweise im Havelland, eine hohe Verfügbarkeit, die derzeit nur begrenzt verwertet wird. Oft verbleiben sie auf den Flächen oder müssen sogar kostenpflichtig entsorgt werden. Die von Deutschland eingegangenen Verpflichtungen zum Klimaschutz erfordern, dass neue Wege zur weiteren Minderung der Treibhausgasemissionen gefunden werden müssen. Die Erschließung neuer, bis jetzt noch ungenutzter Rohstoffe zur Energiegewinnung wird diesen Anforderungen gerecht. Bei der Betrachtung der grundsätzlich in Frage kommenden Konversionspfade Verbrennung und Biogaserzeugung hat sich gezeigt, dass die beiden Nutzungskonzepte wirtschaftlich darstellbar sind. Für eine erfolgreiche Etablierung der Biogaserzeugung aus Gras bedarf es gezielter Unterstützungsmaßnahmen. Entsprechende Biogaskonzepte sind in geringem Umfang bereits in der Praxis umgesetzt worden. Zur weiteren Optimierung besteht hierfür jedoch noch Forschungsbedarf. Die praktische Umsetzung von Heupelletheizwerken wird derzeit durch die geringe technologische Praxisreife und die rechtlichen Hürden bei Kleinfeuerungsanlagen (< 100 kW) behindert. Hier sind für die Weiterentwicklung und Verbesserung geeigneter Feuerungsanlagen sowie zur Heuaufbereitung weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

Literatur

Amon, T.; Hopfner-Sixt, K.; Amon, B.; Bauer, A.; Handler, F.; Blumauer, E.; Eder, M.; Stürmer, B.; Ritzmann, A. (2007): Handbuch Biogaslogistik: Optimierung der Beschaffungs- und Distributionslogistik bei großen Biogasanlagen. Universität für Bodenkultur Wien.

DLG (2011): Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung: Silagebereitung, Siliermittel, Dosiergeräte, Silofolien. Frankfurt am Main : DLG-Verlags-GmbH.

EEG 2012: Gesetz zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, BGB Teil I Nr. 42 (2011).

Eggleston, HS.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T.; Tanabe, K. (2006): 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol.4: Agriculture, forestry and other land use. Japan.

Heinze, G. (2000): Handbuch der Agglomerationstechnik. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH. ISBN 9783527297887.

KTBL (2010): KTBL-Datensammlung: Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/2011: KTBL.

Launhardt, T. (2002): Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen : Schadstoffemissionen, Aschequalität und Wirkungsgrad. Kiel: Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI.

Sauter, P. ; Seidenberger, T. ; Lochmann, Y. ; Bosch, J. ; Billig, E. ; Schicketanz, S. ; Peters, W. ; Döhling, F.; Brosowski, A.; u. a. (2012): Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland (Unveröffentlichter Endbericht): Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ).

Statistisches Bundesamt Deutschland (2010): Bestand an Wohnungen. Fachserie 5 Reihe 3, Wiesbaden.

Thrän, D.; Fischer, E.; Fritsche, U.; Hennenberg, K.; Herrmann, A.; Oehmichen, K.; Pfeiffer, D.; Schmersahl, R.; Schröder, T.; Zeller, V.; Zeymer, M.(2011): Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. Version 2.1.

Thrän, D.; Majer, S.; Gawor, M.; Bunzel, K.; Daniel-Gromke, J.; Bauermann, K.; Eickholt, V.; Schultz, R.; Hoch, J.; Person, H. (2011): Optimierung der marktnahen Förderung von Biogas/Biomethan unter Berücksichtigung der Umwelt- und Klimabilanz, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit. Studie im Auftrag vom Biogasrat e.V. Berlin.

UBA (2009): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2007, Umweltbundesamt.

UBA (2012a): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011, Umweltbundesamt.

UBA (2012b): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2010, Umweltbundesamt.

VDI (2012): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung, Verein Deutscher Ingenieure (VDI).

Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MIL); Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung (Hrsg.) (2010): Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg, Ausgabe 2010, Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau, Teltow, Großbeeren, Groß Kreutz, Güterfelde, Paulinenaue, Wünsdorf Reihe Landwirtschaft. Bd. 11.

Grünlandenergie Havelland – Untersuchungen zum Zerkleinerungs- und Pelletierverhalten von Heu

Claudia Kirsten*^{1,2}, Volker Lenz¹, Hans-Werner Schröder², Jens-Uwe Repke²

¹ DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

² TU Bergakademie Freiberg, Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik

Adresse: DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

*E-Mail: claudia.kirsten@dbfz.de

Abstract

Durch das Inkrafttreten der DIN EN 14961-6 für nicht-holzartige Biomassepellets wurde der Grundstein für alternative Biomassen gelegt. Für eine energetische Nutzung von Heu ist neben einer Weiterentwicklung bzw. Anpassung der Verbrennungstechnologien auch eine brennstoffseitige Optimierungen notwendig. Dies kann durch primäre Maßnahmen, wie beispielsweise eine optimierte Rohstoffaufbereitung und Pelletierung sowie die Einbindung von Additiven, zur Verbesserung des Verbrennungsverhaltens, erreicht werden. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieses Beitrages verschiedene Untersuchungen zum Zerkleinerungs- und Verdichtungsverhalten von Heu sowie zur Einbindung von Additiven im Hinblick auf die Herstellung qualitativ hochwertiger Pellets für eine energetische Nutzung vorgestellt. Bei den verschiedenen Zerkleinerungsversuchen wurden unter anderem der Durchsatz, die Korngrößenverteilungen sowie der spezifische Energiebedarf des zerkleinerten Materials gegenübergestellt. Erste Ergebnisse zeigen, dass sich die Hammer- und Prallmühle für die Zerkleinerung von Heu eignen. Die Schneidmühle dagegen weist einen sehr geringen Durchsatz in Verbindung mit einem sehr hohen Energieverbrauch auf. Aus den bislang durchgeführten Pelletierversuchen – zerkleinertes Heu (Hammermühle, Siebeinsatz mit einer Öffnungsweite von 4 mm) pelletiert mit Hilfe einer Ringmatrizenpresse – geht deutlich hervor, dass die geforderten physikalisch-mechanischen Grenzwerte der DIN EN 14961-6 eingehalten werden können. Durch eine gezielte Parametereinstellung konnten Heupellets mit mechanischen Festigkeiten von bis zu 98,8 Ma.-% und Schüttdichten von bis zu 670 kg/m³ hergestellt werden. Die Zugabe von Additiven führte nur zu einer unwesentlichen Verschlechterung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften.

Schlagwörter: Zerkleinerung, Pelletierung, Prozessoptimierung, Heu, Pellets

Einleitung

Der Nutzung biogener Brennstoffe zur Energiebereitstellung kommt aufgrund des weltweit steigenden Energieverbrauchs und des Ziels, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, eine wichtige Rolle zu. In vielen Ländern stößt die zunächst favorisierte Nutzung von Holz zur Wärme- und Strombereitstellung aus ökologischer und ökonomischer Sicht jedoch bereits an ihre Grenzen, wobei besonders im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen gegenwärtig fast ausschließlich qualitativ hochwertige Holzbrennstoffe eingesetzt werden. Umso bedeutender ist der Beitrag, den alternative Biomassen besonders im Bereich der Wärmebereitstellung zukünftig leisten können. Mit der im April 2012 verabschiedeten europäischen Produktnorm DIN EN 14961-6 für nicht-holzartige Biomassepellets für eine nicht-industrielle Nutzung wurde der Grundstein für die eine zunehmende Nutzung bisher weitgehend ungenutzter Biomassen gelegt. Energiepflanzen aber auch biogene Reststoffe, wie Heu, zeigen dabei ein beträchtliches Potential.

Laut statistischer Bodennutzungserhebung wird in Deutschland 2012 auf 4.632.600 ha landwirtschaftlicher Fläche Heu auf Dauerwiesen produziert (Statistisches Bundesamt 2012). Zusätzlich fällt Heu in der Landschaftspflege an - Straßenränder, Schienentrasen, Parks und Anlagen, Friedhöfe, Wiesen und Naturschutzflächen müssen in regelmäßigen Abständen geschnitten werden. Heu dient häufig als Tierfutter. Allerdings ist der Viehbestand in einer Vielzahl von Regionen rückläufig, womit ein zusätzliches Potential für eine energetische Nutzung entsteht. Zusätzlich sinkt bei einem späten Mahdtermin (Juli/August) die Futtermittelqualität. Längere Wachstumsphasen und der damit verbundene höhere Verholungsgrad, sowie teilweise Giftpflanzen schränken die Nutzung als Futter ein (Tonn 2010). Somit steht je nach Szenario Mengenpotential von etwa 6 Mio. t_{TM} Grünlandaufwuchs zur Verfügung, welches in Deutschland einem technischen Brennstoffpotential von ca. 100 PJ/a im Jahr 2020 entspricht (Thrän 2010).

Für die Herstellung von Pellets mit hoher physikalisch-mechanischer Qualität sind im Wesentlichen zwei Parametergruppen von großer Bedeutung: zum einen die Rohstoff- und zum anderen die Prozessparameter. Der Zerkleinerungsgrad, der Wassergehalt sowie eine homogen verteilte Materialmischung sind wichtige Rohstoffparameter und Gegenstand der Untersuchungen. Bei den Prozessparametern handelt es sich um technische Verfahrensgrößen, wie Geometrie der Matrize, Abstand zwischen Koller/Matrize, Pressen- und Förderleistung. Diese Größen können eingestellt werden und sind damit Bestandteil der Prozessführung einer Pelletierung. Die im Allgemeinen genutzte Pelletiertechnik, Flach- oder Ringmatrizenpresse, bestimmt dabei die Art der Verdichtung.

Das Ziel der Untersuchungen ist zum einen den geeigneten Zerkleinerungsgrad für eine anschließende Pelletierung zu finden. Zum anderen sollen durch Variation der Rohstoff- und Prozessparameter die nach DIN EN 14961-6 geforderten physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften eingehalten werden.

Erst vielversprechende Ergebnisse zum Zerkleinerungs- und Pelletierverhalten von Heu werden nachfolgend detailliert vorgestellt.

Methodik

Material

Mit dem Ziel, qualitativ hochwertige Heupellets für eine energetische Nutzung zu erzeugen, wurden bisher sieben unterschiedliche Heuchargen aus der Region Havelland (Brandenburg) und Meißen (Sachsen) aus Sicht der Kompaktierung auf ihre Eignung als biogene Festbrennstoffe betrachtet. Die nach DIN EN 14961-6 geforderten chemischen und energieträgerspezifischen Pelleteigenschaften sowie die dazugehörigen Analysewerte der untersuchten Heuchargen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Brennstofftechnische Eigenschaften der untersuchten Heusorten im Vergleich zur DIN EN 14961-6

Eigenschaften	Einheit	DIN EN 14961-6 nicht-holzartige Biomassen und Mischungen		Heu ^a
		A	B	
Wassergehalt	Ma.-%	≤ 12	≤ 15	7,0 – 11,5
Aschegehalt	Ma.-% (wf)	≤ 5	< 10	4,8 - 11,8
Heizwert	MJ/kg	≥ 14,1	≥ 13,2	16,0 - 17,6
Ascheschmelzverhalten	°C	Sollte angegeben werden		k.A.
Stickstoff, N	Ma.-% (wf)	≤ 1,5	≤ 2,0	1,21 – 2,05
Schwefel, S	Ma.-% (wf)	≤ 0,2	≤ 0,2	0,10 - 0,24
Chlor, Cl	Ma.-% (wf)	≤ 0,2	≤ 0,3	0,20 - 0,86
Arsen, As	mg/kg (wf)	≤ 1	≤ 1	< 0,3
Cadmium, Cd	mg/kg (wf)	≤ 0,5	≤ 0,5	< 0,2
Chrom, Cr	mg/kg (wf)	≤ 50	≤ 50	< 12
Kupfer, Cu	mg/kg (wf)	≤ 20	≤ 20	< 8
Blei, Pb	mg/kg (wf)	≤ 10	≤ 10	< 4
Quecksilber, Hg	mg/kg (wf)	≤ 0,1	≤ 0,1	< 0,02
Nickel, Ni	mg/kg (wf)	≤ 10	≤ 10	< 6
Zink, Zn	mg/kg (wf)	≤ 100	≤ 100	< 35

k.A. keine Angaben

^a Analysen wurden am DBFZ vom Rohmaterial durchgeführt.

Wie aus den durchgeführten Analysen deutlich hervorgeht, unterliegt Heu großen Schwankungsbreiten hinsichtlich seiner chemischen Zusammensetzung. Die energieträgerspezifischen Eigenschaften wie Wasser- und Aschegehalt sind im starken Maß vom Zeitpunkt der Mahd, den Standortbedingungen sowie von der Witterung abhängig. Der Zeitpunkt sowie die Technik zur Erzeugung von Ballen, die Bodenbeschaffenheit aber auch der Pflanzenbestand haben großen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung insbesondere dem Gehalt an Stickstoff, Schwefel, Chlor und Mineralien. Ein zu hoher Aschegehalt und die Neigung zur Verschlackung können verbrennungstechnische Probleme verursachen und damit einem unvollständigen Ausbrand führen. Die Beeinflussung des Ascheschmelzverhaltens kann durch Zumischen von calciumhaltigen Additiven (CaO , CaOxMgO , Ca(OH)_2 , CaCO_3) oder Kaolin realisiert werden (Steenari 2009). Die Zugabe von Additiven ist normkonform, da bei Einhaltung der Aschegrenzwerte lediglich Angaben zu den verwendeten Stoffen gemacht werden müssen.

Neben den brennstofftechnischen definiert die DIN EN 14961-6 auch physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften. Hierfür sind die folgenden Grenzwerte zu nennen:

- Durchmesser und Länge: $D \ 6\text{-}10 \text{ mm}$, $3,15 \leq L \leq 40$ bzw. $D \ 12\text{-}25 \text{ mm}$, $3,15 \leq L \leq 50$,
- Mechanische Festigkeit: $DU \geq 97,5 \text{ Ma.}\%$ bzw. $DU \geq 96,0 \text{ Ma.}\%$,
- Schüttdichte: $BD \geq 600 \text{ kg/m}^3$,
- Feinanteil: $F \leq 2,0 \text{ Ma.}\%$ bzw. $F \leq 3,0 \text{ Ma.}\%$.

Die Einhaltung der normierten physikalisch-mechanischen Eigenschaften können z. B. durch eine optimale Vorzerkleinerung mit Hilfe geeigneter Mühlentechnik und Homogenisierung, eine Optimierung der Prozessparameter während der Pelletierung (z. B. Drehzahl und Anpressdruck der Presse, Ausführung der Koller und Matrize) sowie durch eine Vorconditionierung des Pressgutes positiv beeinflusst werden. Der meist niedrige Wassergehalt (7-12 Ma.-%) begünstigt Heu für die Pelletierung – eine zumeist energieintensive Trocknung vor der Pelletierung ist somit unnötig. Die Konditionierung des Materials mit dem Ziel der Homogenisierung und Aktivierung der Bindungsmechanismen kann im einfachsten Fall durch Zugabe von Wasser oder Dampf erfolgen. Auch Bindemittel, wie z. B. Stärke, können die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften verbessern.

Zerkleinerung

Zumeist wird das Heu in Ballenform angeliefert. Diese müssen mittels Ballenreißer zunächst aufgelöst und zerkleinert werden. Nach der Grobzerkleinerung ist die Feinzerkleinerung der erste wesentliche Prozessschritt bei der Herstellung von Heupellets. Dabei wird ein homogenes Material mit einheitlichem Fasergrad erzeugt. Für die Herstellung von Pellets mit 6 mm Durchmesser wird als Richtwert eine Korngröße von $< 4 \text{ mm}$ angestrebt (Oberberger 2009). Aus Erfahrungswerten sollte die Korngröße der Aufmahlung stets geringer sein als der Durchmesser der Pellets. Gleichzeitig bedeutet jede Absenkung der Korngröße, wie in den nachfolgenden Ergebnissen gezeigt wird einen zusätzlichen Energieaufwand, was im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen dokumentiert wurde.

Das zu untersuchende Heu wurde zunächst mit Hilfe eines Strohhäckslers der Firma Hirlinger Landtechnik (Strohhexe) und einem Siebeinsatz von 25 mm grob zerkleinert. Anschließend folgte die Feinzerkleinerung auf ein pelletierfähiges Ausgangsmaterial. Für diese Feinzerkleinerung standen am DBFZ mehrere Mühlen mit unterschiedlicher Beanspruchungsart zur Verfügung. Beanspruchungsarten wie Reibung, Scherung, Schneiden oder Prall sind für die Zerkleinerung faseriger Biomasse, somit auch Heu, am geeignetsten (Siegle 2000). Folgende Mühlen im Labor- bzw. Technikumsmaßstab wurden vergleichend für die Zerkleinerung von Heu untersucht:

- Hammermühle, CHM 230/200-N3 der Firma NETZSCH - CONDUX Mahltechnik GmbH, Antriebsleistung von 4 kW mit einer Drehzahl von 3000 min^{-1} und einer Umfangsgeschwindigkeit von 36,1 m/s,
- Schneidmühle, Pulverisette 19 der Firma Fritsch GmbH, Antriebsleistung von 1,5 kW mit einer Drehzahl von 2800 min^{-1} und einer Umfangsgeschwindigkeit von 14,4 m/s,
- Prallmühle, Rekord A der VEB Nossen Maschinenbau, Antriebsleistung von 2,2 kW bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} und einer Umfangsgeschwindigkeit von 43,5 m/s.

Neben dem Vergleich der unterschiedlichen Beanspruchungsarbeiten wurden die Mühlen zusätzlich mit verschiedenen Konfigurationen betrieben. Eine Parameterübersicht ist in Abbildung 1 dargestellt.

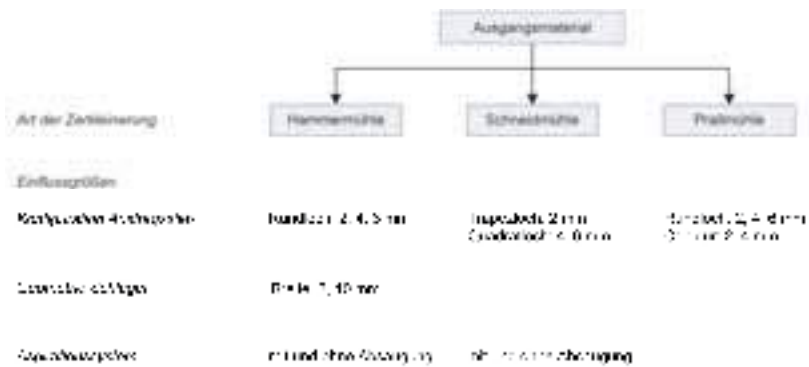


Abbildung 1: Parametervariationen der untersuchten Mühlen.

Zunächst wurden unter gleichbleibenden Bedingungen im Rahmen von Doppelbestimmungen Durchsatzversuche durchgeführt. Dabei konnte mittels Leistungsmessung der spezifische Energieverbrauch ermittelt werden. Für die Absaugung wurde ein handelsüblicher Industriestaubsauger der Firma Starmix mit einem Unterdruck von 259 hPa am Gebläse und einen Luftstrom von $230 \text{ m}^3/\text{h}$ genutzt. Die Vorteile einer Absaugung (Kranert 2010) sind:

- Kontinuierlicher Abtransport des zerkleinerten Materials bei gleichzeitiger Entstaubung der Mühle,
- Kühlen des Materials und der Mühle sowie
- Senken des spezifischen Energiebedarfs.

Weiterhin wurden an der TU BAF mit Hilfe eines CAMSIZER der Firma Retsch Technology eine optische Faseranalyse zur Bewertung des Zerkleinerungsergebnisses durchgeführt. Damit konnten die Dichte- und Verteilungssummenfunktion in Abhängigkeit des maximalen Feret-Durchmessers ($q_3(x_{Fe, \max})$ bzw. $Q_3(x_{Fe, \max})$) bestimmt werden. Der Feret-Durchmesser ist der Abstand zweier Tangenten, die senkrecht zur Messrichtung an das Partikel angelegt werden. Der Maximale Abstand stellt dabei die Faserlänge dar (Retsch 2005). Zusätzlich konnte das wirksame Zerkleinerungsverhältnis Z und die spezifische Oberfläche S_v berechnet werden.

Pelletierung

Zunächst sollte geklärt werden, inwieweit sich Heupellets unter Betrachtung der für die Halmgutpelletierung typischen Rohstoff- sowie den technischen Prozessparametern herstellen lassen. Dafür stand am DBFZ eine 15 kW-Ringmatrizenpresse vom Typ RMP 250 der Firma Münch Edelstahl GmbH mit einem rohstoffabhängigen Durchsatz von etwa 50-100 kg/h zur Verfügung. Gängige Prozessparameter der Pelletieranlage sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Prozessparameter der RMP 250

Matrizengeometrie D x L	6 x 30 mm
Drehzahl Presse (Matrize) n_M	148 min^{-1}
Drehzahl Förderschnecke n_S	6 min^{-1}
Abstand Koller/Matrize d	0,25 mm
Einstellung Abschermesser	30 mm

Zunächst wurde von allen Heuchargen der Zerkleinerungsgrad 4 mm Hammermühle mit Absaugung näher betrachtet. Die anschließende Konditionierung erfolgte auf fünf unterschiedliche Wassergehalte im Bereich 10-18 Ma.-%. Ziel dieser Wassergehaltsvariationen war es, bei gleichbleibenden Prozessparametern eine Abhängigkeit der physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften vom Ausgangswassergehalt aufzuzeigen.

Zur Beurteilung des Pelletierprozesses erfolgte stets eine Leistungs- und Durchsatzmessung sowie die Erfassung der Temperatur im Pressenraum bzw. der Pellets. Für die Bewertung des Pelletiererfolges wurden der Wassergehalt, die Schütt- und Rohdichte sowie die Abriebfestigkeit der Pellets nach DIN EN analysiert und wenn möglich den Grenzwerten der DIN EN 14961-6 gegenübergestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Bewertung der Zerkleinerung

Wie erwartet verhalten sich Durchsatz und spezifischer Energieverbrauch bei der Zerkleinerung in den untersuchten Mühlen gegenläufig. Aus Abbildung 2 geht deutlich hervor, dass mit kleiner werdendem Siebeinsatz in Verbindung mit abnehmendem Durchsatz die für die Zerkleinerung benötigte Energie größer wird.

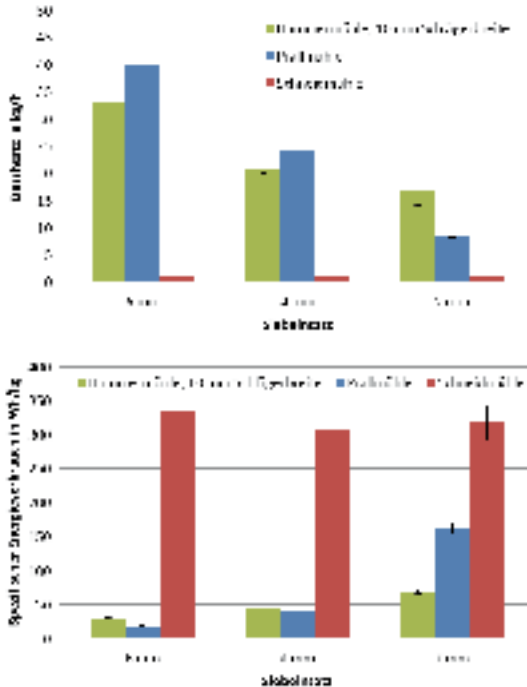


Abbildung 2: Durchsatz (links) und spezifischer Energieverbrauch (rechts) der Mühlen ohne Absaugung.

Aufgrund der geringen Antriebsleistung und der geringen Umfangsgeschwindigkeit zeigt sich bei der Schneidmühle ein sehr kleiner, nahezu konstanter Durchsatz in Verbindung mit einem sehr hohen Energieverbrauch. Die Prallmühle hat im Gegensatz zur Hammermühle einen stärkeren Durchsatzrückgang je kleiner die Sieböffnungsweite wird. Entsprechend steil steigt der spezifische Energieverbrauch der Prallmühle an. Neben den variierenden Durchsätzen, die vor allem durch die Mühle in Verbindung mit der vorhandenen Antriebsleistung und Drehmoment beeinflusst werden, zeigen sich Unterschiede in der Größenverteilung der Faserlängen. Auszugsweise ist in Abbildung 3 die Verteilungssumme in Abhängigkeit des maximalen Feret-Durchmessers dargestellt.

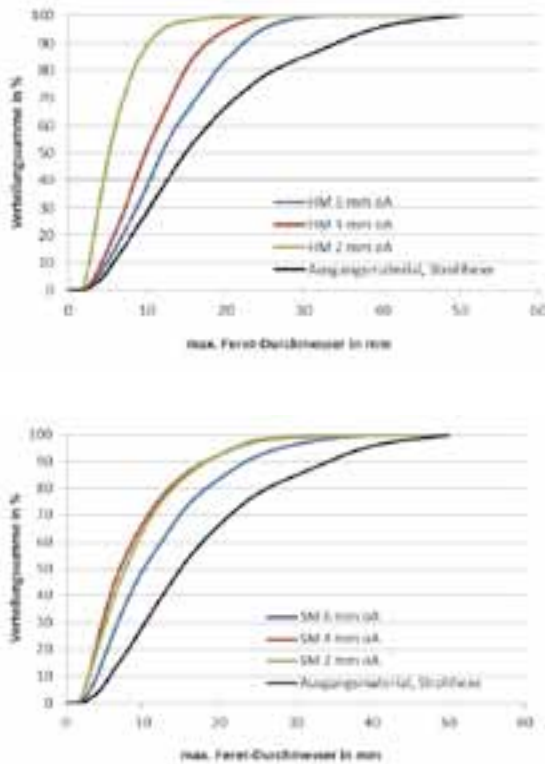


Abbildung 3: Verteilungssummenfunktion von zerkleinertem Heu mittel Hammermühle, 3 mm Schlagbreite (HM, links) und Schneidmühle (SM, rechts) mit variierenden Siebeinsätzen und ohne Absaugung (oA).

Aufgrund der vorrangigen Prallbeanspruchung, in Verbindung mit Scherung und Schneiden je schmaler die Schläger werden, zeigen Hammermühlen einen steilen Kurvenverlauf der Verteilungssumme, d.h. eine enge Faserlängenverteilung. Die Zerkleinerung mittels Schneidmühlen weist dagegen ein breiteres Band an Partikellängen auf, wie sie auch bei der Prallmühlenzerkleinerung hervorgeht. Durch die Nutzung einer Absaugung bei Hammer- und Schneidmühle konnte der Durchsatz bei allen untersuchten Siebkonfigurationen um 30-50 % gesteigert werden, wodurch der spezifische Energieverbrauch sinkt. Zusätzlich veränderte sich die Verteilung der Faserlängen. Bei der Schneidmühlenzerkleinerung wurde der Kurvenverlauf steiler, wogegen er bei der Zerkleinerung mittels Hammermühle flacher wird. Diese Gegenläufigkeit wird auch bei der spezifischen Oberfläche und dem relativen Zerkleinerungsverhältnis deutlich.

Welcher Zerkleinerungsgrad für eine anschließende Pelletierung optimal erscheint, ist Gegenstand noch laufender Untersuchungen. Für die ersten Pelletierungen wurde das Heu mit der Hammermühle, mit Absaugung und einem Siebeinsatz mit einer Öffnungsweite von 4 mm zerkleinert.

Bewertung der Pelletierung

Der Pelletierprozess gestaltete sich verhältnismäßig unproblematisch. Aufgrund der feinen Faserstruktur des Heus fand während der Pelletierung in den Fördersystemen keine Brückenbildung statt – das Material ist gut fließ- und rieselfähig. Der Temperaturbereich im Pressraum lag zumeist zwischen 45-55 °C. Die Pellettemperatur unmittelbar nach Austritt aus der Matrice wurde mittels Infrarotmessung ermittelt und lag mit 70-75 °C deutlich unter den für Holz üblichen 100-120°C. Als Ursache dafür ist der im Vergleich zu Holz geringerer Verholungsgrad des Pflanzenmaterials und die daraus resultierend „leichteren“ Pelletierungen zu nennen. Ein weiterer Hinweis für die leichtere Pelletierung ist der relativ geringe spezifische Energiebedarf während der Pelletierung von durchschnittlich 110 kW/kg und einem Durchsatz von 40-45 kg/h. Weiterhin konnte ein sehr geringer produktionsbedingte Feinanteil von 1-3 Ma.-% dokumentiert werden.

Zur Beurteilung des Pelletiererfolges wurden unter anderem die Abriebfestigkeit nach DIN EN 15210-1 und die Schüttdichte nach DIN EN 15103 der gekühlten und abgesiebten Pellets ermittelt. Bei nahezu allen Heuchargen konnten bei geringen Ausgangswassergehalten von 10-12 Ma.-% die nach Norm geforderten Pelletfestigkeiten von 97,5 Ma.-% erreicht werden. Allerdings nehmen die Festigkeiten mit steigendem Wasseranteil ab, wobei gleichzeitig die Wassergehalte der Pellets auf etwa 13-14 Ma.-% ansteigen (bei $w_A = 18-19$ Ma.-%). Dieses Phänomen findet sich auch in der Schüttdichte wieder, bei zunehmendem Ausgangswassergehalt sinkt die Schüttdichte. Wasser im Pellet kann nicht komprimiert werden. Der bei den erhöhten Temperaturen im Pressraum entstehende Wasserdampf verursacht die Bildung von Rissen und das Aufquellen der Pellets wodurch die Pelletqualität sinkt. Die Abnahme der Schüttdichte mit zunehmenden Wassergehalten wird auch durch die Reduzierung des Verdichtungsfaktors (Verhältnis Schüttdichte Ausgangsmaterial zu Schüttdichte Pellets) von ca. 5 auf 3,5 verdeutlicht.

Für den Einfluss der Additivmischung auf das Pelletierverhalten und die physikalisch-mechanischen Eigenschaften wurde zunächst eine Heucharge näher untersucht. Dieser Charge wurden im Konditionierschritt jeweils 1, 2 bzw. 3 Ma.-% Ca(OH)_2 , CaCO_3 bzw. Kaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{H}_4\text{O}_9$) zugegeben. Der Wassergehalt des Ausgangsmaterials lag immer bei etwa 13 Ma.-%. Auch hier wurde das Heu mit der Hammermühle, mit Absaugung und einem Siebeinsatz mit der Öffnungsweite von 4 mm zerkleinert. Alle weiteren Prozessparameter der Pelletieranlage wurden analog der vorangegangenen Versuche (Tabelle 2) eingestellt. Entgegen der Annahme, dass die Pelletfestigkeit bei dem Zusatz von Additiven abnehmen würde, wie es bei der Additivierung von Miscanthuspellets der Fall ist (Kirsten 2011) konnte bei der Pelletierung von additiviertem Heu kein Festigkeitsverlust dokumentiert werden. Die Abriebfestigkeiten lagen mit 97,8-98,6 Ma.-% über den Mindestanforderungen der DIN EN 14961-6. Auch die Schüttdichten konnten die geforderten 600 kg/m^3 mit durchschnittlich 675 kg/m^3 deutlich übertreffen. Eine mögliche Ursache könnte der im Heu vorkommende Proteingehalt und dessen Wirkung als natürliches Bindemittel sein. Der Zusammenhang zwischen Proteingehalt und Pelletierbarkeit wird derzeit weiterhin untersucht.

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine Pelletierung mit einem Pelletdurchmesser von 6 mm wird erfahrungsgemäß eine Korngröße von kleiner als 4 mm empfohlen (Oberberger 2009). Prall-, Hammer- oder Schneidmühlen sind geeignete Techniken für die Zerkleinerung von Biomassen (Siegle 2000). Auf dieser Basis wurden die Zerkleinerungsversuche mit diesen Mühlenarten im Labor- bzw. Technikumsmaßstab durchgeführt. Aus den Untersuchungen geht deutlich hervor, dass die Laborschneidmühle ohne Absaugung nicht für die Zerkleinerung von Heu geeignet ist. Die Faserlängen des zerkleinerten Heus bei allen untersuchten Mühlentechniken, bis auf die 2 mm-Siebeinsätze, liegen weit über den empfohlenen 4 mm. Kleinerer Siebeinsatz bedeute aber auch einen geringeren Durchsatz im Verbindung mit einem höheren Energiebedarf der Mühle. Wichtig ist eine homogene, aber breite Korngrößenverteilung des Materials (Mani 2004), um den bestmöglichen Faserverbund im Pellet zu erzeugen. Mit welcher Mühle und resultierenden Fasergrad bei der anschließenden Pelletierung die besten Pelletergebnisse erzielt werden kann, wird gegenwärtig untersucht.

Die Pelletierung von Heu kann mit den halmguttypischen Prozessparametern der Ringmatrizenpresse RMP 250 erfolgen. Es gibt keine signifikanten Unterschiede im Ablauf der Pelletierung der unterschiedlichen Heuchargen. Aufgrund der eher feinen Fasern treten keine, sonst typischen Probleme einer Stroh- oder Miscanthuspelletierung, wie Verstopfungen oder Brückenbildungen während der Förderung in den Pressenraum in Verbindung mit nachlassender Pelletqualität auf. Die nach DIN EN 14961-6 geforderten Schüttdichten und Abriebfestigkeiten konnten bei der Pelletierung mit niedrigen Ausgangswassergehalten (10-12 Ma.-%) von vielen Pelletchargen eingehalten werden. Da Heuballen bei trockener Lagerung üblicherweise einen Wassergehalt von etwa 7-12 Ma.-% aufweist, hat der Prozessschritt der Konditionierung nicht vordergründig die Aufgabe den Wassergehalt einzustellen, sondern das Material zu homogenisieren. Die Pelletierung verläuft in einem niedrigen Temperaturbereich ab, da der allgemeine Verholungsgrad sehr gering ist. Dies spiegelt sich auch im vergleichsweise niedrigen Energiebedarf.

Eine Additivierung mit Ca(OH)_2 , CaCO_3 bzw. Kaolin hat keinen signifikanten Einfluss auf die physikalisch-mechanischen Pelleteigenschaften.

Demzufolge können mit geeigneter Zerkleinerungs- und Pelletiertechnik Heupellets mit den geforderten physikalisch-mechanischen Eigenschaften für eine energetische Nutzung hergestellt werden.

Literatur

- Thrän, D., Müller, K. (2010) : Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen; Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung, Endbericht 02/2010.
- Kirsten, C. (2011): Additiv-Auswirkungen bei der Pelletierung und Verbrennung von Miscanthus, Poster, Europäische Pelletskonferenz, Wels, 02./04.03.2011.
- Kranert, M., Cord-Landwehr, K. (Hrsg.) (2010): Einführung in die Abfallwirtschaft, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Mani, S., Tabil, L. G., Sokhansanj, S. (2004): Grinding performance and physical properties of wheat and barley straw, corn stover and switchgrass; Biomasse & Bioenergy 27, S. 339-352.
- Obernberger, I. (2009): Herstellung und energetische Nutzung von Pellets : Produktionsprozess, Eigenschaften, Feuerungstechnik, Ökologie und Wirtschaftlichkeit, BIOS Bioenergiesysteme, Graz.
- Retsch Technology GmbH (2005): Characteristics - CAMSIZER® Messgrößen, Definitionsgrundlage DIN 66141, Stand 20.07.2005.
- Siegle, V. (2000): Biogene Brennstoffe in Aufbereitung und Verbrennung, Shaker Verlag, 2000.
- Statistisches Bundesamt (2012): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Landwirtschaftliche Bodennutzung, Anbau auf dem Ackerland; Fachserie 3 Reihe 3.1.2, Vorbericht 2012.
- Steenari, B.-M., Lundberg, A., Petterson, H., Wilewska-Bien, M., Andersson, D. (2009): Investigation of Ash Sintering during Combustion of Agricultural Residues and the Effect of Additives, Energy Fuels, 23, S. 5655-5662.
- Tonn, A. (2010): Verbrennungseignung von Landschaftspflegeheu, Bad Waldsee, 15.04.2010.

Danksagung

Die dargestellten Untersuchungen zur Heuzerkleinerung und -pelletierung stammen im Wesentlichen aus zwei Fördervorhaben:

- „Pelletierung von Gärresten und Landschaftspflegeheu unter Optimierung verbrennungstechnischer Eigenschaften“, ESF und SAB, Laufzeit 01/2012-12/2013
- „Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland“, BMU, Laufzeit 11/2009-03/2012

Den Fördergebern Land Sachsen, EU und Bundesministerium sei ausdrücklich für die finanzielle Unterstützung gedankt.

Aufbereitung und Energetische Nutzung von holzigem Landschaftspflegematerial

Christian Letalik

Adresse: C.A.R.M.E.N. e. V., Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: cl@carmen-ev.de

Abstract

Sehr weit verbreitet ist heute die energetische Verwertung von holzartigen Materialien aus der Landschaftspflege in Heiz-(kraft-)werken. Die Aufbereitung von Baumschnitt, z. B. von der Streuobstwiese, Baum- und Strauchheckenschnitt (allein in Schleswig – Holstein ca. 45.000 km Knicks) oder Strauchschnitt, der bei der Freihaltung von Wegen, Gewässern, Bahntrassen und Freileitungen anfällt, ist heute Stand der Technik. Mit mobilen oder stationären Schredder- oder Hackmaschinen können Baum- und Strauchschnitte nahezu aller Stärken zerkleinert werden. Durch einen verstellbaren Siebkorb am Zerkleinerer und einer eventuellen Nachbearbeitung in einer separaten Siebmaschine ist es möglich, je nach Anforderung der Heizanlage, einen homogenen Brennstoff mit definierten Kantenlängen und geringen Feianteilen herzustellen.

Derartig gewonnene Hackschnitzel haben je nach Wassergehalt einen um etwa 20 % niedrigeren Energiegehalt (Heizwert) als vergleichbare Waldhackschnitzel. Wichtig ist in jedem Fall, dass mineralische Feianteile wie Sand, Erde und kleine Steine vor der Anlieferung an die jeweilige Feuerungsanlage ausgesiebt werden. Denn solche Fremdstoffe vermindern nicht nur den Heizwert des Brennstoffes und damit die Kesselleistung, sondern verursachen auch Probleme in den Brennräumen und führen zu erhöhten Kosten für Wartung und Reinigung sowie bei der Ascheverwertung.

Maschinell sehr gut ausgestattet sind in aller Regel Kompostwerke, die mit erprobten Stoffstrommanagementkonzepten gerade so viel holzigen Grünschnitt zu Brennstoff aufbereiten, dass die Kompostierung der weniger holzigen, feuchteren Materialien noch gut im aeroben Milieu funktioniert. Nachfrage am Markt gibt es nach beiden veredelten Produkten ausreichend: Sowohl Kompostprodukte als auch Holzbrennstoffe sind sehr gefragt. Die Erlöse für derartige Produkte steigen stetig an. Die Novelle des EEG 2012 ordnet Landschaftspflegematerial in die Rohstoffvergütungsklasse II (= 8 cent/kWh_{el} zusätzlich zur Grundvergütung) ein, was zu einer erhöhten Nachfrage nach Holzbrennstoffen aus Landschaftspflegematerial führen dürfte. Kraftwerke ohne gutes Wärmekonzept wird es gemäß EEG 2012 nicht mehr geben.

Schlagwörter: Bedeutung der Biomasse im EE-Mix (Strom- und Wärmemarkt), Aufbereitung von holzigem Grünschnitt zu Qualitätsbrennstoff, Erfolgreicher Betrieb von Biomasseheiz-(kraft-)werken mit holzigen Brennstoffen aus der Landschaftspflege, Kosten/Nutzen

Stellung der Biomasse innerhalb der Europäischen Union und in Deutschland

Die Grafiken des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zeigen, welche rasante Entwicklung für die Biomasse in den letzten zwanzig Jahren stattgefunden hat (Abbildung 1+2). Sowohl im Strom- als auch im Wärmemarkt sind die Steigerungsraten bei der Biomasse hoch. Der Anteil aller Erneuerbaren Energien zusammen am gesamten Endenergieverbrauch (EEV) in der Bundesrepublik Deutschland lag Ende 2010 auf einem Niveau von über 11 %. Mehr als zwei Drittel davon, also 8,3 %, stammten 2010 allein aus Biomasse (Abbildung 3). Nur die Windkraft hatte im Bereich der Stromerzeugung einen ähnlich hohen Anteil wie die Biomasse und konnte eine vergleichbare Wachstumsdynamik verzeichnen.

Die Stromerzeugung aus Biomasse ohne Bioabfälle erreichte am Ende des Jahres 2010 knapp 14 % aus Biogas (ca. 5.900 Biogasanlagen) und etwa 11 % über feste Biomasse (Holzbrennstoffe) aus den etwa 265 (Heiz-)kraftwerken. Insgesamt ist das ein Viertel der gesamten aus Erneuerbaren Energien produzierten Strommenge (Abbildung 4). Die in den 265 Biomasse-(heiz-)kraftwerken erzeugte Strommenge lag damit in etwa gleichauf mit der von allen auf Dächern und am Boden installierten Photovoltaikanlagen (17,3 GW_{peak}) zusammen erzeugter Elektrizität. Die Stromerzeugung auf der Basis von Pflanzenöl-BHKWs spielt mittlerweile eine sehr untergeordnete Rolle und ist auf Grund von stark gestiegenen Preisen für Ölsaaten wachstumsdynamisch zum Stillstand gekommen.

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft spielt seit Jahrzehnten eine nicht zu unterschätzende Rolle, stagniert aber seit vielen Jahren auf hohem Niveau.

Im Wärmemarkt ist die Biomasse nach wie vor uneingeschränkter Spitzenreiter und mit Abstand die Hauptenergiequelle im Bereich der Erneuerbaren Energien (Abbildung 2).



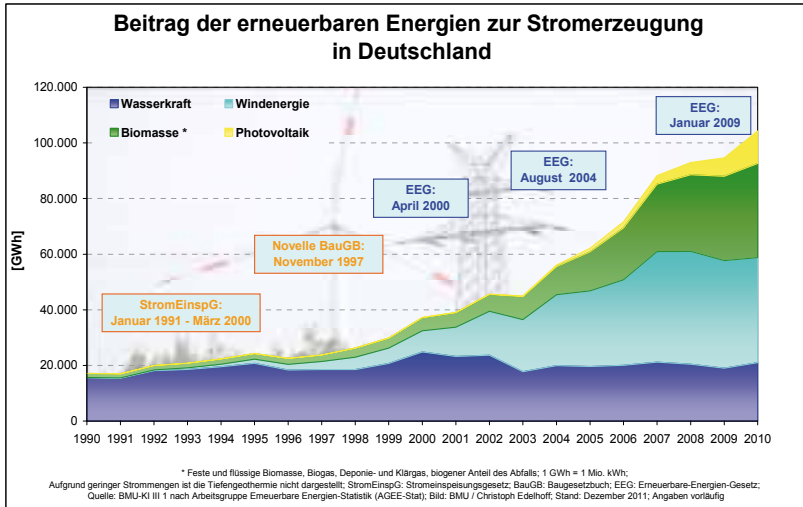


Abbildung 1: Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in der BRD in den Jahren 1990 bis 2010.

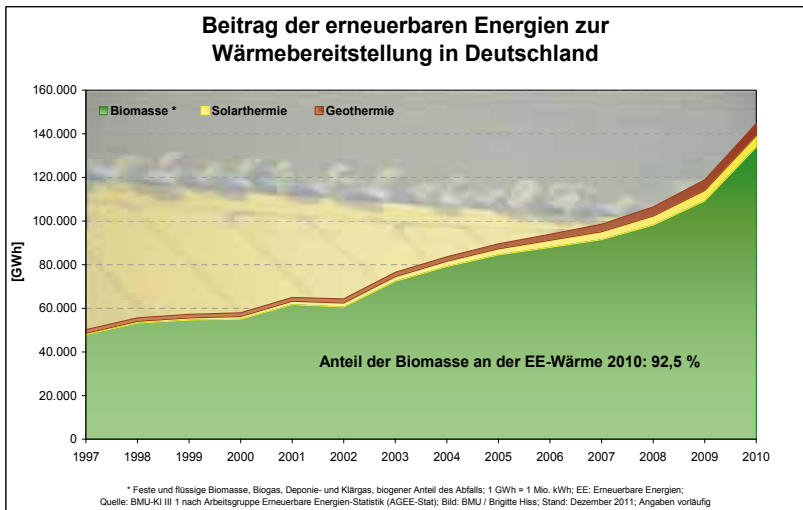


Abbildung 2: Wärmeerzeugung aus Erneuerbaren Energien in der BRD in den Jahren 1997 bis 2010.

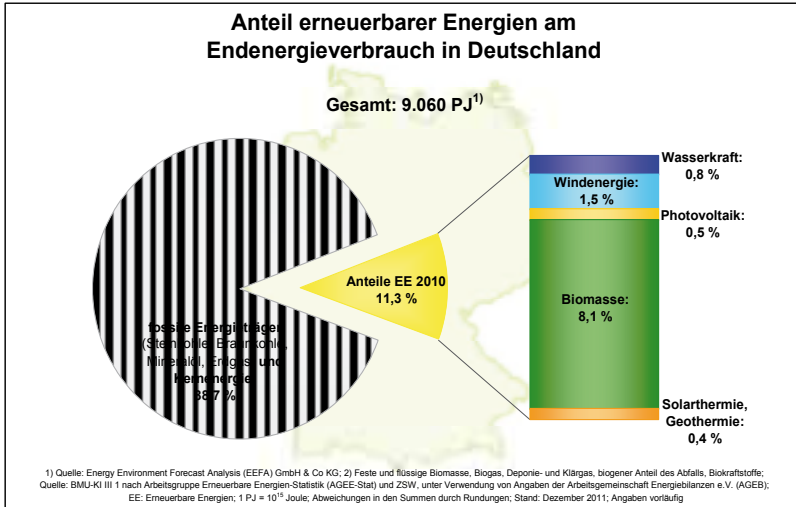


Abbildung 3: Anteil der Erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch in der BRD im Jahr 2010.

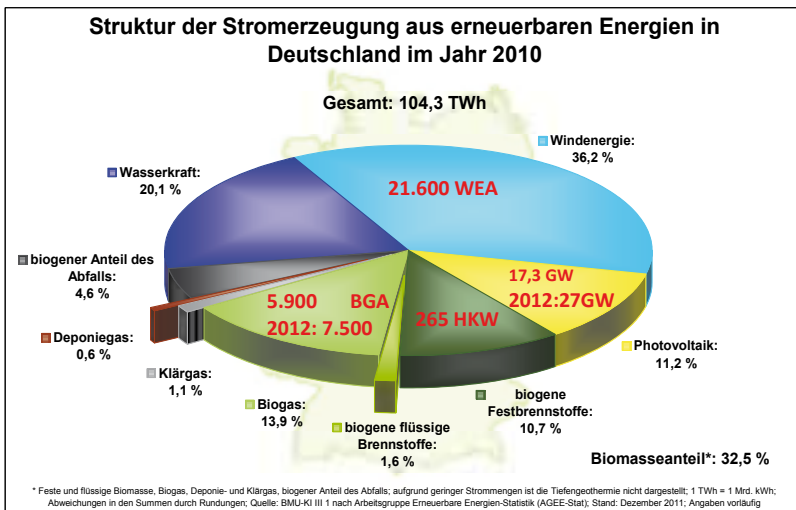


Abbildung 4: Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien (EE) in der BRD im Jahr 2010.



Abbildung 5: Entwicklungsszenario (Leitszenario BMU 2008) der Erneuerbaren Energien bis 2050.

Prognosen des BMU gehen jedoch davon aus, dass sich die Wachstumsdynamik im Bereich Biomasse in Zukunft stetig verlangsamen und im Jahr 2030 voraussichtlich endgültig zum Erliegen kommen wird (Abbildung 5). Bis dahin soll die Biomasse allerdings bis zu 15 % zum gesamten Endenergieverbrauch in der BRD beitragen, was nahezu einer Verdopplung der aktuellen 8 %-Quote gleich käme.

Gründe für diese Entwicklungsprognose sind

- die begrenzte Flächenverfügbarkeit durch zunehmende Versiegelung fruchtbarer Acker-, Grünland- und Forstflächen
- eine verstärkte Nutzungskonkurrenz um die verbleibenden Anbauflächen
- Grenzen des Ertragspotentials wegen standortbedingter Wasserknappheit
- regional abnehmende Akzeptanz für den Anbau von Energiepflanzen
- strikte Begrenzung von Grünlandumbruch durch die Politik; die EU fordert Schutz von Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand; (Stichwort „Greening“)

Als Beispiele für Nutzungskonkurrenzen können die stoffliche Verwertung von Holz als Rohstoff für die Papier- und Möbelindustrie einerseits und die energetische Verwertung von Holz als nachwachsender Brennstoff andererseits genannt werden. Um dieser Konfliktsituation rechtzeitig mit praktikablen Lösungen zu begegnen fordern anerkannte Fachgremien wie der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) mit Nachdruck Energie aus allen verfügbaren organischen Abfall- und Reststoffen bzw. Koppelprodukten aus der Industrie konsequent nutzbar zu machen.

Das Stichwort heißt: „Biomasse aus Reststoffen ersetzt sog. Anbaubiomasse“. Eine wachsende Bedeutung gewinnt in diesem Szenario die Nutzbarmachung von Landschaftspflegematerialien.

Qualitätskriterien Holzbrennstoffe

Die wertgebenden Qualitätskriterien bei Holzbrennstoffen sind in erster Linie

- Der Wassergehalt, der entscheidend den Heizwert bestimmt
- Die Korngrößenverteilung in Haupt-, Fein- und Grobfraction
- Der Aschegehalt

Neu entwickelte Europäische Normierungen, insbesondere die DIN EN 14961, ersetzen zunehmend die bisher weit verbreitete Ö-Norm M 7133, um standardisierte Qualitätskriterien für Holzbrennstoffe vorzugeben.

Aufbereitungsschritte, -kosten

- Getrennte Annahme der holzigen Fraktion bzw.
- Vorsortierung der angelieferten Grüngutmengen
- Erster Zerkleinerungsschritt, möglichst mit direkt anschließendem Siebschnitt (1. Arbeitsgang)
- Zwischenlagerung mit Selbsterwärmung und Abtrocknung (Verluste!)
- Evtl. zweiter Zerkleinerungsschritt / evtl. erneute Absiebung
- Lagerung
- Lieferung zur Feuerungsanlage

Aufbereitungsziele

- Gleichmäßige Wassergehalte stellen einen gleichmäßigen Betrieb des Holzkessels sicher; trockene Brennstoffe sichern die Nennleistung des Heißwasser- bzw. Dampfkessels (zu beachten ist die Spitzenlast im Winter!),
- Geringer Gehalt an Feinteilen begrenzt die Staubemissionen, den Ascheanteil und die Verschlackung der Brennräume.
- Damit ist der ordnungsgemäße (BImSchG und TA Luft), wartungsarme und damit kostenoptimierte Betrieb der Anlage sichergestellt.
- Geringer Gehalt an Übergrößen sichert störungsarme Laufzeiten der Anlage.

Aus Tabelle 1 unten geht hervor, dass die Aufbereitung von holzigen Landschaftspflegematerialien zwischen 20 und 45 € pro t Brennstoff kostet. Die Höhe der Kosten ist stark abhängig davon, wie sortenrein das Holzige Material zur Verfügung steht und wie schlagkräftig der vorhandene Maschinenpark zum Einsatz kommt. Optimalisiert werden kann das Aufbereitungsverfahren, wenn die Leistung von Zerkleinerungsaggregat und Siebmaschine aufeinander abgestimmt wird (siehe Abbildung 6).

Die Gesamtkosten liegen bei ca. 20 bis 45 Euro pro Tonne Brennstoff. inkl. Lieferung frei Heiz-(kraft-)werk (vgl. Tabelle 1). Der Heizwert liegt um etwa 20 % unter dem von Waldhackgut mit vergleichbarem TS-Gehalt. Demgegenüber steht der Wert der so aufbereiteten Brennstoffe. Ein Berechnungsbeispiel soll im folgenden Kapitel näherungsweise die bei der Aufbereitung gewonnene Wertschöpfung aufzeigen.



Abbildung 6: Aufbereitung in einem Arbeitsgang, Foto: Komptech.

Tabelle 1: Kosten Brennstoffaufbereitung pro t Brennstoff

Kosten Brennstoffherstellung		
Maßnahme	Kosten in €	Maßnahme
Annahme	3 bis 5	Getrennte Erfassung
1. Schritt	10 bis 15	Zerkleinerung mit Absiebung
Zwischenlager	2 bis 5	möglichst unter Dach
2. Schritt	0 bis 10	Nachzerkleinerung / Absiebung
Zwi-Summe	15 bis 35	Gesamt-Aufbereitung
Lieferung	5	Abrollerzug oder Schubboden
	(20 to; 25 km)	
Lieferung	10	Abrollerzug oder Schubboden
	(20 to; 60 km)	
Summe	20 bis 45 €	Gesamtaufwand

Kriterien für eine Preisgestaltung, Reales Beispiel, Inbetriebnahme 2011

Tabelle 2: Stromerlöse in € pro MG Brennstoff in einem Biomasseheizkraftwerk mit 2 MW_{el}

Wasser- gehalt Holz	Energie- gehalt Holz	Stromer- zeugung	Stromer- zeugung	Stromer- zeugung	
H ₂ O in %	MWh/to	WG _{el} in %	WG _{el} in %	WG _{el} in %	WG _{el} in %
		15	20	25	WG _{el} in %
50	2	300	400	500	kWh _{el}
		47,7	63,6	79,6	€ Strom/t
40	2,3	345	460	575	kWh _{el}
		54,9	73,2	91,5	€ Strom/t
30	2,7	405	540	675	kWh _{el}
		64,4	85,9	107,4	€ Strom/t

- Biomasseheizkraftwerk mit 10 MW Nennwärmeleistung (NWL), max. 2 MW_{el}
- Dauerleistung: 1,8 MW_{el} in durchschnittlich 8.000 Jahresstunden
- Inbetriebnahmejahr 2011; voller NawaRo/LaPf-Bonus, 100 % KWK-Bonus,
- 159 €/MWh Stromerlös, davon ca. 86 €/MWh GT (Grundvergütung)
- ca. 45 €/MWh NawaRo-Bonus sowie ca. 28 €/MWh KWK-Bonus
- Wärmeauskopplung 7,22 MW_{th} 8.000 h p. a., Wärmepreis ca. 20 €/MW_{th}

Tabelle 3: Wärmeerlöse in € pro MG Brennstoff in einem Biomasseheizkraftwerk mit 2 MW_{th}

Wasser- gehalt Holz	Energie- inhalt Holz	Wärmeaus- kopplung	Wärmeaus- kopplung	Wärmeaus- kopplung	
H ₂ O in %	MWh/to	WG _{th} in %	WG _{th} in %	WG _{th} in %	WG _{th} in %
		25	50	75	WG _{th} in %
50	2	500	1000	1500	kWh _{th}
		10	20,0	30,0	€ Wärme/t
40	2,3	575	1150	1725	kWh _{th}
		11,5	23,0	34,5	€ Wärme/t
30	2,7	675	1350	2025	kWh _{th}
		13,5	27,0	40,5	€ Wärme/t

- Der pro Tonne Brennstoff aus Landschaftspflegematerial erzielbare Strom-erlös liegt im vorliegenden Beispiel zwischen 47,70 € und 107,40 €/t.
- Die ausgewählte Variante mit 20 % WG_{el} und 40 % H₂O im Brennstoff entspricht einem realisierbaren Stand der Technik bei Brennstoffaufbereitung und Verstromungstechnologie und führt zu Stromerlösen von 73,20 €/t.
- Bei einem vorstellbaren Wärmepreis von 20 €/MWh (Gaspreis für Großverbraucher im Gewächshaus!) steigen die Gesamterlöse aus Strom- und Wärmeverkauf je nach Höhe der Wärmeauskopplung pro t Brennstoffeinsatz um 10 bis 40,50 €/t. Die Variante mit 40 % H₂O im Brennstoff und optimaler Wärmenutzung ist standortbezogen – das HKW umgeben von Anzuchtgewächshäusern – realisierbar und liegt bei 34,50 €/t (volle Ausnutzung des KWK-Bonus!).
- Die gesamte Wertschöpfung aus Strom- und Wärmeverkauf liegt demnach bei 117,70 €/t Brennstoff. Der Preis für gute Brennstoffe aus Landschaftspflegematerial sollte die Größenordnung von 35 % (das ist der durchschnittliche Anteil der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten eines Biomasseheizkraftwerkes) der oben aufgezeigten „Energieerlöse“ pro t Brennstoff nicht unterschreiten, je nach Heizwert des Brennstoffes und Qualität der Aufbereitung (Aschegehalt!). Das ergibt einen Mindestpreis von ca. 40 € pro t gut aufbereitetem Brennstoff aus Landschaftspflegematerial.
- Als Orientierung bei der Preisbewertung nach oben (bis max. 60 €/t) sollte neben Brennstoffqualität und Entfernung zwischen Feuerungs- und Aufbereitungsanlage die Erlössituation des belieferten Biomasseheizkraftwerkes dienen. Hoch effiziente KWK-Anlagen sind hoch rentabel und können sich daher über höhere Preise Brennstoffkontingente sichern.

Fazit

Derzeitige Marktsituation für Brennstoffe aus Landschaftspflegematerial:

- Aufbereitungskapazitäten für Landschaftspflegematerial (vorrangig Kompostieranlagen und sog. Biomassehöfe) sind ausreichend vorhanden
- Verwertungspreise für Grünut sind gesunken
- Das Thema Klimaschutz gewinnt an Bedeutung
- Preise für fossile Brennstoffe steigen bzw. schwanken sehr stark
- Die Nachfrage nach Holzbrennstoffen steigt kontinuierlich
- Die Anforderungen an Brennstoffe sind bekannt (Ö-Norm → DIN EN 14961)
- Verschiedenste, meist positive Erfahrungen wurden gemacht. In Bayern sind im Jahr 2012 etwa 450 Heizwerke und ca. 50 Biomasse-HKW in Betrieb. Etwa 10 bis 20 % verfeuern auch Brennstoff aus Landschaftspflegematerial.

Technische Voraussetzungen

- Die mechanische Aufbereitung von holzigem Landschaftspflegematerial zu qualitativ ausreichend guten Holzhackschnitzeln ist Stand der Technik.
- Zerkleinerungs- und Siebmaschinen, Lagerkapazitäten, und – wenn nötig – Trocknungsanlagen sind vorhanden. Zahlreiche Biogasanlagen verfügen über ausreichend Abwärme, die bisher ungenutzt bleibt. Die in der Novelle des EEG 2012 geforderte Wärmequote (60 % KWK-Strom) könnte beim Bau von neuen Biogasanlagen zu einer vermehrten Anzahl von Trocknungsprojekten führen.
- Die Aufbereitungstechnik ist auf den Kompostanlagen und sog. Biomassehöfen, im Anlagenverbund oder über Dienstleistungsunternehmen verfügbar. Transportkapazitäten sind ausreichend vorhanden.

Zielkonflikte und Lösungsvorschläge im Kompostwerk

- Qualität des Rottevorganges nicht vernachlässigen; Dreieck zwischen Sauerstoffversorgung, Holzabtrennung und Umsetzhäufigkeit; jahreszeitliche Schwankungen der Inputmaterialien!
- Entzug von (nicht zu viel) Holz beschleunigt die Rotte, erhöht die Erlöse (Gegenrechnung mit Kompostverkauf) verringert den Flächenbedarf, aber kann zu erhöhten Emissionen führen.
- Sowohl hochwertige Holzbrennstoffe als auch gütegesicherte Komposte sind gefragt. Kompostanlagenbetreiber vermarkten beide Produktgruppen mit wachsendem Erfolg zu tendenziell steigenden Preisen (Abbildungen 7 und 8).

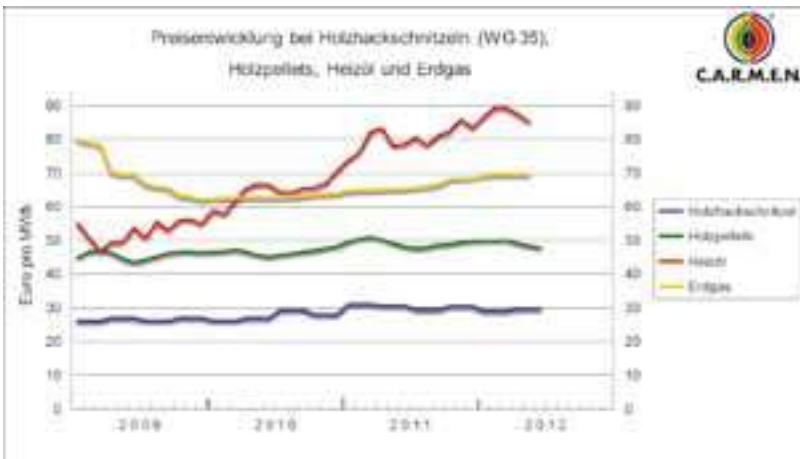


Abbildung 7: Preisentwicklung bei fossilen und bei Biomassebrennstoffen.



Abbildung 8: Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln in Euro pro Tonne.

Deutschlandweite Berechnung von Humusbilanzen zur Bestimmung des Getreidestrohpotenzials - Einfluss von veränderten Produktionsbedingungen

Christian Weiser*, Frank Reinicke¹

*Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

¹Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung e.V. (INL)

Adresse: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Ackerbau und Düngung, Naumburger Straße 98, 07743 Jena

*E-Mail: christian.weiser@tll.thueringen.de

Abstract

Mit dem Mechanismus der Doppelgewichtung von reststoffbasierten Kraftstoffen in der Erneuerbaren Energien Direktive und der Einsatzstoffklasse II in der EEG-Novelle 2012 wird die Nutzung landwirtschaftlicher Nebenernteprodukte und Reststoffe zur Energiebereitstellung stimuliert. Je nach Konversionsform stehen im Anschluss mehr oder weniger humuswirksame Produkte für eine Rückführung auf die Ackerfläche zur Verfügung. Für die Beurteilung von Pflanzenproduktionssystemen im Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit kommt der Humusbilanz als Nachhaltigkeitsindikator eine wesentliche Rolle zu. Während auf Ebene der Landkreise (vgl. Abbildung 1) in einer IST-Analyse (1999-2007) überwiegend positive Bilanzsalden errechnet werden, können diese Ergebnisse mittelfristig variieren. Ausgehend von der IST-Analyse der Humusbilanzen wurde untersucht, inwieweit sich verändernde Produktionsbedingungen auf die berechneten Humusbilanzen und Biomasseabfuhrpotenziale auswirken. Die möglichen zukünftigen Produktionsbedingungen wurden in einer Szenarienanalyse für alle Landkreise untersucht. An vier ausgewählten Landkreisen wurden verschiedene Bioenergieoptionen untersucht. Die Szenarienanalyse zeigt, dass bei leicht veränderten Produktionsbedingungen mittelfristig 8-13 Mio. t Getreidestroh nicht als organische Düngung für ausgeglichene Humusbilanzsalden benötigt werden und damit für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehen. Sollten Koppelprodukte noch stärker nachgefragt werden sind höhere Potenziale durch technische Weiterentwicklungen und humuswirksame Kompensationsmaßnahmen möglich. Die vier untersuchten Kreise weisen deutlich unterschiedliche Bewirtschaftungsstrukturen und Standortbedingungen auf. Die betrachteten Technologievarianten veränderten ausgehend vom jeweiligen Bioenergiepfad die Fruchtfolge sowie die Mengen und Qualitäten der organischen Substanz nach der Konversion. Die Ergebnisse zeigen die Eignung der Humusbilanzen zur Bewertung von verschiedenen Bioenergieoptionen aus Sicht der Bodenfruchtbarkeit. So können durch die Wahl einer geeigneten Energiebereitstellungsform verbunden mit einer angepassten Fruchtfolgegestaltung an den jeweiligen Standorten extreme Humusbilanzsalden und damit verbundene Risiken vermieden werden.

Schlagwörter: Getreidestrohpotential, Humusbilanz, Bodenfruchtbarkeit

Einleitung

Die Bioenergie hat einen Anteil von ca. 70 % an der Energiebereitstellung aus den Erneuerbaren Energien (AGEE-Stat 2012). Die Produktion von Biomasse in der Landwirtschaft wird unter anderen von der Ressource Boden limitiert. Zusätzlich konkurrieren sowohl innerhalb als auch außerhalb landwirtschaftlicher Produktionssysteme unterschiedliche Ansprüche um den Boden. Diese Konflikte sollen durch die verstärkte Nutzung von landwirtschaftlichen "Reststoffen" bzw. Nebenernteprodukten zur Bioenergiebereitstellung entschärft werden. Durch verbesserte rechtliche Rahmenbedingungen, wie den Mechanismus der Doppelgewichtung von reststoffbasierten Kraftstoffen in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie oder die höher vergütete Einsatzstoffklasse II im Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG 2012), wird die Nutzung von Nebenernteprodukten wie z.B. Stroh stimuliert. Daraus ergibt sich ein steigender Druck zur Abfuhr dieser Nebenernteprodukte von der Ackerfläche. Diese Entwicklung kann im Hinblick auf die Bodenfruchtbarkeit neue Probleme hervorrufen, wenn die Menge abgefahrener organischer Substanz zu groß ist und gleichzeitig die Konversionsform der Energiebereitstellung eine humuswirksame Rückführung ausschließt.

Methoden

Wegen seiner Eignung zur energetischen und stofflichen Verwertung wird Getreidestroh als „Einheit“ für die organische Substanz ausgewählt. Mit Hilfe des Indikators Humusbilanz kann die Menge an Getreidestroh bestimmt werden, welche auf Landkreisebene nicht zur organischen Dünung für die Erreichung eines ausgeglichenen Bilanzsaldos notwendig ist. Die Humusbilanzierung erfolgt nach VDLUFA (2004) obere und untere Bedarfswerte sowie nach der dynamische Humuseinheitenmethode (Hülsbergen 2003).

Zur Bewertung der berechneten Potentiale bis zum Jahr 2020 werden Szenarien unterstellt. Im Szenario 1: „Business as usual“ sind die Erträge aller Fruchtarten um 1 % erhöht und der Anteil der Rinder mit Weidehaltung sowie die Dauer des Weidegangs verringert. Im Szenario 2: „Stroh bekommt einen Wert“ wird von einer extrem gesteigerten Nachfrage nach Stroh zur energetischen und stofflichen Verwertung ausgegangen. Der Anteil des bergbaren Getreidestrohs wird von 66 % auf 90 % erhöht. Zur Steigerung der Humussalden wird in jedem Landkreis der Anteil der Ackergräser an der Ackerfläche um 5 % auf Kosten des Silomaisanbaus erhöht. Das Szenario 3: „Extensivierung“ unterstellt Ertrags-einbußen von 10 % als Folge einer extensiveren Bewirtschaftung. Zur Beantwortung der Frage wie ein erweiterter Energiepflanzenanbau auf die Humusbilanzen und Getreidestrohpotentiale wirkt, werden am Beispiel von vier Landkreisen (vgl. Abbildung 1) unter verschiedenen Varianten der Bioenergiebereitstellung Humusbilanzen errechnet und Auswirkungen auf das Getreidestrohpotential betrachtet.

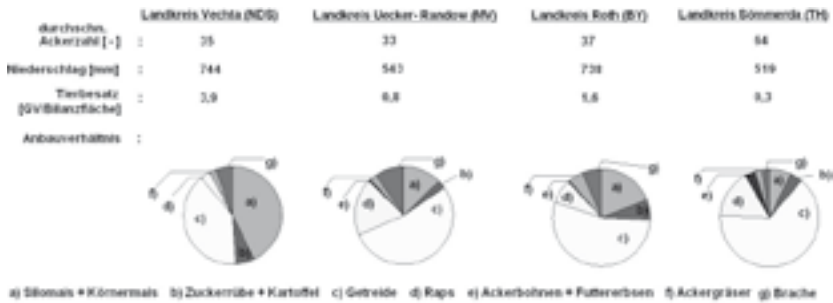


Abbildung 1: Charakteristika der Kreise Vechta, Uecker-Randow, Rost und Sömmerda als Grundlage zur Variantenrechnung.

In Variante 1 steht die gesteigerte Produktion der Biokraftstoffe der 1. Generation wie Biodiesel und Bioethanol im Fokus. Dazu werden der Rapsanbau um 20 % und der Winterweizenanbau um 10 % erhöht. Allen anderen Kulturarten sind in Abhängigkeit ihrer realen Flächenanteile auf die Restfläche zugeordnet. Die Variante 2 betrachtet eine erweiterte Biogaserzeugung. Auf 30 % der Ackerfläche soll zu 70 % Silomais und zu 30 % Getreideganzpflanzensilage (Triticale) produziert werden. Diese Fläche ist auf Kosten der Getreideanbaufläche verfügbar. Die anfallende Biogassgülle wird auf die Fläche des Landkreises rückgeführt. Variante 3 stellt eine Alternativversion zu Variante 2 dar. Statt Silomais soll Klee und für Ganzpflanzensilage Luzerne auf den 30 % der Bilanzfläche angebaut werden. Die Variante 4 untersucht die Auswirkung der Etablierung von Kurzumtriebsplantagen auf 30 % der Ackerfläche. Die Aufteilung der Kulturarten auf der Restfläche bleibt entsprechend ihrer realen Anbauverhältnisse konstant. Innerhalb der Variantenrechnungen sind Daten zum Standort und zur Tierhaltung konstant.

Ergebnisse

Die berechneten Humusbilanzen sind wie in Abbildung 2 dargestellt überwiegend positiv. Lediglich zwei Landkreise nach VDLUFA unteren Werten, 31 Kreise nach den oberen Bedarfswerten und 57 Landkreise nach der dynamischen HE-Methode zeigen negative Bilanzsalden.

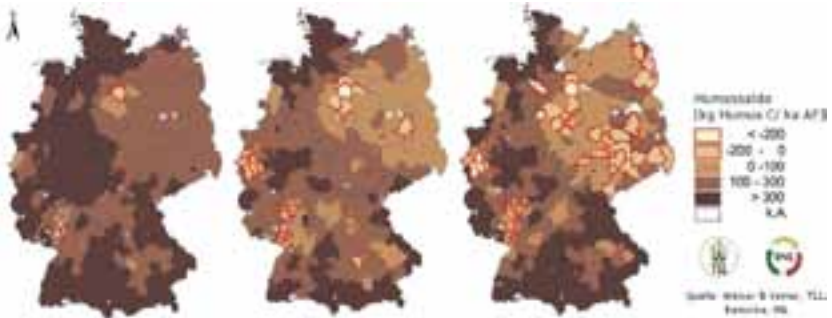


Abbildung 2: Humussalden auf Landkreisebene nach VDLUFA untere Bedarfswerte/Cross Compliance (links), VDLUFA oberer Bedarfswerte (mittig) und dynamische HE-Methode (rechts).

Die Ergebniskarten der Humusbilanzen zeigen, dass die Regionen mit hohem GVE-Besatz hohe Humussalden ausweisen. Ebenfalls spiegelt sich eine hohe Konzentration von Kartoffeln und Rüben in der Fruchtfolge in negativen Salden in den entsprechenden Landkreisen (wie z.B. Landkreis Uelzen und Rhein-Pfalz) bei allen drei Methoden wieder. Der geringe Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger sowie die daraus resultierende Relevanz der Strohdüngung zum Humusersatz werden in den viehschwachen Gebieten deutlich und von den drei Methoden unterschiedlich bewertet.

Den Strohpotentialen liegt das mittlere aufgewachsene theoretische Potential an Getreidestroh (\emptyset der Jahre 1999, 2003 & 2007) von 30 Mio. t Frischmasse (FM) zu Grunde. Von diesem theoretischen Potential sind in der Regel nur zwei Drittel bergbar und etwa 5 Mio. t FM werden als Tiereinstreu benötigt. Nach den unteren Bedarfskoeffizienten der VDLUFA ergibt sich ein Gesamtpotential von 13 Mio. t FM Getreidestroh, welches nicht zur organischen Düngung notwendig ist. Bei einem mittleren Heizwert von 14,3 MJ/kg Getreidestroh FM entspricht das einem Energiepotential von 186 PJ. Die Humusbilanzen wirken zu 9 % als limitierender Faktor. Die höchsten Potentiale finden sich nach dieser Bilanzmethode in dem Landkreis Börde (244.000 t FM) und bezogen auf die Getreidefläche im Landkreis Ostholstein (39,9 dt FM/ha). In 52 Landkreisen kann kein Getreidestrohpotential ausgewiesen werden.

Werden die oberen Bedarfswerte der VDLUFA verwendet, verringert sich die potentielle Strommenge zur energetischen Nutzung auf 10 Mio. t FM. Diese Menge entspricht einem Energiepotential von 143 PJ. Die Humusbilanzen wirken bei 38 % der Landkreise limitierend. Die höchsten Strohüberschussmengen finden sich nach dieser Methode im Landkreis Nordwestmecklenburg (211.000 t FM) und relativ zur Getreideanbaufläche ebenfalls in Ostholstein (39,9 dt FM/ha). Die Anzahl der Kreise, in denen kein Potential zur Verfügung steht, erhöht sich auf 81.

Die nutzbare Strohmenge reduziert sich dann weiter, wenn die dynamische HE-Methode verwendet wird. In Summe sind nur noch 8 Mio. t FM Getreidestroh entnehmbar. Dieser Wert entspricht in etwa 114 PJ. Die Humusbilanzen sind bei der dynamischen HE-Methode zu 32 % der limitierende Faktor. In diesem Fall ist der Landkreis mit der höchsten absoluten Strohmenge Diepholz (140 000 t FM) und relativ zur Getreidefläche der Landkreis Soest (33,4 dt/ha). Insgesamt werden 109 Landkreise ohne überschüssiges Getreidestroh ausgewiesen. Weitere Ausführungen sowie eine graphische Darstellung der Strohpotentiale findet sich in Weiser et al. (2011).

Im ersten Szenario steigen die Humusbilanzen leicht an. Das ist begründet durch den höheren Anfall der organischen Dünger. Der leicht gestiegene Einstreubedarf wird durch den erhöhten Aufwuchs von 1 % Getreidestroh kompensiert. Das Getreidestrohpotential erhöht sich bis 2020 um 1-3 %. Nach den Annahmen zum zweiten Szenario steigen die Humusbilanzen durch den erhöhten Ackerfütteranbau. In Folge der höheren Bergbarkeit steigt das Strohpotential stark auf 12-19 Mio. t FM an. Im dritten Szenario verringern sich entsprechend der verminderten Stroh- und Gründüngung die Humusbilanzen. Entsprechend vermindern sich die die Strohpotentiale um -14,4 % VDLUFA untere Werte, -26,7 % VDLUFA obere Werte und -2,2 % dynamische HE-Methode.

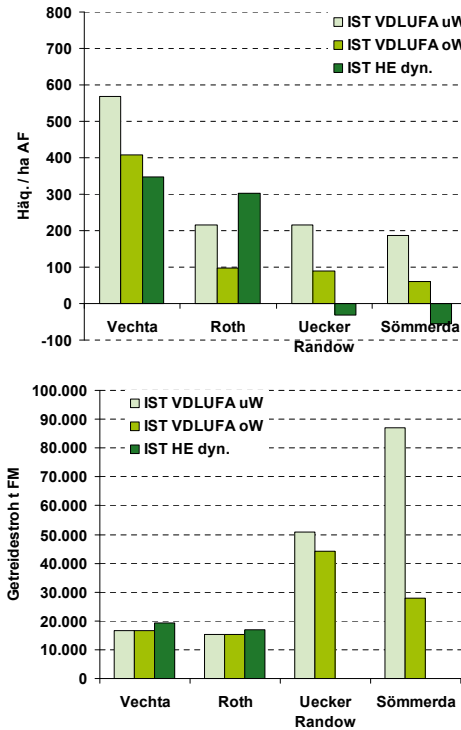


Abbildung 3: Darstellung der Humusbilanzsalden (oben) und der Getreidestrohpotentiale (unten) der vier ausgewählten Landkreise in der IST-Analyse.

In Variante 1 (vgl. Abbildung 4) führen nach beiden VDLUFA-Methoden ein Anbaurückgang der stark zehrenden Hackfrüchte und die Ausweitung der Ölpflanzen- und Getreidefläche zu einem höheren Humussaldo als in der IST-Analyse (vgl. Abbildung 3). Die gleichfalls stattfindende Reduktion der Humusmehrerfläche fällt aufgrund ihres geringen Ausgangsverhältnisses dabei kaum ins Gewicht. Dem stehen die Bilanzsalden der dynamischen HE-Methode gegenüber. Hier erhöht sich der ausgewiesene Humusbruttobedarf und der Saldo verringert sich demzufolge. So ist vor allem die Humusbilanz in dieser Variante bestimmend für die Änderungen in den Strohpotentialen der Kreise. Ein vermehrter Anbau von Raps und Weizen für Biodiesel bzw. -ethanol erhöht bei Bilanzierung nach VDLUFA das Strohpotential, wenn in diesen Kreisen die Humusbilanz ursprünglich der limitierende Parameter ist. Mit der dynamischen HE-Methode wird die Begrenzung der Strohentnahme durch den Humussaldo eher verstärkt. Die Erhöhung des Potenzials durch höhere Anfallmengen bei positiven Humussalden stellt eine Ausnahme dar.

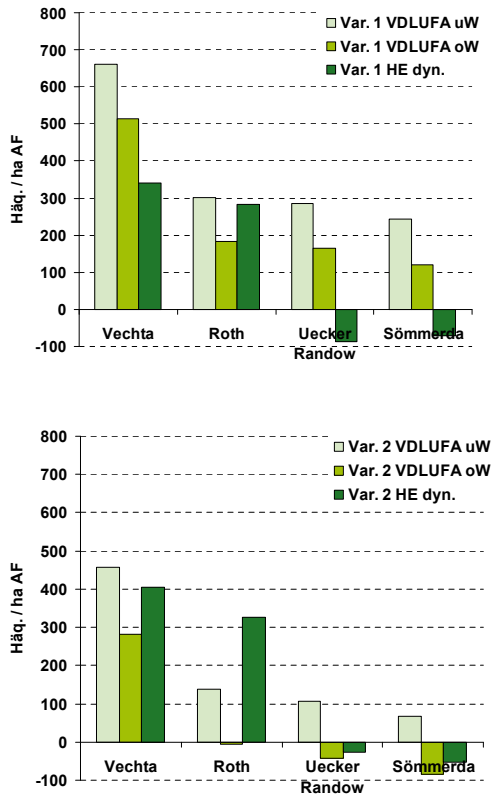


Abbildung 4: Darstellung der Humusbilanzsalden Variante 1 (oben) und der Variante 2 (unten).

In Variante 2 führen die höheren Konzentrationen von Silomais in der Fruchtfolge nach VDLUFA zu höherem Humusbedarf. Dieser kann auch nicht durch die Rückführung der Biogasgülle im Vergleich zur Ausgangssituation kompensiert werden. Demzufolge sinken in dieser Variante die Humussalden nach Methodik der VDLUFA. In der dynamischen HE-Methode halten sich ein veränderter Humusbedarf und eine zusätzliche Reproduktion durch den Einsatz entstehende Biogasgülle das Gleichgewicht, so dass es nur marginale Änderungen im Saldo zur IST-Bilanz gibt. Bezüglich des Strohaufkommens kann von einer Halbierung ausgegangen werden. Als Fazit lässt sich eine starke Konkurrenz ertragreicher Biogassilagen zur energetischen Nutzung von Stroh erkennen. Analog zu Variante 2 führt die Änderung in der Anbaustruktur in Variante 3 zur Reduktion des aufgewachsenen Strohs. Deutlich positiv wirkt sich erwartungsgemäß ein um 30 % gestiegener Anteil von Humusmehrern auf die Salden aus (vgl. Abbildung 5). Zusätzlich werden die entstehenden Biogasgülle über organische Düngung in den Bilanzen berücksichtigt. Somit sind für alle Bilanzmethoden höhere Salden festzustellen. Mit der dynamischen HE-Methode können daher auch für die Landkreise Uecker-Randow und Sömmerda positive Salden ausgewiesen werden. Die sich in dieser Variante ableitenden Potenziale differenzieren in ihrer Veränderung zur Ausgangssituation. Wie schon in der vorangegangenen Variante sind durch Reduzierung im Anbauumfang von Getreide für die Landkreise Vechta und Roth keinerlei Strohmenge mehr zur energetischen Verwertung frei. In den anderen beiden Kreisen ist die Anfallsmenge ebenfalls begrenzt. Allerdings stehen auch bei einer Bilanz nach HE-Methode diese Restmengen vollständig für die Nutzung bereit. Somit ist diese Variante für Flächenbewirtschaftung mit negativen oder für die Strohnutzung limitierende Humussalden interessant.



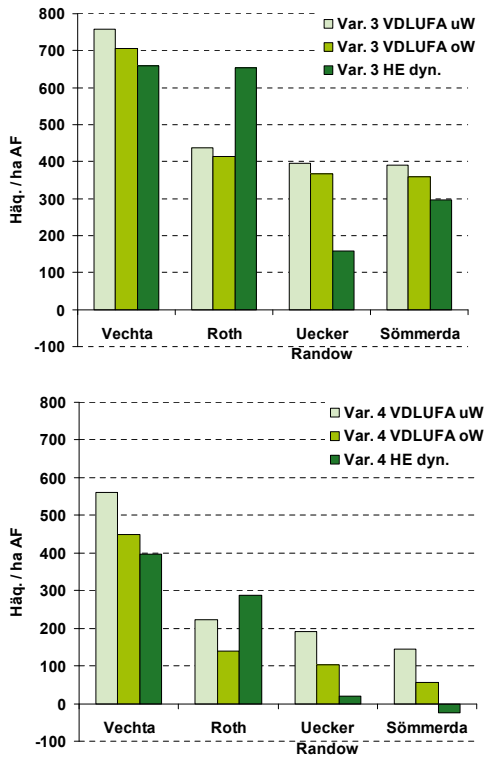


Abbildung 5: Darstellung der Humusbilanzsalden Variante 3 (oben) und der Variante 4 (unten).

In Variante 4 sind die Änderungen in den Humussalden unabhängig von der Bilanzmethode nur marginal. Unterschiede werden nur in den Landkreisen mit ausgeprägter Tierhaltung sichtbar. Aufgrund der um 30 % verringerten Bilanzfläche verteilen sich die anfallenden organischen Dünger ebenfalls auf einer kleineren Fläche. Für eine erweiterte Nutzung von Kurzumtriebsplantagen ist festzuhalten, dass insgesamt weniger energetisch nutzbares Stroh bereitsteht. Nur Landkreise, in denen der Humussaldo in der Ausgangssituation limitierend wirkte, können unter Umständen höhere Potentiale vorweisen.

Zusammenfassung und Ausblick

Abhängig von der verwendeten Humusbilanzmethode weisen 2-57 Landkreise negative Humussalden auf. Die errechneten die Humusbilanzen limitieren das Getreidestrohpotential zu 9-38 %. Daraus resultiert eine Spanne im Überschussstroh von 8-13 Mio. t FM bei ausgeglichener Humusbilanz. Bezogen auf den Heizwert können 114-186 PJ bereitgestellt werden. Die einzelnen Nutzungspfade wirken in unterschiedlicher Art auf die Humusbilanzen auf Kreisebene und auf das Strohpotential. Durch die Wahl einer standortangepassten Bioenergiebereitstellung verbunden mit einer entsprechenden Fruchtfolgegestaltung können extreme Humusbilanzsalden vermieden werden. Bei der Ausweisung der Potentiale sind weitere Nachhaltigkeitsindikatoren wie z.B. Nährstoffbilanzen zu betrachten.

Um die Treffsicherheit der Humusbilanzen kurzfristig zu erhöhen, ist es notwendig, die Datenbasis für die Eingangsdaten zu präzisieren. Dazu zählen vor allem: die Humusreproduktionsleistung von Stroh sowie von Gärresten aus nachwachsenden Rohstoffen. Sehr hohen Einfluss auf die Resultate haben Unsicherheiten bezüglich des Korn-Stroh-Verhältnisses. Dieses Verhältnis stellt eine wesentliche Größe zur Bestimmung des Strohertrages dar und ist abhängig von Fruchtart, Sorte und Standort (Boden und Witterung). Die fruchtartenspezifischen Verhältnisse in der Düngeverordnung sind mit standortspezifischen Korrekturfaktoren zu untersetzen.

Literatur

Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (2012): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011 Grafiken und Tabellen Stand: Juli 2012, URL http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf (Stand: 10.09.2012).

Hülsbergen, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Unternehmen. Shaker Verlag, Aachen.

Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) (Hrsg.) (2004): Standpunkt „Humusbilanzierung – Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland“. Bonn, Eigenverlag.

Weiser, C., Zeller, V., Thrän, D., Vetter, A. (2011): Spatial Distribution Of Straw Potentials In Germany. Proceedings of the 19th European Biomass Conference & Exhibition. Berlin, 6th.-10th. June 2011, 260-265.

Hydrothermale Carbonisierung biogener Reststoffe am Beispiel der Halleschen Wasser und Stadtwirtschaft GmbH

Andreas Clemens*, Regina Blümel¹, Falko Kietzmann¹, Marco Klemm*, Daniela Nehl¹

*Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)

²Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH

Adresse: DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

*E-Mail: andreas.clemens@dbfz.de

Abstract

Im Rahmen des durch das BMU geförderten Projektes „Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft“ (FKZ: 03KB049) errichtet die Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft GmbH (HWS) in Kooperation mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) derzeit eine Demonstrationsanlage zur Hydrothermalen Carbonisierung mit einer Jahreskapazität von 2.500 Tonnen Input. Das Ziel ist die Bereitstellung alternativer Biomasse durch die Erschließung und effiziente Nutzung biogener Reststoffe mit Hilfe der Hydrothermalen Carbonisierung. Um die Verfügbarkeit der bei der HWS anfallenden, biogenen Reststoffströme an Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest und deren Qualität zu ermitteln, wurden diese über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt und deren chemische und brennstofftechnische Eigenschaften analysiert. Ergänzend wurden am DBFZ umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Eignung der genannten Stoffströme für die HTC zu beurteilen und den Einfluss der Prozessparameter auf den Carbonisierungsprozess zu untersuchen. Hierzu wurden die biogenen Reststoffe in einem 500 ml Laborautoklaven carbonisiert. Die Experimente haben gezeigt, dass sich der Kohlenstoffgehalt der drei Ausgangsmaterialien Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest durch die HTC erhöht und der Sauerstoffgehalt verringert. Die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der HTC-Kohle ist umso stärker, je höher die Versuchsparmeter Temperatur und Verweilzeit sind. Die Elementarzusammensetzung der Einsatzstoffe ist mit der Elementarzusammensetzung von Holz identisch. Nach der HTC besitzen die HTC-Kohlen eine mit Braunkohle vergleichbare Zusammensetzung. Der Brennwert der HTC-Kohlen ist direkt proportional zum Kohlenstoffgehalt und steigt damit in gleicher Weise wie der Kohlenstoffgehalt mit zunehmender Reaktionstemperatur und zunehmender Verweilzeit.

Schlagwörter: Hydrothermale Carbonisierung, Biogene Reststoffe, Demonstrationsanlage, Alternative Festbrennstoffe

Ausgangssituation

Tonnen Landschaftspflegematerial und Grünschnitt aus der privaten und öffentlichen Garten- und Parkpflege und circa 9.000 Tonnen Bioabfall (Stand 2011) ein. Der Bioabfall wird als Substrat an eine externe Biogasanlage geliefert. Das erzeugte Biogas wird in einem BHKW Die Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft (HWS) sammelt und entsorgt jedes Jahr circa 13.000 in Strom und Wärme umgewandelt. Im Anschluss an die Fermentation des Bioabfalls fallen circa 6.000 Tonnen Gärrest an. Das Landschaftspflegematerial wird dagegen an externe Kompostanlagen weitergegeben und dort kompostiert. Nur ein sehr geringer Teil wie Äste und Baumstämme wird aussortiert, zerkleinert und an Biomasseheizkraftwerke verkauft, um dort zur Bereitstellung von Strom und Wärme energetisch genutzt zu werden. Das Ziel des durch das BMU geförderten Projektes „Integrierte Verwertungsanlage und Strategie für kommunale Biomasse – HTC Hallesche Wasser und Stadtwirtschaft“ ist die Errichtung und der Betrieb einer Anlage zur Hydrothermalen Carbonisierung (HTC). Die HTC-Anlage wird das bestehende Verwertungskonzept der HWS um die Bereitstellung alternativer Biomasse-Festbrennstoffe durch die Erschließung und effiziente Nutzung biogener Reststoffe mit Hilfe der HTC erweitern.

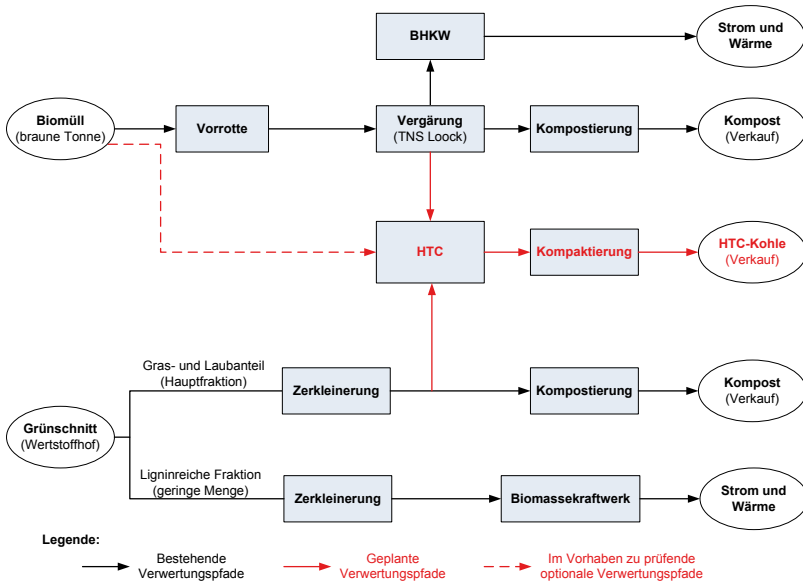


Abbildung 1: Verwertungsstrategie für biogene Reststoffe in Halle/Saale (Quelle: DBFZ)

Hydrothermale Carbonisierung

Die HTC ist ein thermochemischer Konversionsprozess, der in heißem Hochdruckwasser als Reaktionsmedium stattfindet. Nach einer Vorwärmung erfolgt ein teilweiser bis vollständiger Abbau der Biomassepolymere zu kleineren Bausteinen. Ausgehend von dieser Zwischenstufe erfolgt unter Bildung von Wasser ein Wiederaufbau langer Kohlenstoffketten. Die HTC führt infolgedessen zu einer Kohlenstoffanreicherung in der Feststoffphase und zu einer Änderung der inneren Struktur. Aus diesem Grund wird die HTC auch als künstliche Inkohlung bezeichnet. Die HTC arbeitet mit einer Temperatur von 180 bis 250 °C und einem Druck von 10 bis 40 bar. Die Reaktionsdauer beträgt mehrere Stunden. Als Produkt entsteht eine HTC-Kohle, die mit ihren chemischen und brennstofftechnischen Eigenschaften zwischen Holz und Braunkohle liegt. Die entwässerte und getrocknete HTC-Kohle bietet sich damit als alternativer biogener Festbrennstoff an. Da die HTC in einer wässrigen Phase stattfindet, sind vor allem nasse Biomassen, bei denen die notwendige Trocknung dem Einsatz in klassischen, thermochemischen Verfahren entgegensteht, als Inputstoff für die HTC geeignet. Die HTC bietet damit die Möglichkeit, dieses Potenzial an bisher ungenutzten, biogenen Reststoffen wie biogenen Siedlungsabfällen (Biotonne), Klärschlamm, Gärresten, gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Reststoffen sowie Resten aus der Lebensmittelindustrie für eine energetische Anwendung zu erschließen und effizient einzusetzen.

HTC-Laboruntersuchungen

Um die Verfügbarkeit der bei der HWS anfallenden, biogenen Reststoffströme Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest und deren Qualität zu ermitteln, wurden diese Stoffströme über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt und deren chemische und brennstofftechnische Eigenschaften analysiert. Ergänzend wurden am DBFZ umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Eignung der genannten Stoffströme für die HTC zu beurteilen und den Einfluss der Prozessparameter auf den Carbonisierungsprozess zu untersuchen.

Zunächst wurden die drei Ausgangsmaterialien aufbereitet. Hierzu wurden die drei Substrate jeweils im Ofenschrank bei 105 °C getrocknet und auf eine Partikelgröße von 6 mm gemahlen. Dieser Aufbereitungsschritt war notwendig, um homogene Proben für die HTC-Versuche zur Verfügung zu stellen und die Proben zu lagern. Anschließend wurde die Elementarzusammensetzung (DIN EN 15104), der Brennwert (DIN 14918) und der Aschegehalt (DIN EN 14775) der drei biogenen Reststoffe bestimmt.

Danach wurde jedes Substrat bei einer Temperatur von 180, 200 und 220 °C jeweils für die Verweilzeit von 2, 4 und 6 h hydrothermal carbonisiert. Tabelle 1 zeigt die Versuchsmatrix der HTC-Laboruntersuchungen. Die Carbonisierungsversuche wurden in einem 500 ml Laborautoklaven (Berghof, Highpreactor BR-300) durchgeführt. Der Laborautoklav war mit einem elektrischen Heizmantel sowie einem Rührwerk ausgestattet. Für jeden HTC-Versuch wurde eine Suspension bestehend aus 100 g biogenen Reststoff und 300 g Wasser in den Reaktor gefüllt. Es wurde kein Katalysator verwendet. Der Reaktor wurde verschlossen und auf die Reaktionstemperatur erwärmt. Die Heizrate betrug 2 K/min. Nach Erreichen der Reaktionstemperatur wurde die Temperatur für die definierte Verweilzeit von 2, 4, bzw. 6 h konstant gehalten. Anschließend wurde die Heizung abgestellt und das System kühlte sich wieder auf Raumtemperatur ab. Die Suspension wurde während der

gesamten Versuchsdauer mit 100 Drehungen pro Minute gerührt, um während der Aufheiz- und Abkühlphase den Wärmeübergang von der Reaktorwand ins Innere zu erhöhen und während der Reaktionsphase eine homogene Temperaturverteilung zu realisieren. Die Reaktorinnentemperatur und der Reaktorinnendruck wurden während der gesamten Versuchsdauer online gemessen. Nachdem sich das System wieder auf Raumtemperatur abgekühlt hatte, wurde der Autoklav über das Gasentnahmeventil entspannt. Die Gasphase wurde für eine nachfolgende Analyse aufgefangen und dessen Volumen gemessen. Die HTC-Kohle-Wasser-Suspension wurde gewogen und mittels Vakuumfiltration in eine feste und flüssige Phase aufgetrennt. Die feste Phase wurde im Ofenschrank bei 105°C getrocknet. Anschließend wurden die Elementarzusammensetzung (DIN EN 15104), der Brennwert (DIN 14918) und der Aschegehalt (DIN EN 14775) der HTC-Kohle bestimmt. Die Flüssigphase wurde für eine spätere Analyse aufbewahrt.

Tabelle 1: Versuchsmatrix der HTC-Laborversuche

HTC	2 h	4 h	6 h
180 °C	X	X	X
200 °C	X	X	X
220 °C	X	X	X

Ergebnisse der Carbonisierungsversuche

Abbildung 2 zeigt die Produktverteilung der HTC von Bioabfall. Die Massenanteile sind wasser- und aschefrei (waf) dargestellt. Demnach ist die als HTC-Kohle bezeichnete feste Phase mit einem Massenanteil von 72 bis 89 Ma% das Hauptprodukt der HTC. Die flüssige Phase besitzt einen Anteil von 10 bis 27 Ma%. Bei der HTC von Bioabfall entsteht weniger als 5 Ma% Gas. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Anteil der festen Phase mit steigender Temperatur abnimmt und dem entgegengesetzt die Anteile der flüssigen und gasförmigen Phasen mit steigender Temperatur zunehmen. Der Einfluss der Verweilzeit auf die Produktverteilung ist dagegen gering.

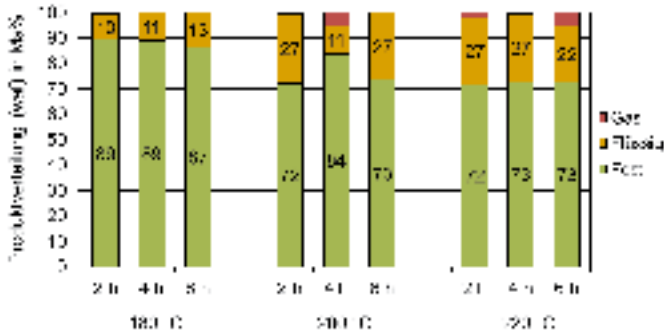
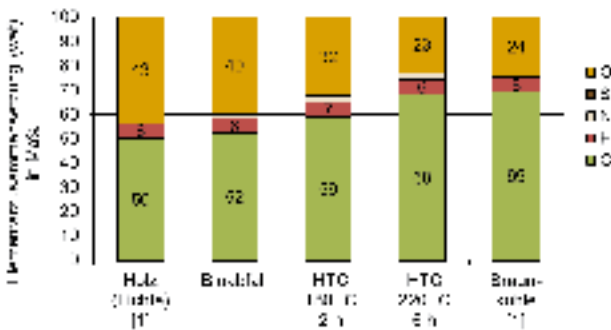


Abbildung 2: Produktverteilung der HTC von Bioabfall; (waf = wasser- und aschefrei).

Abbildung 3 zeigt die wasser- und aschefreie Elementarzusammensetzung der HTC-Kohlen von Bioabfall für die Versuchsparameter 180 °C und 2 h sowie für den Versuch 220 °C und 6 h im Vergleich zur Elementarzusammensetzung des unbehandelten Bioabfalls, von Holz und von Braunkohle. Das Ausgangsmaterial, der Bioabfall, besitzt eine ähnliche Zusammensetzung wie Holz. Durch die HTC wird der Kohlenstoffgehalt gesteigert und der Sauerstoffgehalt verringert. Die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der HTC-Kohle ist umso stärker, je höher die Versuchsparameter Temperatur und Verweilzeit sind. Der Kohlenstoffgehalt steigt von 52 Ma% im Ausgangsmaterial über 59 Ma% in der HTC-Kohle bei den geringsten Versuchsparametern bis auf 68 Ma% in der HTC-Kohle bei den höchsten Versuchsparametern. Die HTC-Kohle des Versuches 220 °C und 6 h weist eine ähnliche Zusammensetzung wie Braunkohle auf (vgl. Abbildung 3). Die Kohlenstoffgehalte aller neun HTC-Versuche mit Bioabfall sind in Tabelle 2 dargestellt.



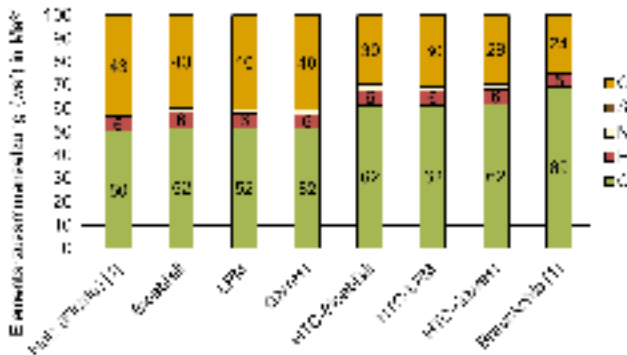
[1] Kaltschmitt, M. et al.: Energie aus Biomasse (2008)

Abbildung 3: Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Bioabfall (waf = wasser- und aschefrei).

Tabelle 2: Kohlenstoffgehalt und Brennwert der HTC-Kohlen von Bioabfall; (waf = wasser- und aschefrei)

	Kohlenstoffgehalt in Ma% (waf)			Brennwert in MJ/kg (waf)		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h
180 °C	59	60	60	23	24	24
200 °C	61	61	62	25	25	25
220 °C	63	61	68	25	26	27

Die HTC des Landschaftspflegematerials und des Gärrestes weisen gleiche Ergebnisse auf. Abbildung 4 zeigt für die drei Substrate Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest die jeweils aus den neun HTC-Versuchen ermittelten durchschnittlichen Elementarzusammensetzungen der HTC-Kohlen sowie die Elementarzusammensetzungen der Ausgangsmaterialien, von Holz und von Braunkohle. Demnach besitzen die drei Ausgangsmaterialien eine identische Elementarzusammensetzung und sind in ihrer Zusammensetzung mit Holz gleichzusetzen. Die durchschnittliche Elementarzusammensetzung der HTC-Kohlen ist ebenfalls identisch. Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt der HTC-Kohlen liegt mit 62 Ma% zwischen dem Kohlenstoffgehalt der Ausgangsmaterialien (52 Ma%) und dem Kohlenstoffgehalt der Braunkohle (69 Ma%).



[1] Kaltschmitt, M. et al.: Energie aus Biomasse (2009); LPM = Landschaftspflegematerial

Abbildung 4: Übersicht über die Elementarzusammensetzung der HTC-Kohle von Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest; (waf = wasser- und aschefrei).

Tabelle 2 stellt für alle neun HTC-Kohlen aus Bioabfall die Brennwerte den Kohlenstoffgehalten gegenüber. Der Brennwert der HTC-Kohlen steigt in gleicher Weise wie der Kohlenstoffgehalt mit zunehmender Reaktionstemperatur und zunehmender Verweilzeit. Der Bioabfall besitzt bei einem Kohlenstoffgehalt von 52 Ma% einen Brennwert von 21 MJ/kg. Bei der HTC mit den Parametern 180 °C und 2 h steigen der Kohlenstoffgehalt auf 59 Ma% und der Brennwert auf 23 MJ/kg. Nach der HTC bei 220 °C und 6 h beträgt der Kohlenstoffgehalt der HTC-Kohle 68 Ma% und der Brennwert 27 MJ/kg. Die HTC führt im Zuge

der Kohlenstoffanreicherung zu einer Steigerung des Brennwertes. Abbildung 5 stellt die Brennwerte der drei Ausgangsmaterialien und aller HTC-Kohlen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes dar. Es ist zu erkennen, dass der Brennwert direkt proportional mit steigendem Kohlenstoffgehalt zunimmt.

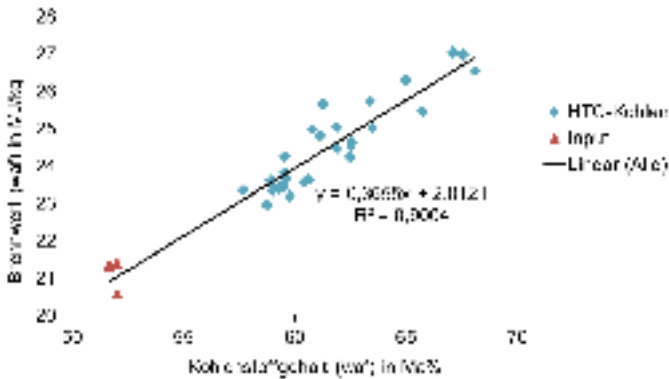


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffgehalt und dem Brennwert der HTC-Kohlen von Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest; (waf = wasser- und aschefrei).

Die HTC-Anlage Halle

Im Rahmen des Projektes entsteht die erste integrierte HTC-Anlage, die kommunale biogene Reststoffe in HTC-Kohle umwandelt. Die Demonstrationsanlage wird in das bestehende Verwertungskonzept integriert und von der HWS betrieben. Die HTC-Anlage wird von der Firma Artec Biotechnologie GmbH aus Bad Königshofen gebaut und im April 2013 in Betrieb genommen. Die auf dem Gelände der Deponie Halle-Lochau errichtete Anlage ist für einen jährlichen Durchsatz von 2.500 Tonnen biogene Reststoffe, bezogen auf einen Trockensubstanzgehalt (TS) von 50 Ma%, und einer jährlichen Produktion von 1.000 Tonnen HTC-Kohle (90 Ma% TS) ausgelegt. Abbildung 6 zeigt die Prozesskette der HTC-Anlage Halle.

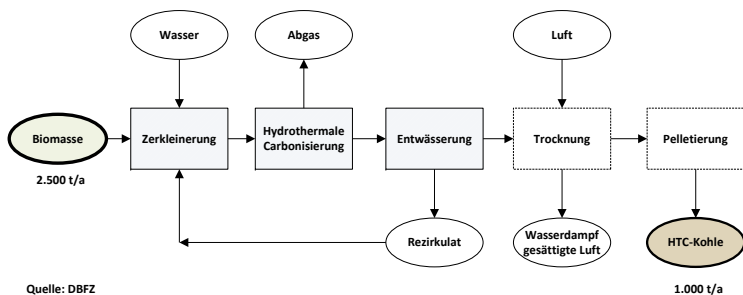


Abbildung 6: Prozesskette der HTC-Anlage Halle/Saale (Quelle: DBFZ)

Die HTC-Anlage verfügt über einen kontinuierlich betriebenen Rohrreaktor, in dem die hydrothermale Umwandlung der Biomasse stattfindet. Im ersten Prozessschritt wird die Biomasse zerkleinert und mit Wasser vermischt. Danach wird die wässrige Biomassensuspension in den Reaktor gefördert und hydrothermal carbonisiert. Anschließend wird die HTC-Kohle mechanisch entwässert. Das abgetrennte Prozesswasser wird in den Anmischbehälter am Anfang der Anlage zurückgeführt und dort mit neuer Biomasse vermischt. Die entwässerte HTC-Kohle wird thermisch getrocknet und pelletiert. Obwohl die HTC ein exothermer Prozess ist, wird die Anlage sowohl für die Erwärmung als auch für die Trocknung zusätzliche Energie in Form von Wärme benötigen. Die Prozesswärme für die HTC-Anlage Halle wird durch bislang ungenutzte Abwärme eines Blockheizkraftwerkes, in dem Deponiegas verstromt wird, bereitgestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die HTC der biogenen Reststofffraktionen Landschaftspflegematerial, Bioabfall und Gärrest ergeben sich folgende Kernaussagen: die als HTC-Kohle bezeichnete feste Phase ist das Hauptprodukt der HTC. Der Kohlenstoffgehalt der drei Ausgangsmaterialien wird durch die HTC erhöht. Der Sauerstoffgehalt nimmt ab. Die Zunahme des Kohlenstoffgehaltes bzw. die Abnahme des Sauerstoffgehaltes in der HTC-Kohle ist umso stärker, je höher die Versuchsparameter Temperatur und Verweilzeit sind. Die Elementarzusammensetzung der Einsatzstoffe ist mit der Elementarzusammensetzung von Holz identisch. Die HTC-Kohlen besitzen dagegen eine mit Braunkohle vergleichbare Zusammensetzung. Der Brennwert der HTC-Kohlen ist direkt proportional zum Kohlenstoffgehalt und steigt damit in gleicher Weise wie der Kohlenstoffgehalt mit zunehmender Reaktionstemperatur und zunehmender Verweilzeit.

Die HWS errichtet eine Demonstrationsanlage zur HTC biogener Reststoffe mit einer Jahreskapazität von 2.500 Tonnen Input. Nach Inbetriebnahme der HTC-Anlage wird das DBFZ den Anlagenbetrieb wissenschaftlich begleiten und die Stoff- und Energiebilanzen für die gesamte Prozesskette bestimmen. Weiterhin werden der Einsatz der HTC-Kohlen in Kleinfeuerungsanlagen im Technikum untersucht und Fragen zur Erlangung des Produktstatus und zum damit verbundenen Ende der Abfalleigenschaften der HTC-Kohlen beantwortet werden. Abschließend wird das Verwertungskonzept technisch, ökonomisch und ökologisch evaluiert.

Erzeugung von Bioagglomeraten auf der Basis ligninhaltiger Ablaugen der Papier- und Zellstoffindustrie

Satyanarayana Narra*, Florian Logsch, Claudia Glaser, Peter Ay

*Brandenburg Technische Universität Cottbus

Adresse: Brandenburg Technische Universität Cottbus

Siemens-Halske-Ring 8, LG-4A, 03046 Cottbus

*E-Mail: ls-at@tu-cottbus.de

Abstract

Ligninhaltige Biomasse besitzt ein sehr hohes Einsatzpotential und kann sowohl als CO₂-neutraler Biomassebrennstoff als auch einer breitgefächerten stofflichen Nutzung zugeführt werden. Ligninhaltige Ablaugen fallen derzeit in großem Umfang bei der Zellstoff- und Papierproduktion an. Aber auch die biogenen Reststoffe von Biogas- und Bioethanolanlagen stellen Ausgangsstoffe für die Gewinnung von Ligninen dar. Lignin besitzt im wasserfreien Zustand einen mit Steinkohle vergleichbaren Heizwert, einen geringen Asche- und Schwefelgehalt und ist hydrophob. Nach derzeitigem Stand der Technik werden die in der Zellstoff- und Papierproduktion anfallenden Ablaugen einer energetischen Nutzung (Verbrennung im Laugenkessel) zugeführt. Die gewonnene Energie wird zur Deckung des Eigenenergiebedarfs genutzt bzw. in das öffentliche Netz abgegeben. Kritisch zu bewerten ist der hohe Energieanteil, der bei der Verbrennung der Ablaugen als Verdampfungswärme notwendig ist (Wasseranteil der Ablaugen bis zu 70 %). Die stoffliche Nutzung der technischen Lignine ist durch ungünstige Handlings-Eigenschaften wie Heterogenität, starke Klebeneigung, Staubexplosionsrisiko eingeschränkt. Im Rahmen der Arbeit soll ein Verfahren, bestehend aus den Prozessschritten Agglomeratbildung und anschließende Säurebehandlung vorgestellt werden, das sowohl die ungünstigen Handlings-Eigenschaften als auch die Prozessschritte selbst optimiert und im Ergebnis ein Produkt erzeugt, das

- (i) wesentlich verbesserte Handlings-Eigenschaften,
- (ii) ein minimiertes Staubexplosionsrisiko,
- (iii) den Ligninkomplex wieder in seinen ursprünglichen wasserunlöslichen Zustand überführt bei gleichzeitiger Verfahrensoptimierung des Filtrations- und Brikettbildungsprozesses und damit
- (iv) einer effizienten energetischen Nutzung und breiten stofflichen Nutzung zugeführt werden kann.

Schlagwörter: Technische Lignine, Schwarzlauge, Schlamm pelletierung, Sprühgranulation, Brikettierung

Einleitung

Fossile Rohstoffe, wie Öl und Kohle, sind begrenzte Ressourcen und vor dem Hintergrund der steigenden Kosten für petro-chemische Brennstoffe nimmt die Nachfrage nach Biomassen als Rohstoffe für die Energiegewinnung immer mehr zu.

Technische Lignine (Ablaugen) sind Nebenprodukte der Papier- und Zellstoffindustrie. 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 das Einbringen von Schwefel in eine wasserlösliche Struktur überführt wird. Die technischen Lignine (Ligninsulfonat aus dem Sulfitaufschluss und Kraftlignin aus dem Sulfataufschluss) kennzeichnen sich durch einen hohen Heizwert, ähnlich dem von Kohle und einen niedrigen Aschegehalt. Die in den derzeit kommerziell genutzten Aufschlussverfahren anfallenden Ablaugen (Schwarzlaugen, ca. 50 Mio t/a weltweit) enthalten neben den Aufschlusschemikalien und anderen Holzinhaltstoffen Lignin von 30 % bis 50 % (bez. auf den Feststoffanteil).

In Deutschland betrug das Aufkommen an Schwarzlauge im Jahr 2008 etwa 3,5 Mio t/a. Technische Lignine können prinzipiell auf zwei Verfahrenswegen genutzt werden, wobei die energetische Nutzung dominiert und nur ein geringer Anteil der Ligninsulfonate einer stofflichen Nutzung zugeführt wird.

Das Biopolymer Lignin besitzt in seiner wasserfreien Form einen Heizwert von 26 MJ/kg der mit dem von Anthrazit (29 MJ/kg) vergleichbar ist. Beim Einsatz der eingedickten Laugen im Laugenkessel sind, bedingt durch die hohen Wassergehalte (30-70 %) hohe Verdampfungsenergien notwendig, was zu einer deutlichen Reduzierung der Energieeffizienz durch die Erniedrigung des Heizwertes (ca. 17 MJ/kg) führt. Desweiteren enthält technisches Lignin einen Schwefelgehalt von 3 bis 10 %, welcher ein Emissionsproblem bei der Verbrennung darstellt. Hinderungsgründe für eine weitergehende Nutzung von technischem Lignin sind außerdem seine Heterogenität, der Geruch, die Staubbildung und das hohe Reaktionsvermögen. Um diese Probleme zu umgehen, muss das technische Lignin mit einem Wassergehalt von mind. 30 % gelagert werden.

Um die oben genannten Hinderungsgründe für einen effektiven Einsatz der technischen Lignine zu überwinden, werden die Ablaugen neben dem herkömmlichen Einsatz zur Energieerzeugung im Rahmen innovativer Verfahren mit dem Ziel der Bildung handhabbarer Ligninagglomerate eingesetzt. Basis der Verfahren ist die Separierung des Lignins durch Absenkung des pH-Wertes, was ein Ausfällen von Ligninflocken aus der Ablauge bewirkt. Als bekanntes Verfahren ist der Lignoboost-Prozess (US 2010/0325947, EP 1797236 B1) zu nennen. Der Prozess setzt CO₂ zur Reduzierung des pH-Wertes sowie H₂SO₄ für den anschließenden Reinigungsprozess ein, wobei die Prozessstufe vier Mal durchlaufen wird. Die Gewinnung der Ligninflocken erfolgt herkömmlich durch nachgeschaltete Filtrationsprozesse, welche sich aber bedingt durch die teilweise feinkolloidalen Flockenstrukturen problematisch gestalten.

Die Feinstpartikel führen zu einer Verstopfung des Filterkuchens verbunden mit einer Absenkung der Filtrationsleistung. Der sich an den Reinigungskreislauf anschließende Pelletierungsvorgang wird ebenfalls durch die hohen Restfeuchtegehalte und die starke Klebneigung durch die Temperaturerhöhung in der Matrice negativ beeinflusst.

Im Rahmen der Arbeit wird ein innovatives Agglomerationsverfahren vorgestellt. Das Verfahren basiert auf der Herstellung von Sprühagglomeraten in einem Sprühgranulator (Reaktorinnentemperatur ca. 100 °C) und der anschließenden Säurebehandlung der Agglomerate mit dem Ziel der Überführung der Ligninstrukturen in ihre ursprüngliche wasserlös-

liche Form. In Abhängigkeit vom Einsatzprodukt (Kraft- oder Sulfit-Lignin) besitzen die Agglomerate variable Eigenschaften (Porosität, Oberflächenstruktur, Korngröße). Zur Rückführung der Ligninstrukturen in den wasserunlöslichen Zustand werden die Granulate einer Säurebehandlung (H_2SO_4 , CH_3COOH) unterzogen. Die Effektivität des Prozesses hängt insbesondere von den vorhandenen bzw. sich während der Agglomeration bildenden Oberflächenstrukturen (große spezifische Oberfläche) ab.

In Abhängigkeit der Ausgangsprodukte bilden sich beim Einsatz von Kraft-Lignin-Agglomerate die sowohl hygroskopische als auch hydrophile Eigenschaften besitzen bzw. beim Einsatz von Sulfitablaugen Granulate, welche nicht-hygroskopische und hydrophile Eigenschaften aufweisen. Durch das Einwirken von Schwefelsäure werden die in den Granulaten eingebundenen Ligninbruchstücke durch die ablaufenden chemischen Prozesse derart verändert, dass das Lignin wieder in seine wasserunlösliche Form überführt wird. Diese Prozesse laufen bevorzugt an der Granulatoberfläche ab. Damit wird das Granulat von einer wasserunlöslichen Schicht umgeben (Einhüllungsprozess – Verkapselung). Inwieweit der Chemismus bis ins Innere der Granulate fortschreitet, ist von der inneren Struktur (Porosität) abhängig. Die an den Granulaten nur lose anhaftenden Feinpartikel lösen sich von der Granulatoberfläche während der Säurebehandlung ab. Da der Prozess der Aushärtung der Feststoffbrücken ein Zeitprozess darstellt, werden die abgelösten Partikel nicht oder nur teilweise mit eingebunden, sondern verbleiben als kolloidaler Anteil in der Säure.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Herstellung von Briketts auf der Basis der erzeugten Ligninsprühgranulate bei gleichzeitiger Säurebehandlung in einer geometrisch definierten Form dar. Hier werden wie bereits oben beschrieben, die Granulate in eine definierte Form gegeben (Granulatschüttung) und anschließend in einer Vorlage mit Schwefelsäure untergetaucht.

Der Prozess der Brikettbildung stellt eine komplexe Strukturbildung zwischen den Einzelgranulaten und der Granulatschüttung dar. Dieser Prozess ist sowohl von der Granulatporosität als auch von der Schüttgutporosität abhängig. Im ersten Schritt wird das Lignin an der Oberfläche der Granulate angelöst. Damit ändert sich die Viskosität. Gleichzeitig bilden sich wie oben beschrieben Bruchstücke. Unter Einfluss der SO_2 -Ionen kommt es zur Ausbildung von Feststoffbrücken zwischen den Primärstrukturen. Unter der Voraussetzung einer hohen Primärpartikeldichte in der verwendeten Kapsel verbinden sich die Einzelpartikel zu einem Sekundäragglomerat, welchen in Form und Abmessungen der Kapsel entspricht.

Das angelöste Lignin wirkt als Bindemittel unter Ausbildung von Feststoffbrücken. Diese verbinden sowohl die Einzelgranulate als auch die Bruchstücke zu einem Brikett. In einem nachfolgenden zweiten Schritt härten die Feststoffbrücken aus, da das Lignin durch die Schwefelbehandlung wieder in seine unlösliche Form überführt wird. Die mechanische Stabilität des Agglomerates (Brikett) wird von den gebildeten Feststoffbrücken bestimmt. Außerdem wird der kolloidale Anteil reduziert. Nach Entfernen der Kapsel liegt ein mechanisch stabiles Agglomerat vor, dass in Abhängigkeit vom Einsatz weiteren Verfahrensschritten zugeführt werden kann. Die gebildeten Briketts sind hydrophob.

Ein entscheidender Vorteil liegt in der wesentlichen Verbesserung der Filtrierbarkeit. Die gebildeten Agglomeratstrukturen (Granulate und Briketts) ermöglichen eine effektive und damit auch kostengünstigere Durchführung der Filtration (Abtrennung der Flüssigkeiten). Die abgetrennten kolloidalen Partikel werden im Kreislauf der Schwarzlaugung zurückgeführt, was zu einer Erhöhung des Feststoffanteils der Schwarzlaugung führt. Die Briketts ermöglichen neben der Einsparung einer Filtrationsstufe (im Vergleich zu den Granulaten)

außerdem die Einsparung einer nachgeschalteten Pelletiereinheit für den Filterkuchen. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der mit dem Aufschlussprozess eingetragene Schwefelgehalt bei den Agglomeraten wesentlich vermindert war.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Ablaugen zur Granulatbildung im Sprühgranulator bei einer Reaktorinnentemperatur von 100 °C eingesetzt (Calcium-Lignin-Sulfonat, Natrium-Lignin-Sulfonat, Kraft-Lignin). Anschließend erfolgte eine gezielte Säurebehandlung, die gleichzeitig mit einem Brikettbildungsprozess verbunden wurde.

Die Schwerpunkte der Arbeit lagen

- (i) auf der Bestimmung der thermischen Eigenschaften der eingesetzten Ablaugen in Abhängigkeit von der Temperatur,
- (ii) der Erzeugung von Sprühgranulaten bei Variation der Reaktorinnentemperatur,
- (iii) der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für die erzeugten Agglomerate mittels Bildanalysesystem (Camsizer),
- (iv) der Bestimmung der Festigkeit der Agglomerate mittels Granulatfestigkeitsprüfsystem (GFP),
- (v) auf der Behandlung der Agglomerate mit verschiedenen Säuren (Säurekonzentrationen) sowie Variation der Temperatur,
- (vi) der Erzeugung von Briketts mit dem Ziel der Verbesserung der Filtrationseigenschaften.

Material und Methoden

Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte nach dem ASAE Standard S269.4, welcher eine Trocknungszeit von 24 Stunden bei einer Trocknungstemperatur von 130 °C vorschreibt.

Zur Bestimmung des thermischen Verhaltens wurde Calcium- und Natrium-Lignin-Sulfonat bei verschiedenen Temperaturen im Wärmeschrank einem Trocknungsprozess unterzogen. Ziel war es, das Verhalten (Aufblähen, Aufschäumen, Strukturbildung) der Suspension in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur zu beobachten.

Daraus konnten Aussagen über das im Sprühgranulator einzustellende Temperaturniveau abgeleitet werden. Das Verhalten des Ligninschlammes wurde bei Temperaturen von 60, 80 und 100 °C mit einem Mikroskop der Firma Leica visualisiert (Abbildung 1a).



a)



b)

Abbildung 1: (a) Leica-Mikroskop (Leica MZ8) und (b) Camsizer Fa. Retsch Technologies: Darstellung des Messprinzips mittels Doppel-CCD-Kamerasystems (oben: Zoom-Kamera mit 5-facher Vergrößerung; unten: Basic-Kamera).

Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung standen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Um Aussagen über charakteristische Eigenschaften der Agglomerate machen zu können, sind neben der Korngrößenverteilung auch die Kornform sowie die Oberflächenstruktur von Bedeutung. Daher wurde für die Bestimmung der Korngrößenverteilung und Kornform das Messverfahren der dynamischen Partikelgrößenanalyse ausgewählt, welches der Camsizer der Fa. Retsch anwendet (Abbildung 1b). Im Gerät sind zwei CCD-Kameras eingebaut, die die von den Partikeln erzeugten Schattenprojektionen aufnehmen. Mittels Camsizer können Partikel im Bereich zwischen $19,7\ \mu\text{m}$ und $30\ \text{mm}$ vermessen werden. Der Umfang der je Probe vermessenen Partikelanzahl lag bei mindestens 15.000 Partikel (Retsch Technology 1999).

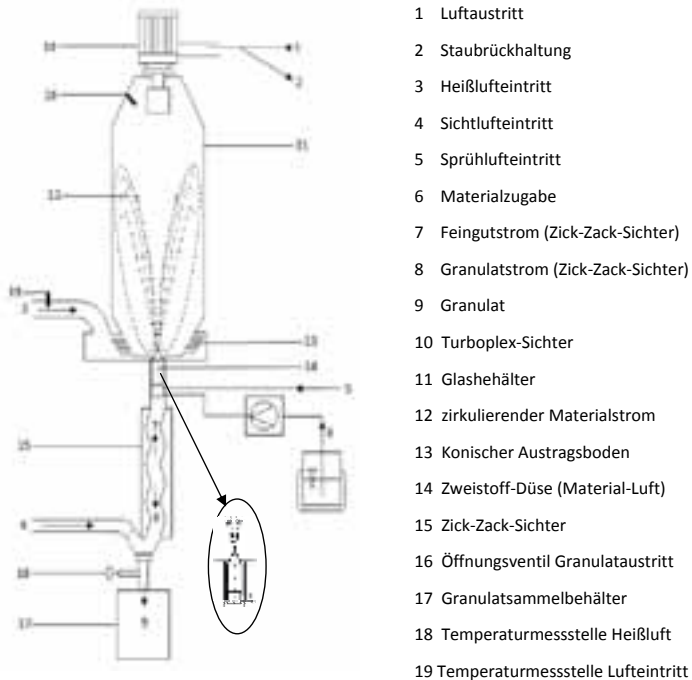


Abbildung 2: Schematische Darstellung Aufbau und Materialfluss im eingesetzten Sprühgranulator.

Die Agglomeratherstellung erfolgte in einem Sprühgranulator (Typ: 100 FSG, Fa. Alpine, Abbildung 2). Die Fließbett-Sprüh-Granulation ermöglicht es, feststoffhaltige flüssige Ausgangsmaterialien wie Suspensionen, Schlämme, Emulsionen oder Schmelzen kontinuierlich umzusetzen. Dabei entstehen die Granulate durch Trocknungs- und Formgebungsvorgänge im Granulator, die anschließend klassierend ausgetragen werden. Diese Abläufe sind eng miteinander verbunden und werden durch starke Wärmeübergänge bestimmt. Während der Kornaufbauprozesse bildet sich eine schlaufenartig zirkulierende Schicht von

Partikeln, Granulaten und eingedüsten Tröpfchen aus, welche unter anderem von der Beschaffenheit, Form und Höhe des Apparates abhängt. Im oberen Teil der Anlage ist ein Turboplex-Sichter installiert. Dieser filtert feinsten Staub aus dem Prozess und scheidet ihn in einen Auffangbehälter ab. Mit einem Zick-Zack-Sichter wird der Wirbelzone ein Teilstrom des Granulates am Produktaustrag entnommen. Es können Granulate im Korngrößenbereich von 100 μm bis 4 mm erzeugt werden. (Heinrich, 2001; Heinze, 2000; Furchner und Schwechten 1989). Ziel ist die Produktion von Agglomeraten mit einem Partikeldurchmesser größer 100 μm um das Staubexplosionsrisiko zu eliminieren (Eckhoff 2003). Im Rahmen der Versuche wurden die Temperaturen im Granulatorinnenraum in Abhängigkeit von der eingesetzten Ablauge variiert:

- (i) Calcium-Lignin-Sulfonat-Lauge wurde im Temperaturbereich zwischen 80-180 °C in Schritten von 20 °C granuliert.
- (ii) Für Natrium-Lignin-Sulfonat-Lauge wurde eine Temperatur von 80 °C und 100 °C gewählt.
- (iii) Die Granulationstemperatur für Kraft-Lignin betrug 100 °C. Die Materialzuführtemperatur wurde auf jeweils 20 °C eingestellt.

Die Festigkeit der gebildeten Agglomerate und Briketts stellt einen wesentlichen Parameter zur Charakterisierung des Verhaltens während Transport-, Lagerungs- und Umschlagprozessen dar. Die Druckfestigkeit der Sprühagglomerate wurde mit dem GFP-Messsystem der Fa. Etwete GmbH bestimmt (Abbildung 3a). Für die Briketts kam die Prüfmaschine der Fa. ZwickRoell (Typ Smart.Pro) zum Einsatz (Abbildung 3b). Zur Bestimmung der Granulat-/Brikettendichte wurde ein zylindrischer Behälter (Volumen: 56,15 l) entsprechend dem Standard ASAE S269.4 eingesetzt.



Abbildung 3: GFP-Messsystem (a) Fa. Etwete GmbH zur Bestimmung der Granulatfestigkeit und Material-Prüf-Maschine (b) Fa. ZWICK-ROELL (type: ZMART. PRO) zur Bestimmung der Brikettfestigkeit.

Die Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung von Einsatzprodukten und den Agglomeraten/Briketts wurde mittels Elementaranalyse durchgeführt. Dafür kam das Messgerät Elementar Vario MACRO CUBE zum Einsatz.

Die Behandlung der Lignin-Sprühagglomerate (Ca-LS, Na-LS und Kraft-Lignin) erfolgte sowohl mit Schwefel- als auch mit Essigsäure bei variablen Konzentrationen. Die Abbildung 4 zeigt Prozessschema (Narra et al., 2012). An den Säurebehandlungsprozess schloss sich ein intensiver Waschvorgang (Temperatur Wasser 80 °C) zur Neutralisation an. Die Gewinnung der Agglomerate aus dem Waschwasser erfolgte durch Filtration. Das Filtrat wurde nach Durchlaufen einer Regenerationstufe (Säure-Wasser-Trennung) der Wiederverwertung zugeführt.

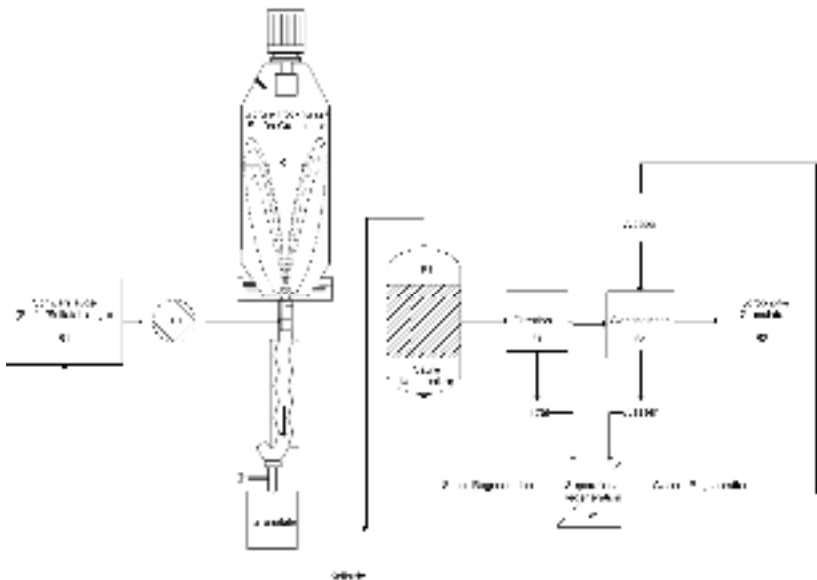


Abbildung 4: Prozessschema zur Erzeugung wasserunlöslicher Agglomerate (Patent-Nummer 10 2012 102 327.1, Einreichdatum: 12.03.2012).

Für die Erzeugung hydrophober Briketts wurden die Sprühagglomerate in eine definierte Form (Durchmesser: 30-50 mm, Höhe: 40-60 mm) gegeben und diese vollständig in das Säurebad (Schwefelsäure) getaucht. Das Prozessschema ist in Abbildung 5 (Narra et al. 2012) beschrieben. Durch die Säurebehandlung der Ligninbriketts kann die notwendige Pelletiereinheit (Matrizenpresse) eingespart werden. Außerdem zeichnen sich Briketts gegenüber den Granulaten durch eine höhere Energiedichte aus und eignen sich damit insbesondere für eine energetische Nutzung.

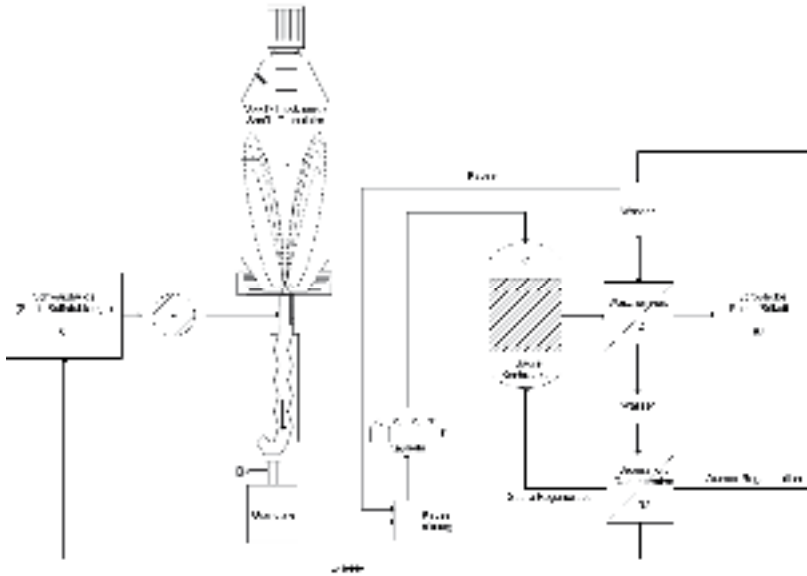


Abbildung 5: Prozessschema zur Erzeugung wasserunlöslicher Briquettes in einem Behälter definierter Abmessung (Patent-Nummer 10 2012 102 327.1, Einreichdatum: 12.03.2012).

Ergebnisse und Diskussion

Der Wasseranteil der Einsatzprodukte (ligninhaltige Ablaugen der Zellstoffindustrie) variierte zwischen 55-55 % für die Lignin-Sulfonate und 75 % für das Kraft-Lignin. Durch die Sprühgranulation konnte der Wassergehalt auf 5-10 % reduziert werden und liegt damit niedriger als der in entsprechenden Brennstoffnormen geforderte Wassergehalt von ≤ 10 %. Der Wassergehalt von Brennstoffen besitzt einen entscheidenden Einfluss auf den Energiegehalt und damit auf die Verbrennungstemperaturen (Nussbaumer und Klatschmidt, 2001; Obernberger und Thek, 2002). Die Einhaltung des Wassergehaltes im Brennstoff ermöglicht einen effektiven Betrieb moderner Feuerungsanlagen verbunden mit einer effizienten Energieausnutzung (Kaliyan und Morey 2006; Mani et al. 2006; Obernberger und Thek 2004; Shaw und Tabil 2007).

Die Versuche zur Bestimmung des Aufschäumverhaltens dienten der Übertragbarkeit des thermischen Verhaltens der Ligninablaugen während des Sprühgranulationsprozesses. Die Trocknungsversuche wurden im Temperaturbereich von 100-80-60 °C und einer Trocknungsdauer von 24 Stunden durchgeführt. Deutlich sind Abhängigkeiten zwischen der Prozesstemperatur und der ausgebildeten Porenstruktur und -größe sichtbar. Die Abbildung 6 zeigt die mikroskopischen Aufnahmen der erzeugten Proben. Die Porengrößen variieren im Bereich von 85 μm (80 °C) bis 6154 μm (100 °C).

Tabelle 1: Zusammenstellung der Ergebnisse der Elementaranalysen der Ausgangsmaterialien sowie der Agglomerate vor und nach der Säurebehandlung (Angaben Analysenwerte Wasser- und Aschefrei)

Material	T _R /C /T _C [°C]	Wasser [%]	Kohlenst. [%]	Wasserstoff [%]	Sauerstoff [%]	Stickstoff [%]	Schwefel [%]	Asche [%]	H ₀ (waf)
Ligninschlamm									
Calcium-LS	--	50	56,37	5,41	31,07	0,22	6,93	13,49	23,25
Natrium-LS	--	55	59,92	5,64	26,65	0,23	7,59	21,2	25,12
Kraft-Lignin	--	75	66,42	6,42	19,62	0,20	7,35	44,37	28,52
Calcium-Lignin-Sulfonate-Granulate									
Vor Säure Behandlung	80	8,65	56,27	5,41	31,30	0,22	6,80	13,52	23,17
	100	8,70	56,47	5,41	30,84	0,22	7,07	13,46	23,32
Nach Säure Behandlung	80 /70 /100	5,54	64,06	2,68	25,81	0,20	7,26	8,21	23,40
	80 /70 /130		65,81	4,73	24,60	0,20	4,66	8,01	26,30
	80 /80 /100		61,30	2,88	30,02	0,19	5,60	3,93	22,16
	80 /80 /130		62,73	0,35	32,65	0,26	4,01	4,52	19,23
	100 /70 /100		66,16	4,79	23,86	0,19	5,00	8,26	26,59
	100 /70 /130		66,95	2,71	25,85	0,25	4,23	6,70	24,17
	100 /80 /100		66,01	4,31	24,90	0,20	4,58	5,77	25,88
	100 /80 /130		64,62	3,76	26,61	0,39	4,63	5,88	24,57
Natrium-Lignin-Sulphonate-Granulate									
Vor Säure Behandlung	80	3,95	60,02	5,93	25,93	0,27	7,86	22,20	25,57
	100	8,99	59,81	5,34	27,36	0,18	7,31	20,20	24,64
Nach Säure Behandlung	80 /70 /100	8,56	63,76	3,93	25,85	0,20	6,26	2,48	24,79
	80 /70 /130		64,35	4,17	27,16	0,16	4,17	0,31	24,97
	80 /80 /100		61,73	4,10	27,58	0,21	6,37	1,18	24,14
	80 /80 /130		63,36	3,48	28,33	0,15	4,67	0,32	23,75
	100 /70 /100		62,45	4,60	26,54	0,19	6,22	3,89	25,01
	100 /70 /130		64,10	3,40	27,69	0,19	4,62	0,58	23,96
	100 /80 /100		62,77	4,00	26,77	0,20	6,26	1,61	24,45
	100 /80 /130		62,95	4,66	25,94	0,20	6,25	4,84	25,30
Kraft-Lignin-Granulate									
Vor Säure Behandlung	100	10,20	66,42	6,42	19,62	0,20	7,35	44,37	28,52
	100 /70 /100	5,00	62,80	5,08	22,43	0,20	9,48	0,24	26,53
100 /70 /130	63,99		5,07	22,07	0,22	8,65	0,58	26,88	
Nach Säure Behandlung	100 /80 /100		61,89	4,60	21,02	0,21	12,28	0,70	26,07
	100 /80 /130		57,98	4,60	24,47	0,20	12,73	0,25	24,41

Die Proben zeigen außerdem ein exponentielles Anwachsen der Porengröße in Abhängigkeit der Temperaturzunahme. Grund hierfür ist die starke Veränderung der Viskosität der Einsatzlaugen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur, was zu einem unterschiedlichen Aufschäumverhalten führt. Die Hohlräume entstehen beim Verdampfen des Wassers. Die Ausbildung der Schaumstrukturen verändert sich mit der Temperatur. In den Abbildungen 6 und 7 wird dieser Zusammenhang verdeutlicht. Mit steigender Temperatur wird die Hohlraumbildung im viskosen Ligninschlamm erhöht. Daher ist bei der Granulierung im Sprüh-Granulator zu erwarten, dass bei sehr hohen Prozesstemperaturen zwischen 160 und 180 °C verhältnismäßig große Partikel mit ausgeprägter Porenstruktur und geringer Festigkeit gebildet werden.

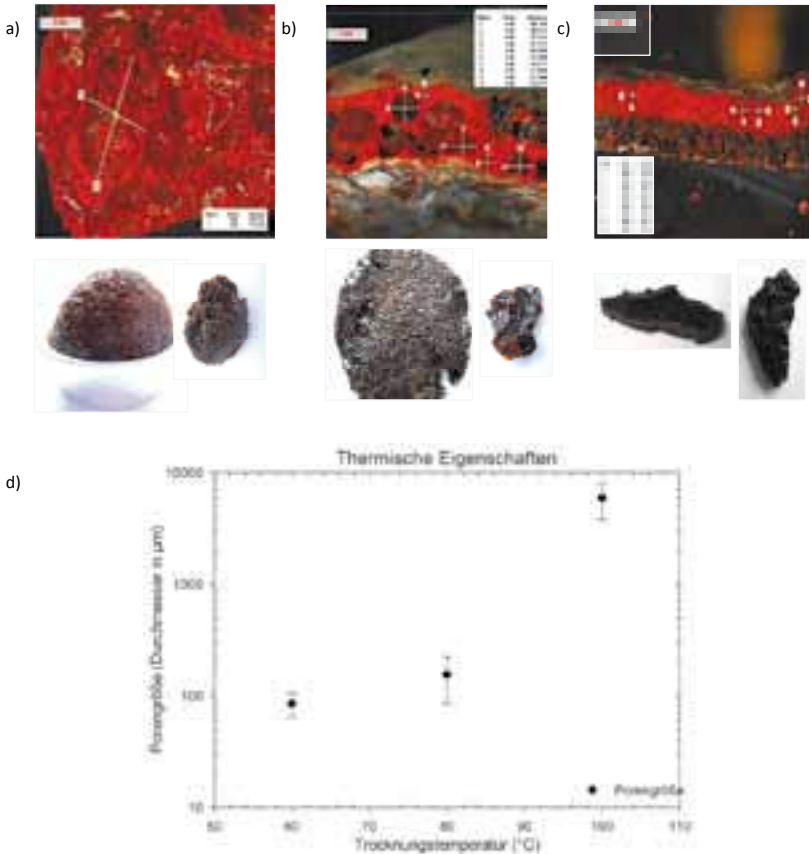


Abbildung 6: Thermisches Verhalten von Ligninsulfonaten bei Variation der Temperatur (c) 60 °C, (b) 80 °C, (a) 100 °C – (d) Darstellung der Porengrößenverteilung mit Standardabweichung in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur.

Die niedrige Granulatstabilität begünstigt wiederum Abriebserscheinungen während der Zirkulation im Trocknungsraum. Deshalb wird vermutet, dass diese Granulate letztendlich durch den Abrieb von feinen Partikeln einen kleineren Korndurchmesser als Granulate mit einer hohen Festigkeit aufweisen. Anschließende Versuche zur Granulation im Sprühgranulator bestätigten die Aussagen. Bei Einstellung hoher Reaktortemperaturen ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) entstanden große Agglomerate mit hoher Porosität, geringer Dichte und heller Färbung. Die Einstellung von Reaktorinnentemperaturen $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ führte zur Bildung kleiner, nicht oder wenig poröser Agglomerate hoher Dichte, die deutlich dunkler gefärbt waren (Abbildung 7a). Die Veränderungen der Eigenschaften der Agglomerate stehen in direktem Zusammenhang mit der Variation der Reaktorinnentemperaturen und damit dem unterschiedlichen Verdampfungsverhalten des Wassers der flüssigen Einsatzprodukte. Die Charakterisierung der Agglomerate (Struktur, Farbe) erfolgte mittels Mikroskop. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7b und 7c dargestellt.

a)



b)



c)

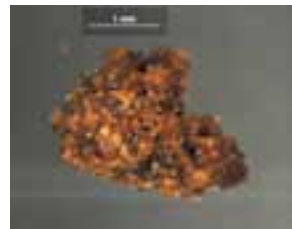


Abbildung 7: Darstellung der Sprühgranulate, hergestellt bei verschiedenen Temperaturen (80-180 °C) (a), mikroskopische Aufnahmen von Sprühgranulaten (b): Reaktorinnentemperatur 80 °C (b) und Reaktorinnentemperatur 180 °C (c).

Die Form der Sprühgranulate zeigt ebenfalls einen Zusammenhang mit der Reaktorinnentemperatur. Bei einer Temperatur von 100 °C bildeten sich nahezu runde Agglomerate. Mit steigender Temperatur und dem damit verbundenem Aufschäumen wurden Form und Gestalt der Pellets irregulär. Die deutlich dunkle Färbung der Agglomerate bei 100 °C Innentemperatur lässt darauf schließen, dass der Trocknungsprozess der Ligninablaue noch nicht abgeschlossen war bzw. sich nicht bis in den Agglomeratkern fortsetzen konnte. Eine Nachtrocknung der Agglomerate führte zu einer Zunahme der Festigkeit (Ausbildung fester Brücken). Die Erhöhung der Innentemperatur (160-180 °C) führte erwartungsgemäß zur Bildung großer Partikel, die allerdings durch eine geringe Festigkeit gekennzeichnet waren.

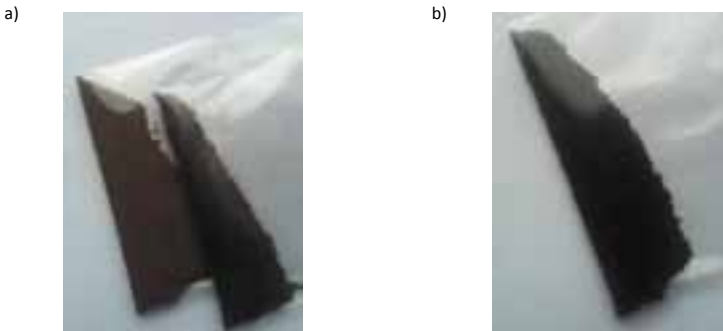


Abbildung 8: Darstellung von Sprühgranulaten (a) Einsatz: Na-Lignin-Sulfonat, Reaktorinnentemperatur 80 und 100 °C (b) Einsatz: Kraft-Lignin, Reaktorinnentemperatur 100 °C.

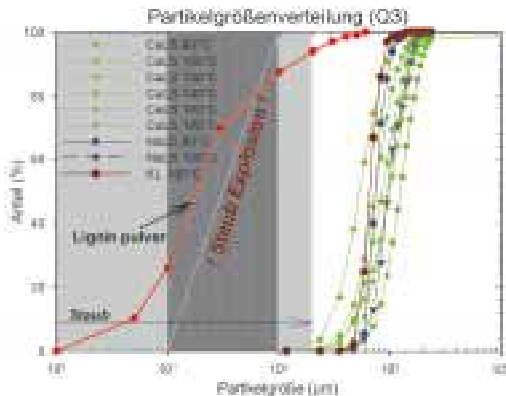


Abbildung 9: Partikelgrößenverteilungen im Vergleich: trockenes Ligninpulver, Granulate basierend auf Calcium- und Natrium-Lignin-Sulfonat sowie Granulate basierend auf Kraft-Lignin, erzeugt bei variablen Reaktorinnentemperaturen.

In Abbildung 9 ist die Partikelgrößenverteilung der erzeugten Agglomerate in Abhängigkeit der Reaktorinnentemperaturen für die verschiedenen Einsatzprodukte dargestellt. Für die Bewertung der Partikelgrößenverteilungen wurden die Bereiche 1-200 μm – Staub bzw. 10-100 μm – Staubexplosionszone, sowie $> 200 \mu\text{m}$ – staubfreies Granulat betrachtet. Wie Abbildung 9 zeigt, sind minimal 3 % der erzeugten Partikel kleiner 200 μm und damit als Staub zu bezeichnen, wobei die Staubexplosionsgrenze von 100 μm deutlich überschritten wird. Im Gegensatz dazu der Vergleich von staubförmigem Lignin-Sulfonat, was eine Partikelgrößenverteilung von bis zu 95 % kleiner 200 μm besitzt. Gleichzeitig liegt der Anteil im Bereich bis 100 μm zwischen 25-88 %, was die Gefahren einer möglichen Staubexplosion deutlich erhöht.

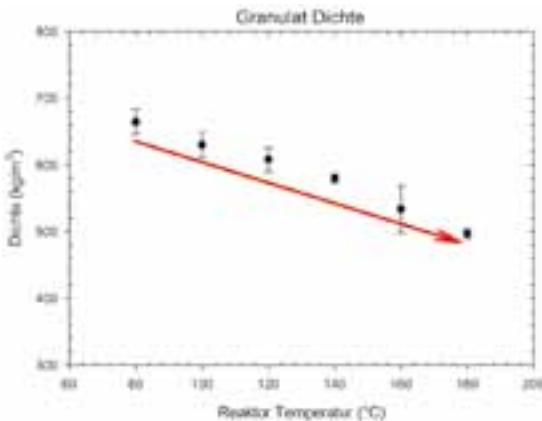


Abbildung 10: Darstellung der Schüttdichte von Agglomeraten in Abhängigkeit von der Reaktorinnentemperatur.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Schüttdichten für die erzeugten Produkte sind in Abbildung 10 dargestellt. Für die Sprühagglomerate konnten Schüttdichten im Bereich von 490 kg/m^3 bis 670 kg/m^3 bestimmt werden (Schüttdichte Ligninpulver: 600 kg/m^3). Die Schüttdichten zeigten ebenfalls eine Abhängigkeit zu den Reaktorinnentemperaturen und den sich gebildeten Strukturen. Die Dichte sank mit Ansteigen der Temperatur ab (starkes Aufschäumen), wobei gleichzeitig die Porosität stark zunahm (Bildung von leichten, voluminösen Partikeln geringer Festigkeit). Die Briketts besaßen eine Dichte von 1351 kg/m^3 . Die Ermittlung der Festigkeit der Granulate und Briketts stellt ein wichtiges Beurteilungskriterium zur Bestimmung der Festigkeit (des Bruchs) der Agglomerate während Transport- Umschlag- und Lagerprozessen dar. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt. Deutlich wurde wiederum der Einfluss der Agglomerationstemperatur bezüglich der Ausbildung stark poröser Agglomeratstrukturen mit geringer Festigkeit bei hohen Reaktorinnentemperaturen.

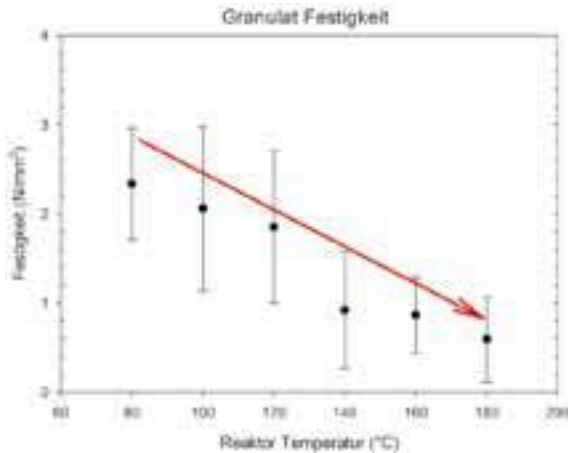


Abbildung 11: Darstellung der Druckfestigkeit der Agglomerate in Abhängigkeit von der Reaktorinnentemperatur.

Die erzeugten Granulate besaßen in Abhängigkeit von der eingesetzten Ablauge hydrophile (Calcium- und Natrium-Lignin-Sulfonat) oder hygroscopische (Kraft-Lignin) Eigenschaften. Außerdem beinhalten sie die durch den Aufschlussprozess eingebrachten Kochchemikalien, insbesondere Schwefel. Die erhöhten Schwefelanteile sind beim Einsatz der Ligninagglomerate zur Energieerzeugung kritisch zu bewerten. Hohe Schwefelgehalte führen durch die Bildung von Schwefelsäure/schwefliger Säure zu einer erhöhten Anlagenkorrosion. Außerdem sind austretende Schwefelverbindungen umweltschädlich. Für die stoffliche Nutzung der Lignine sind ebenfalls geringe Schwefelgehalte von Vorteil.

Im Rahmen der Arbeit wurden umfangreiche Untersuchungen zur Entfernung der durch den Aufschlussprozess eingebrachten Schwefelanteile durchgeführt. Die Säurebehandlung (H_2SO_4 / CH_3COOH) der Granulate bei gleichzeitiger Variation der Behandlungstemperatur führte zu einer Umwandlung der löslichen Ligninstruktur zurück in ihre ursprünglich wasserunlösliche Struktur. Die behandelten Agglomerate sind hydrophob. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

Die Gläser 1 und 2 zeigen die wieder aufgelösten Ligninagglomerate basierend auf Lignin-Sulfonat bzw. Kraft-Lignin vor der Säurebehandlung. In den Gläsern 3 und 4 sind die Agglomerate nach der Säurebehandlung zu erkennen. Deutlich sichtbar wird die erreichte Wasserunlöslichkeit. Für den Ablauf und Erfolg der Säurebehandlung der Agglomerate mit dem Ziel der Überführung der Ligninstrukturen in den wasserunlöslichen Zustand ist eine große, poröse Oberflächenstruktur entscheidend. Die im Ergebnis des Prozesses entstehenden Agglomerate zeichnen sich durch eine kompakte Struktur aus. Damit kann der sich anschließende Filtrationsprozess (Trennung der Agglomerate von der Säure und anschließender Waschvorgang) wesentlich effizienter ablaufen, da die Gefahr des Versetzens der Filter durch kolloidale Anteile/Feinstpartikel weitestgehend minimiert wurde.



Abbildung 12: Darstellung des Löslichkeitsverhaltens der Ligningranulate vor und nach der Säurebehandlung.

Beim Sulfitaufschlussprozess zur Gewinnung von Zellulose wird durch den Einsatz von Schwefelsäure die Ligninstruktur derartig modifiziert, dass es zur Bildung eines aromatischen Elektrophils (HSO_3^-) am Ligninkomplex kommt. Damit wird das Ligninmolekül wasserlöslich und der Zellstoff kann herausgelöst werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde gezeigt, dass diese Reaktion durch die Säurebehandlung mit Schwefelsäure umkehrbar ist.

Durch Umkehrung des Sulfonierungsprozesses ist es möglich, die durch den Kochprozess erzeugten wasserlöslichen Ligninstrukturen wieder in ihren ursprünglichen wasserunlöslichen Ausgangszustand zu versetzen (Zhu und Luo, 2007).

Beim Kraftlignin-Prozess erfolgt die Umwandlung des Lignins in wasserlösliche Strukturen durch Dissoziation der phenolischen OH^- -Gruppen im alkalischen Medium. Eine Umkehrung des Prozesses wird mit der Absenkung des pH-Wertes von 13 auf 11 durch die Zugabe von CO_2 eingeleitet. Durch weitere Zugabe von Säure (CH_3COOH oder H_2SO_4) wird die Ligninstruktur wieder in den ursprünglichen wasserunlöslichen Ausgangszustand umgewandelt (Liu et al., 2009; Öhmann und Theliander, 2007). Im anschließenden Waschprozess (Wasser $< 100^\circ\text{C}$) werden die Granulate neutralisiert. Das anfallende Filtrat (pH-Werte 0,2-3) kann nach einer Regeneration wieder in den Prozess zurückgeführt werden. In der Tabelle 1 ist eine Übersicht über die chemische Zusammensetzung der Ablaugen sowie der erzeugten Agglomerate (Reaktorinnentemperatur $8-100^\circ\text{C}$) sowie der Agglomerate nach erfolgter Säurebehandlung zusammengestellt. Die Anteile Schwefel und Asche in den Einsatzlaugen liegen im Bereich von 6,9-7,6 % sowie 13,5-44,4 %. Durch den Sprühgranulationsprozess wurde lediglich der Wasseranteil der Agglomerate reduziert, deren chemische Zusammensetzung bleibt erhalten. Durch die Säurebehandlung konnte eine signifikante Absenkung des Schwefelanteils für alle erzeugten Agglomerate dargestellt werden (Calcium-Lignin-Sulfonat: 3,9 %; Natrium-Lignin-Sulfonat: 0,58 %, Kraft-Lignin: 0,58 %). Gleichzeitig sank der Ascheanteil.

Aus den Analysedaten der chemischen Zusammensetzung lässt sich für den energetischen Einsatz insbesondere der erzeugten Lignin-Briketts entsprechend Gleichung 1 der oberen Heizwert berechnen (Kaltschmitt et al. 2009) und damit Rückschlüsse auf die Effizienz des Verbrennungsprozesses ziehen.

$$H_o(\text{waf}) = 0.3491 \cdot X_C + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_S - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_O - 0.0211 \cdot X_A \quad (1)$$

Die Ligninbriketts zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte gegenüber den erzeugten Granulaten aus und eignen sich besonders für den energetischen Einsatz. Die erzeugten Endprodukte (wasserunlösliche Granulate/Briketts) eignen durch ihre spezifischen Eigenschaften (geringe Schwefelanteile, Staubfreiheit, verbesserte Transport- und Lagereigenschaften, Wasserunlöslichkeit) sowohl für den Einsatz als Energieträger als auch als Ausgangsprodukt für weitere stoffliche Anwendungen.

Zusammenfassung

Die Herausforderungen und Hemmnisse für eine effiziente und breite Anwendung der ligninholdigen Ablaugen der Zellstoffindustrie bestehen in den Handlungseigenschaften (hohe Wasseranteile in den Ablaugen, Aufschlusschemikalien, insbesondere Schwefel, Anbackungsneigung, Explosionsrisiko der getrockneten Produkte).

Der derzeit praktizierte Einsatz der Ablaugen-Verbrennung zur Wärmeengewinnung im Laugenkessel ist ebenfalls uneffizient, da ein Großteil der Energie für die Verdampfung des Wassers aufgewendet werden muss.

Mit der Herstellung von Ligninagglomeraten mit niedrigem Wassergehalt (> 10 %) sowie definierten Eigenschaften wird dem Markt ein Produkt zur Verfügung gestellt, das sowohl eine effiziente und CO₂-neutrale energetische Nutzung als auch eine breite stoffliche Anwendung ermöglicht.

Die Herstellung der Agglomerate erfolgte in erstensschritt in einem Sprühgranulationsprozess. Durch den Agglomerationsvorgang wurde der Wassergehalt reduziert und damit der Energiegehalt der Agglomerate von 15 MJ kg⁻¹ to 28 MJ kg⁻¹ angehoben.

An den Agglomerationsprozess schloss sich als zweite Prozessschritt eine Säurebehandlung der Agglomerate an. Dieser Prozess hatte das Ziel, die für den Zelluloseaufschluss notwendige Überführung der Ligninstrukturen in wasserlösliche Verbindung durch die Zugabe von Schwefelsäure zurück in die wasserunlösliche Form zu überführen. Durch die Agglomerate verbesserte sich das Filtrationsverhalten im nachfolgenden Trennprozess (Säure/Wasser/Agglomerate), da durch den Umwandlungsprozess insbesondere kolloidale Anteile reduziert wurden (Einkapselungsprozess).

Das Einbringen der Agglomerate in eine definierte Form und die anschließende Säurebehandlung führte zur Ausbildung stabiler Briketts. Damit konnte die Schüttdichte von 670 kg/m³ auf 1351 kg/m³ erhöht werden. Durch den Säurebehandlungsprozess und den anschließenden Waschvorgang (Neutralisation) wurden weiterhin der Schwefelgehalt von 13,5 auf 3,9 % sowie der Aschegehalt von 44,7 auf 0,58 % gesenkt.

Durch die Kombination der Verfahren Sprühgranulation zur Agglomeratbildung und anschließender Säurebehandlung zur Rückführung in hydrophobe Ligninstrukturen sowie zur Absenkung der Schwefel- und Aschegehalte wurden Agglomerate mit definierten Strukturen erzeugt, welche

- (i) eine Verbesserung der Filtrationsleistung,
- (ii) eine Reduzierung des Säureeinsatzes gegenüber herkömmlichen Flockungsprozessen,
- (iii) eine Rückführung der Ligninstrukturen in den wasserunlöslichen Ausgangszustand,
- (iv) eine Erhöhung des Energiegehaltes durch Reduzierung des Wasseranteils, (v) eine Reduzierung kolloidaler Verunreinigungen sowie (vi) eine Kostensenkung durch Reduzierung der Anzahl notwendiger Verfahrensschritte erreicht werden. Der vorgestellte Prozess kann in bestehende Verfahrensstufen der Papier- und Zellstoffwerke implementiert werden und trägt so zu Verbesserung der ökonomischen und ökologischen Bilanz bei gleichzeitiger Erhöhung der Umweltverträglichkeit bei.

Danksagung

Die vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des Projektes "LignoBioFuel" im BMU-Förderprogramm "Energetische Biomassenutzung" durchgeführt. Das Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und durch den Projektträger Jülich (PTJ) administrativ betreut. An der Projektbearbeitung sowie der Erstellung der vorliegenden Arbeit waren außerdem die Projektpartner Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Leipzig sowie die Fa. Gebr. Lödige Maschinenbau beteiligt.

Literatur

American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1991): ASAE Standard S269.4 – Cubes, Pellets and Crumbles – Definitions and Methods for Determining Density, Durability and Moisture Content, St. Joseph, MI, USA.

Eckhoff, R. K. (2003): Dust Explosions in the Process Industries. Third Edition. ISBN 0-7506-7602-7.

FNR (2010): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) Band „Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie – stoffliche Nutzung von Agrar- und Holzwerkstoffen“ S. 20.

Furchner, B.; Schwechten, D. (1989): Überlegungen zum Kornwachstum bei der kontinuierlichen Aufbaugranulation im Fließbett-Sprüh-Granulator. Vortrag bei Fachausschuss für Agglomeration der Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen in Friedrichshafen. S.1-12.

Heinrich, S. (2001): Modellierung des Wärme- und Stoffübergangs sowie der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht-Sprühgranulation. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3 Nr. 675. VDI Verlag GmbH Düsseldorf. ISBN 3-18-367503-X. S. 1-239.

Heinze, G (2000): Handbuch der Agglomerationstechnik. WILEY-VCH Verlag GmbH. ISBN 3-527-29788-X. S. 1-261.

Kaliyan, N.; Morey, R. V. (2006): Densification Characteristics of Corn Stover and Switchgrass. ASABE Annual International Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Portland, Oregon July 9-12, Paper Number 066174, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse, ISBN:978-3-540-85094-6, Springer-Heidelberg. S. 1-275.

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

Mani, S.; Tabil, L. G.; Sokhansanj, S. (2006): Effects of Compressive Force, Particle Size and Moisture Content on Mechanical Properties of Biomass Pellets from Grasses. *Biomass and Bioenergy*, 97, S. 1420-1426.

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

Obernberger, I.; Thek, G. (2002): Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to the combustion behaviour. In: proceedings of the first world conference on pellets. Stockholm, Sweden. Swedish Bioenergy Association (Hrsg.). S. 115-122.

Obernberger, I.; Thek, G. (2004): Physical Characterization and Chemical Composition of Densified Biomass Fuels with regard to their Combustion Behavior. *Biomass and Bioenergy*, 27, S. 653-669.

Öhmann, F.; Theliander, H. (2007): Filtration properties of lignin precipitated from black liquor. *Tappi Journal* 6 (7) S. 3-9.

Narra, S.; Ay, P.; Glaser, C.; Logsch, F. (2012): Verfahren zur Herstellung von wasserunlöslichen Lignin-Agglomeraten (in German) / Process for the production of water insoluble lignin-agglomerates (in English). Patent Nr. 102010102327.1.

Shaw, M. D.; Tabil, L. G (2007): Compression and Relaxation Characteristics of Selected Biomass Grinds. ASAE Annual International Meeting, Minneapolis, MN, June 17-20 Paper Number 076183, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.

US 2010/0325947 A1 (Patent 2010). Frederik Ohman G, Hans Theliander G, Per Tomani H, Peter Axegard S (LIGNOBOOST AB). Method for separating lignin from black liquor, a lignin product, and use of lignin product for the production of fuels or materials. S. 1-12.

Liu, Z.; Luo, X.; Li, Y.; Li, L.; Huang, Y. (2009): Extraction of lignin from pulping from pulping black liquor by organic acid. *Materials Science Forum*, 620-622, S. 571-574.

Zhu, L; Luo, X (2007): Extraction of lignin from black liquor by desulphonation. *Chemical Industry and Engineering Progress*, S. 1645-1649.

Ermittlung der Reaktionskinetik unterschiedlicher, torrefizierter Biomassen

Jan-Peter Busch*, Falah Alobaid, Jochen Ströhle, Bernd Epple

Adresse: Technische Universität Darmstadt,
Institut für Energiesysteme und Energietechnik, Petersenstr. 30, 64287 Darmstadt
*E-Mail: jan-peter.busch@est.tu-darmstadt.de

Abstract

Durch die Torrefizierung können die Energiedichte erhöht sowie die Mahl-, Lagerungs- und Transporteigenschaften von Biomasse verbessert werden. Die Eignung torrefizierter Biomasse für die Verbrennung in Kraftwerken muss noch untersucht werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde die Reaktionskinetik verschiedener torrefizierter biogener Reststoffe mittels thermogravimetrischer Analyse ermittelt. Dabei stellte sich heraus, dass die Pyrolyse torrefizierter Biomasse vor allem durch die Zersetzung von Cellulose bestimmt wird, da Hemicellulose bereits während der Torrefizierung entgast wurde. Die Reaktionsrate der Pyrolyse hängt dabei nur unwesentlich vom Ausgangsstoff, jedoch stark von der Aufheizrate ab. Weitere Untersuchungen beinhalten die Verbrennung torrefizierter Biomasse im Flugstromreaktor und in einer 1-MW_{th}-Versuchsbrennkammer.

Schlagwörter: Torrefizierung, Biogene Reststoffe, Reaktionskinetik, Kraftwerk, Thermogravimetrie, Numerische Simulation, Verbrennung, Pyrolyse

Einleitung

Die Torrefizierung bietet die Möglichkeit, aus biogenen Reststoffen einen Brennstoff für Kohlekraftwerke herzustellen, der CO₂-neutral einen Teil der Kohle ersetzen kann. Hydrophobes Verhalten und eine erhöhte volumetrische Energiedichte verbessern Lager- und Transporteigenschaften der torrefizierten Biomasse welche zudem besser in herkömmlichen Kohlemühlen zu vermahlen ist als die Ausgangsstoffe. Für die Kraftwerksbetreiber ist von Interesse, wie groß die Anpassungen der Kraftwerkstechnik an den neuen Brennstoff sind und welche potentiellen Risiken die Mitverbrennung dieser Ersatzbrennstoffe für die Anlagentechnik birgt.

Am Institut für Energiesysteme und Energietechnik (EST) an der Technischen Universität Darmstadt werden wissenschaftliche und technische Fragestellungen zur Mitverbrennung der torrefizierten Biomasse ermittelt. Anhand dieser Daten lässt sich der Einfluss der torrefizierten Biomasse auf die Feuerung beschreiben. Reaktionskinetische Daten sind von besonderer Relevanz für die Simulation des Feuerraums. Außerdem werden Zündverhalten, Emissionen, Verschlackung und Korrosion untersucht. Man geht davon aus, dass je unterschiedlicher diese Parameter für Biomasse und Kohle sind, die notwendigen Anpassungen der Anlagentechnik umso größer werden. Zur Ermittlung der reaktionskinetischen Daten werden Thermogravimetrie- (TGA) und Flugstromreaktor-Versuche durchgeführt. Weitere Verbrennungsversuche im Flugstromreaktor sowie einer 1-MW_{th}-Staubfeuerung dienen der Ermittlung der Auswirkungen von torrefizierter Biomasse bei einer Mitverbrennung.

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden mehrere biogene Reststoffe in einem Batch-Reaktor bei unterschiedlichen Temperaturen und Verweilzeiten torrefiziert. Die torrefizierte Biomasse wurde im Anschluss im TGA-Gerät in inerter Atmosphäre erhitzt und die flüchtigen Bestandteile ausgetrieben. Die Massenabnahme bei verschiedenen Temperaturen wurde aufgezeichnet und daraus auf die reaktionskinetischen Parameter der Pyrolyse geschlossen. Außerdem wurden verschiedene Proben der torrefizierten Biomasse bei unterschiedlichen Verweilzeiten und Sauerstoffkonzentrationen im TGA umgesetzt, um den Koksabbrand zu untersuchen.

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen wurde ein numerisches Modell für die Mitverbrennung torrefizierter Biomasse in existierenden Kohlekraftwerken entwickelt. Dieses betrachtet Pyrolyse und Koksabbrand und nutzt die kinetischen Parameter der experimentellen Untersuchung für die Berechnung des Brennraums. Numerische Berechnungen können zu Vorhersagen von Emissionen, Korrosion, Abbrandverhalten und Emissionen bei der Mitverbrennung torrefizierter biogener Reststoffe genutzt werden. Umfangreiche Tests an einer 1-MW_{th}-Staubfeuerung dienen abschließend zur Validierung des Modells.

Reaktionskinetik torrefizierter Biomassen

Die genaue numerische Simulation der (Mit-)Verbrennung torrefizierter Biomasse ist eine Herausforderung. Im Gegensatz zu homogenen Brennstoffen wie Gas oder in Grenzen auch Kohle besitzt Biomasse eine inhomogene Struktur und zersetzt sich in komplexen thermochemischen Prozessen. Biomasse besteht hauptsächlich aus Hemicellulose, Cellulose, Lignin und anorganischer Asche. Diese heterogene Struktur führt zu vielfältigen Reaktionsraten und diversen Reaktionsmechanismen, sowohl bei der Pyrolyse als auch beim Koksabbrand. Für die Simulation können bestehende numerische Modelle für Kohle

angepasst werden. Abbildung 1 zeigt links (Schema 1) vereinfacht die pyrolytische Zersetzung von Biomasse in Koks und Gase mit der konstanten Reaktionsgeschwindigkeit R_1 nach (Prakash und Karunanithi, 2009). Dieses Einschritt-Globalmodell berücksichtigt die Pyrolyse als eine Einschritt-Reaktion erster Ordnung. Das Modell nach Schema 1 wurde bereits in den institutseigenen Code ESTOS implementiert und soll umfassend anhand der durchgeführten Experimente validiert werden. Schema 2 (Abbildung 1, rechts) berücksichtigt die unterschiedlichen Eigenschaften von Hemicellulose, Cellulose und Lignin. Hierfür müssen die kinetischen Parameter der Pyrolyse von Hemicellulose, Cellulose und Lignin sowie wie die kinetischen Parameter beim Abbrand des Bio-Kokes bestimmt werden.

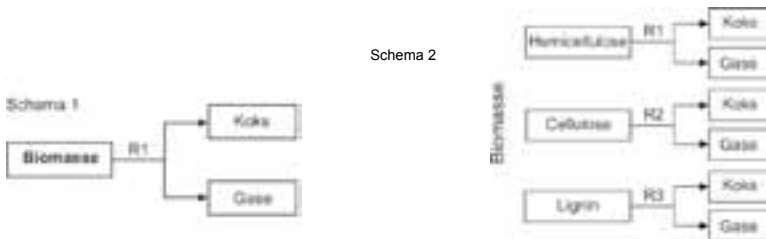


Abbildung 1: Kinetische Mechanismen für die Pyrolyse von Biomasse.

Die Massenänderungsrate dm/dt während der Pyrolyse, welche in Versuchen am TGA direkt gemessen wird, kann durch folgenden funktionalen Zusammenhang dargestellt werden:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} \approx \frac{dm}{dt} = k_m \cdot f(m) \quad (1)$$

Die zeitliche Änderung der Masse $m(t)$ ist allgemein abhängig von der Reaktionsordnung n , also $f(m)=m^n$. Für die Pyrolyse kann jedoch $n=1$ bezüglich des Feststoffs angenommen werden. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Pyrolyse, k_m , wird von vielen Autoren (z.B. Antal et al. 1980) nach der Gleichung von Arrhenius (2) berechnet. Diese beschreibt mit Hilfe eines präexponentiellen Faktors A_0 , auch Frequenzfaktor genannt, und der Aktivierungsenergie, E_A , die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit k_m von der (absoluten) Temperatur T :

$$k_m = A_0 \cdot e^{\frac{-E_A}{RT}} \quad (2)$$

wobei R die universelle Gaskonstante ($8314 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ist.

Am Ende der Pyrolyse bleiben Koks und Asche über. Diese sind vom Gewicht der Probe abzuziehen, um nur den Massenanteil der flüchtigen Stoffe zu betrachten. Hierfür bietet sich an, den Umsatz der flüchtigen Stoffe wie folgt zu definieren:

$$U = \frac{m_{\text{flüchtige}}(t)}{m_{\text{flüchtige,gesamt}}} = \frac{m_0 - m(t)}{m_0 - m_\infty} \quad (3)$$

Es ist m_0 die Masse, die zu Versuchsbeginn eingewogen wurde, $m(t)$ die gemessene Masse zum Zeitpunkt t und m_∞ die Masse, die nach komplettem Ablauf der Pyrolyse im TGA verbleibt (Annahme: vollständig getrocknete Probe). Der Umsatz zum Ende der Trocknung ist somit $U(t=0) = 0$, zum Ende der Pyrolyse ist $U(t \rightarrow \infty) = 1$. Für den Umsatz lässt sich Gleichung (1) wie folgt umschreiben:

$$\frac{dU}{dt} = k_m \cdot (1 - U)^n \quad (4)$$

Bei Versuchen im TGA kommt als weitere Einflussgröße die Heizrate hinzu, da eine isotherme Versuchsdurchführung bauartbedingt nicht möglich ist. Stattdessen wird das TGA über den kompletten Bereich der Pyrolyse mit konstanter Heizrate β betrieben. Außerdem stellt die Heizrate bei der Pyrolyse tatsächlich einen großen Einflussfaktor dar, was Messungen mit unterschiedlichen β belegen. Für konstante Heizraten β im TGA und $n=1$ wird aus Gleichung (4):

$$\frac{dU}{dT} = \frac{1}{\beta} \cdot k_m \cdot (1 - U) \quad (5)$$

Die Aktivierungsenergie E_A und der Frequenzfaktor A_0 lassen sich nun einfach bestimmen. Aus der Messung sind β und dm/dt bekannt, womit sich k_m berechnen lässt. Wenn man nun für beide Seiten der Arrhenius-Gleichung (2) den Logarithmus bildet:

$$\ln(k) = \ln(A_0) - \frac{E_A}{RT} \quad (6)$$

und in einem Diagramm $\ln(k)$ über $1/T$ aufträgt, erhält man eine Gerade, aus deren Gleichung sich Aktivierungsenergie A_0 als Schnittpunkt mit der $\ln(k)$ -Achse und E_A als Steigung leicht ablesen lassen.

Experimentelle Untersuchungen

Verschiedene Biomasseproben wurden in einem selbst konstruierten Batchreaktor (Alobaid et al. 2012) torrefiziert. Im elektrisch beheizbaren, zylindrischen Reaktorrohr ($D_i=50$ mm, $L=1000$ mm) wurden die ca. 500 g (feuchte) Biomasse durch zwei Siebe am Platz gehalten. Die Biomasse wurde zunächst im Stickstoffstrom bei niedrigen Temperaturen getrocknet. Anschließend wurde, weiterhin unter Stickstoffatmosphäre, die Reaktortemperatur über vier Heizdrähte (je 1000 W Leistung) auf Prozesstemperatur von 220 bis 300 °C gebracht. Die entstandenen Torrgase wurden in einen Abgastrakt geleitet oder einer Gasanalyse zugeführt. Nach Ablauf der Torrefizierungszeit von 15-45 Minuten wurde die Vorheizstrecke umgangen und die Biomasse im Stickstoffstrom stark abgekühlt, um die Reaktion zu stoppen. Die Biomasse wurde anschließend dem Reaktor entnommen. Zum Einsatz kamen Buchenholzchips, Holzhackschnitzel und Straßenbegleitschnitt.

Tabelle 1: Koks- und Ascheanteile unbehandelter und torrefizierter Proben

Material	Unbehandelt (Roh)		$T_{\text{Torr}} = 280$ °C	
	Koks [Ma.-%]	Asche [Ma.-%]	Koks [Ma.-%]	Asche [Ma.-%]
Buchenchips	18,7	1,6	40,0	1,5
Holzhackschnitzel	20,8	1,3	38,3	1,4
Straßenbegleitschnitt	20,0	2,4	35,5	3,3

Die Holzhackschnitzel stammen aus einer Mischung von Weichhölzern (u.a. Kiefer, Fichte) und wurden nach der industriellen Ernte vor dem Torrefizieren weiter zerkleinert (Kantenlänge max. 50 mm). Der Straßenbegleitschnitt entstammt einer Bundesstraße und wurde vor dem Torrefizieren ebenfalls zerkleinert. Alle unbehandelten Proben wurden für weitere Untersuchungen bei 85 °C mehrere Stunden in einem Trockenschrank getrocknet. Koks- und Aschemassenanteil sind für unbehandelte Proben, sowie für bei 280 °C (30 Minuten) torrefizierte Proben, in Tabelle 1 aufgetragen. Abbildung (2) zeigt das H/C-Verhältnis, aufgetragen über dem O/C-Verhältnis, für die drei Materialien. Die unbehandelten Proben befinden sich im Diagramm oben rechts und haben den höchsten Anteil Wasserstoff und Sauerstoff. Mit zunehmender Torrefizierungstemperatur sinken Wasserstoff- und Sauerstoffanteil relativ zum Kohlenstoffanteil. Die jeweils für 30 min bei 250 °C und 280 °C torrefizierten Proben befinden sich näher am Koordinaten-Ursprung und haben einen relativ hohen Kohlenstoffanteil. Zum Vergleich ist auch Rheinische Braunkohle im Diagramm aufgetragen.

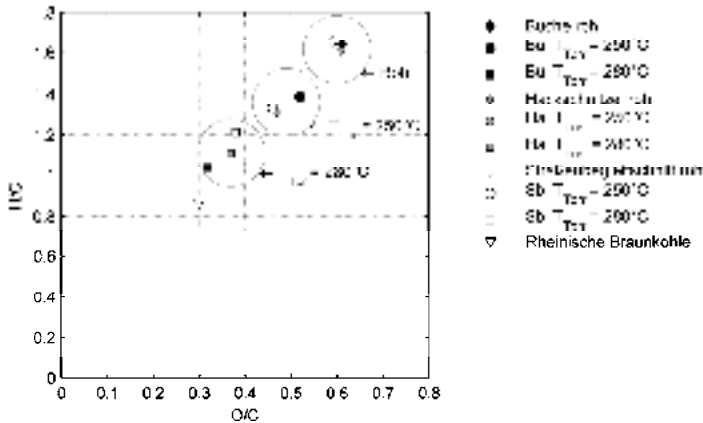


Abbildung 2: H/C-O/C-Diagramm für verschiedene Biomassen.

Nach der Torrefizierung wurden Versuche im TGA durchgeführt, wofür eine repräsentative Teilmenge der torrefizierten Biomasse gemahlen wurde. Anschließend wurden ca. 30 mg in einen Al_2O_3 -Tiegel eingewogen (m_0). Nachdem die Probe im TGA platziert war, wurde der Ofen zunächst mit Stickstoff (100 ml/min) gespült, um Reste des Luftsauerstoffs zu entfernen. Danach wurde das TGA-Gerät mit $\beta = 10$ K/min auf 900°C aufgeheizt. Wegen der geringen Feuchtigkeit des torrefizierten bzw. getrockneten Materials wird auf einen zusätzlichen Schritt zur Trocknung verzichtet. Bei 900°C wird ein isothermes Segment von 27 min eingeführt, um die verbleibende Masse von Koks und Asche (m_∞) möglichst genau bestimmen zu können. Mit Hilfe der Massen m_∞ , m_0 und dem Messsignal $m(t)$ werden nun gemäß Gleichung (3) und (4) der Umsatz U bzw. die Reaktionsrate k_m berechnet.

Ergebnisse und Diskussion

Abbildung (3) zeigt links beispielhaft die Massenabnahme von Buchenholzchips bei der Pyrolyse im TGA, aufgetragen über der Temperatur. Die Kurven sind auf wasserfreie Werte normiert und zeigen neben einer nicht-torrefizierten „Roh“-Probe auch die Massenabnahme zweier Buchenchipsproben, die jeweils für 30 Minuten bei 250°C bzw. 280°C torrefiziert wurden. Bei der unbehandelten Probe ist bereits bei 200°C eine Massenabnahme zu erkennen. Bei 350°C hat sich die Masse der Probe bereits auf 55 % der ursprünglichen Masse reduziert. Bei 400°C verbleiben nur noch ca. 35 % der Ausgangsmasse. Danach ist ein langsamer Massenverlust bis 900°C zu verzeichnen, wo schließlich ca. 22 % Masse verbleiben. Im Vergleich dazu verläuft die Massenabnahme der torrefizierten Proben weniger heftig. Noch bei 300°C ist fast keine Veränderung zu erkennen, erst danach fällt die Kurve steil ab. Bei der leicht torrefizierten Probe sind insgesamt ca. 70 % Massenverlust zu verzeichnen, bei der stark torrefizierten Probe bleibt hingegen fast die Hälfte der Ausgangsmasse über. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits ein größerer Anteil der flüchtigen Stoffe während der Torrefizierung ausgetreten ist.

Rechts in Abbildung (3) wird die Massenänderungsrate, normiert auf die Masse der flüchtigen Bestandteile für die drei Proben aus Abbildung (1) gezeigt, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit negative Änderungsraten nach oben aufgetragen sind. Gut erkennbar ist der Reaktionsbeginn der rohen Probe bei geringen Temperaturen um 200°C. Die Reaktionsgeschwindigkeit der unbehandelten Probe zeigt bei ca. 250°C einen ersten starken Anstieg, währenddessen sich hauptsächlich Hemicellulose zersetzt. Ab 300°C setzt auch die Zersetzung von Cellulose ein, die ihr Maximum bei ca. 355°C erreicht. Ab ca. 380°C ist nur noch die Zersetzung von Lignin erkennbar. Die Zersetzung des Lignins beginnt bereits in niedrigeren Temperaturbereichen, wird dort jedoch durch die Zersetzung von Hemicellulose und Cellulose überlagert. Bei den torrefizierten Proben zeigt sich keine nennenswerte Zersetzung unterhalb 300°C. Bei beiden Proben ist ebenfalls das Maximum bei ca. 355°C zu erkennen, das aus der Zersetzung von Cellulose herrührt. Anschließend zeigt die schwach torrefizierte Probe ein ähnliches Verhalten wie die unbehandelte Probe. Bei der stark torrefizierten Probe ist hingegen die Zersetzung von Lignin ab ca. 400°C deutlicher ausgeprägt. Dies ist mit den unterschiedlichen Massenanteilen der Biomasse zu erklären: Durch die Torrefizierung ist der Lignin-Anteil der Probe und damit die Massenänderungsrate deutlich größer. Das Maximum der Cellulose fällt dafür deutlich geringer aus.

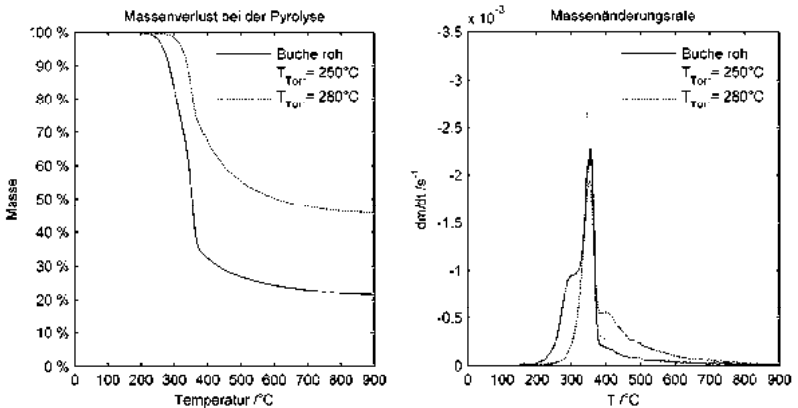


Abbildung 3: Links: Massenabnahme bei der Pyrolyse verschiedener Proben aus Buchenholzchips. Rechts: Massenänderungsrate der gleichen Proben.

In Abbildung (4) ist links die logarithmierte Reaktionsgeschwindigkeit im Arrhenius-Diagramm über der inversen Temperatur aufgetragen. Die graue Kurve stellt dabei die direkt aus der Messung gewonnenen Daten für unbehandelte Buche dar. Schwarz darüber liegen drei Ausgleichsgeraden, die den Bereich zwischen 0,5% Umsatz und 290°C, zwischen 290°C und 330°C sowie zwischen 330°C und dem Maximum der Kurve annähern. Die drei Kurven decken den Bereich der hauptsächlichsten Zersetzung von Hemicellulose, einen Übergangsbereich und den Bereich der hauptsächlichsten Zersetzung von Cellulose ab. Im Bereich von Lignin ab 400°C ist die Massenänderungsrate so gering, dass keine Aussage mehr getroffen werden kann.

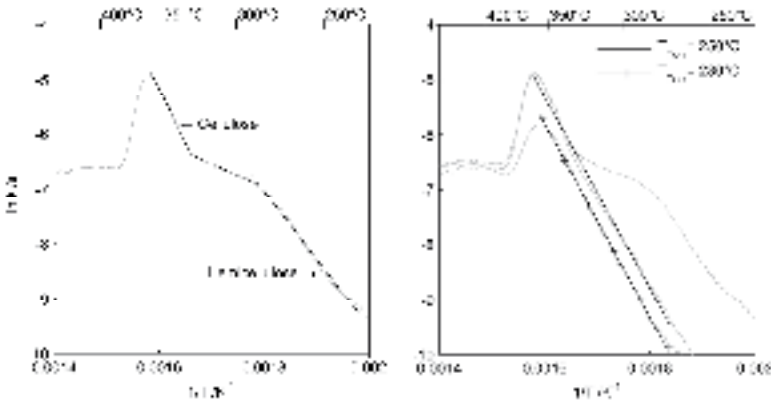


Abbildung 4: Links: Arrhenius-Diagramm für unbehandelte Buchenchips und abschnittsweise Ausgleichsgeraden. Rechts: Messwerte dreier Proben im Arrhenius-Diagramm und zwei Ausgleichsgeraden für torrefizierte Biomasse.

Rechts in Abbildung (4) sind neben den Messwerten der unbehandelten Probe auch die Messwerte zweier Versuche mit torrefizierten Buchenchips (250 °C bzw. 280 °C) abgebildet. Zusätzlich sind zwei Ausgleichsgeraden für torrefizierte Biomasse für einen Bereich zwischen 0,5 % Umsatz und dem Maximum der Kurve dargestellt. Für die rohe Biomasse ist keine Ausgleichsgerade dargestellt. Aus dem guten Deckungsgrad der Messwertekurve mit einer einzelnen Ausgleichsgeraden über den gesamten Bereich kann man erkennen, dass die Pyrolyse der torrefizierten Biomasse homogener verläuft als die Pyrolyse der unbehandelten Buche. Im Bereich ab 330 °C liegen die Ausgleichsgeraden von schwach torrefizierter Biomasse und unbehandelter Biomasse nahezu übereinander. Die Reaktionsrate stark torrefizierter Biomasse verläuft nahezu parallel, beide Biomassen haben also eine nahezu identische Aktivierungsenergie.

Der Einfluss der Heizrate auf die reaktionskinetischen Parameter ist in Abbildung (5) dargestellt. Das linke Diagramm zeigt den Massenverlauf zweier bei 280 °C (30 min) torrefizierter Bucheproben bei der Pyrolyse, für Heizraten mit 10 K/min bzw. 20 K/min aufgetragen, über der Temperatur. Dieser ist für beide Proben sehr ähnlich, Unterschiede kommen durch Inhomogenitäten der Biomasse und einen verzögerten Wärmeübergang bei erhöhter Heizrate. Auch der Verlauf der Massenänderungsraten beider Proben im gleichen Diagramm zeigt eine qualitative Übereinstimmung. In der Darstellung im Arrhenius-Diagramm rechts ist die Steigung beider Geraden und entsprechend die Aktivierungsenergie sehr ähnlich. Der Frequenzfaktor ist im zweiten Fall erwartungsgemäß geringer.

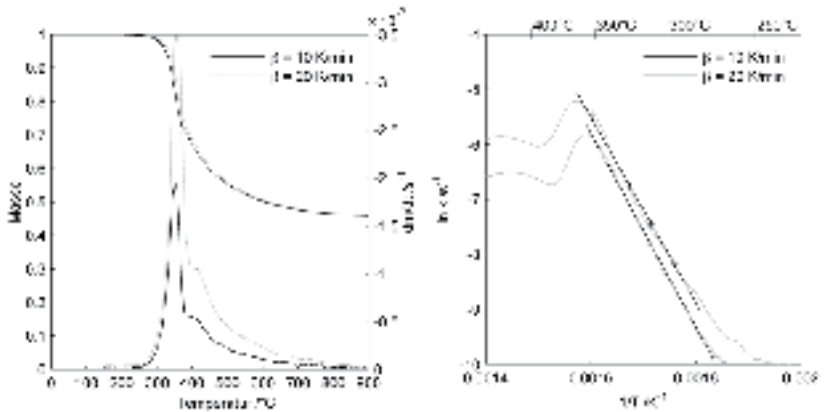


Abbildung 5: Links: Massenabnahme und Massenänderungsrate bei 280 °C torrefizierter Buchenholzchips bei der Pyrolyse für 10 und 20 K/min Heizrate. Rechts: Messwerte beider Proben, aufgetragen im Arrhenius-Diagramm und passende Ausgleichsgeraden.

Die Beobachtungen lassen sich auch auf andere holzartige Reststoffe übertragen. In Abbildung (6) sind im linken Diagramm die Massenabnahme und die Massenänderungsrate dreier, bei 280 °C für 30 Minuten, torrefizierter Proben aufgetragen: Buchenholzchips, Holzhackschnitzel und Straßenbegleitgrün. Die Massenabnahme aller drei Proben ist zunächst ähnlich. Zwischen 650 °C und 700 °C ist beim Straßenbegleiterschnitt jedoch reproduzierbar eine leichte Zunahme der Massenänderungsrate zu erkennen. Auf die Ausgleichsgerade im Arrhenius-Diagramm, aufgezeichnet in Abbildung (6) im rechten Diagramm, hat dies keine Auswirkungen: Das Maximum der Kurve liegt bei deutlich geringeren Temperaturen. Dieser Effekt kann durch einen inhibativen Effekt mineralischer Stoffe auf die Pyrolyse oder einen erhöhten Ausgasungspunkt von Verunreinigungen im Straßenbegleiterschnitt erklärt werden.

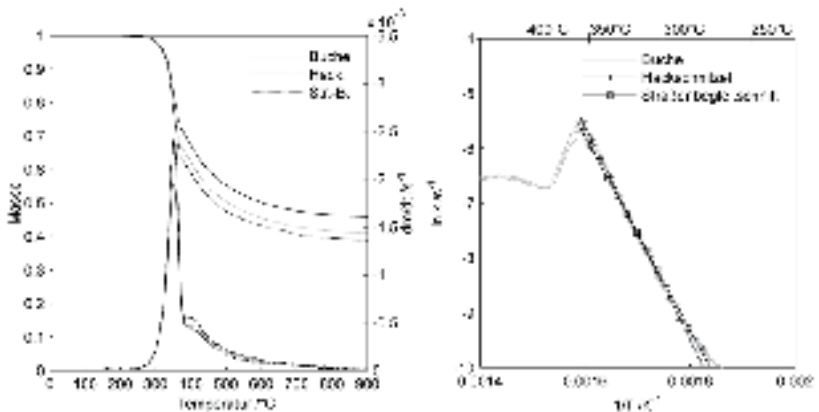


Abbildung 6: Links: Massenabnahme und Massenänderungsrate torrefizierter Proben (Buchenholzchips, Holzhackschnitzel und Straßenbegleiterschnitt), torrefiziert bei 280 °C für 30 Minuten. Rechts: Messwerte der drei Proben, aufgetragen im Arrhenius-Diagramm und passende Ausgleichsgeraden.

Weitere Schritte

Im Laufe des Projektes ist eine weitere Untersuchung der reaktionskinetischen Parameter nötig. Der Koksabbrand muss zum einen im TGA mit isothermen Messungen, zum anderen im Flugstromreaktor bei kontinuierlicher Brennstoffzufuhr näher betrachtet werden. Die isothermen Messungen im TGA werden durch Einstellen einer festen Temperatur unter Stickstoffatmosphäre und anschließender Sauerstoffzugabe mit einem festen Volumenanteil durchgeführt. Nach mehreren Messungen mit unterschiedlicher Sauerstoffkonzentration, bei verschiedenen Temperaturen, lassen sich Frequenzfaktor und Aktivierungsenergie auch für den Koksabbrand bestimmen.

Bei weiteren Versuchen im Flugstromreaktor wird torrefizierte Biomasse mit hohen Heizraten von 10^4 bis 10^5 K/s im Gasstrom erhitzt und verbrannt. Zündverhalten und Koksabbrand lassen sich so unter realitätsnahen Bedingungen simulieren. Zum Einsatz kommt ein institutseigener Flugstromreaktor. Dort lassen sich Temperaturen zwischen 900 und 1600 °C, ein maximaler Gasstrom von 40 m³/h und Verweilzeiten zwischen 0,1 und 10 Sekunden einstellen. Der Reaktor hat eine Gesamthöhe von 10 m; die Brennkammer hat einen Durchmesser von 70 mm. Die Brennstoffzufuhr ist abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Brennstoffs und den geplanten Versuchen auf ca. 100 bis 3000 g/h regelbar. Abbildung (7) zeigt die schematische Darstellung des Flugstromreaktors. Mit der verfahrbaren Lanze können Proben der Biomasse nach einer festen Verweilzeit dem Brennraum entnommen und hinsichtlich des Koksabbrands untersucht werden. Verschiedene Messöffnungen ermöglichen eine Analyse der Brenngase (Zorbach et al. 2009; Binzer et al. 2007).

Das Modell der numerischen Simulation wird mittels der Ergebnisse aus den TGA- und Flugstromreaktor-Messungen angepasst. Schließlich wird torrefizierte Biomasse in einer 1 MW_{th}-Staubfeuerung mitverbrannt. Mit einer selbst entwickelten Korrosionssonde sowie durch Gasmessungen mit einer kontinuierlichen Gasmessung sowie einer Gaschromatographie-/Massenspektrometer-Kombination werden korrosive Gase und deren Auswirkungen gemessen. Auch das Zündverhalten und die Verschlackung werden untersucht. Mit Hilfe dieser Daten wird das Modell validiert werden, um künftig die Mitverbrennung torrefizierter Biomasse in bestehenden Großkesseln zuverlässig zu simulieren.

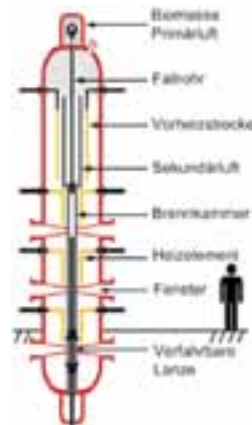


Abbildung 7: Der Flugstrom-Reaktor am EST.

Zusammenfassung

Verschiedene Biomassen wurden in einem Batchreaktor bei 250 °C und 280 °C unter Stickstoffatmosphäre torrefiziert und anschließend gemahlen. Die Proben wurden dann in einem TGA bei verschiedenen Heizraten im trockenen Stickstoffstrom pyrolysiert. Mit Hilfe der gemessenen Massenänderung wurde die Reaktionsrate als Funktion der Temperatur ermittelt sowie Aktivierungsenergie und Frequenzfaktor bestimmt. Bei der Torrefizierung wird der Großteil der Hemicellulose bereits zersetzt, so dass sich die Pyrolyse der torrefizierten Biomasse über einen großen Temperaturbereich annähernd mit der Pyrolyserate von Cellulose beschreiben lässt. In allen untersuchten Fällen ist die Geschwindigkeit der bei 280 °C torrefizierten Proben in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Proben mit 250 °C Torrefizierungstemperatur. Bei allen untersuchten Proben liegt die Aktivierungsenergie der torrefizierten Proben höher als die der unbehandelten, was eine Verschiebung des Beginns der Pyrolyse zu hohen Temperaturen bedeutet. Für die Mitverbrennung in Kraftwerken bedeutet dies eine Angleichung der Biomasse an Kohle, die sich ebenfalls erst bei höheren Temperaturen pyrolytisch zu zersetzen beginnt. Des Weiteren ist die Pyrolyserate von der Aufheizrate abhängig. Unterschiedliche Biomassen weisen nach der Torrefizierung ein sehr ähnliches Reaktionsverhalten auf.

Im nächsten Schritt sollen kinetische Parameter für den Koksabbrand ermittelt werden. Mit den kinetischen Parametern für Pyrolyse und Koksabbrand lassen sich numerische Berechnungen von Feuerungen hinsichtlich z.B. Emissionen, Koksabbrand und Korrosion durchführen, die mit weiteren Messungen in einem Flugstromreaktor und einer 1-MW_{th}-Versuchsbrennkammer validiert werden sollen. Mit Hilfe der numerischen Simulation ist eine Abschätzung des Mitverbrennungsverhaltens torrefizierter Biomasse in bestehenden Großkraftwerken möglich.

Literatur

Alobaid, F.; Busch, J.-P.; Ströhle, J.; Epple, B. (2012): Investigations on torrefied biomass for the co-combustion in pulverized fired furnaces, VGB PowerTech 11/2012.

Antal Jr., M. J.; Friedman, H. L.; Rogers, F. E. (1980): Kinetics of Cellulose Pyrolysis in Nitrogen and Steam. Combustion Science and Technology, Volume 21, Issue 3-4.

Binzer, B.; Ströhle, J.; Epple, B. (2007): Experimentelle Untersuchungen zum Abbrandverhalten von Braunkohle unter Oxyfuel-Bedingungen. 23. Deutscher Flammentag, Berlin.

Prakash, N.; Karunanithi, T. (2009): Advances in Modeling and Simulation of Biomass Pyrolysis. Asian Journal of Scientific Research, 2: 1-27.

Zorbach, I.; Chen, X.; Ströhle, J.; Epple, B. (2012): Korrosion und Verschlackung in Hochtemperaturkraftwerken mit neuen Werkstoffen. BMWi-Forschungsvorhaben im Rahmen von COORETEC, Förderkennzeichen 0327744D, Schlussbericht.

Konversion fettsäurebasierter Abfallsubstanzen in sauerstofffreie flüssige und gasförmige Kraftstoffkomponenten durch Cracken an mikroporösen Katalysatoren

Volker Heil*, Harouna Camara, Safouane Chahid, Anna Fastabend, Marko Juricev-Spiric, Meller, Andreas Menne, Axel Kraft, Marcin Krzanowski, Karl Christoph A. Unger

Adresse: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen

*E-Mail: volker.heil@umsicht.fraunhofer.de

www.umsicht.fraunhofer.de, www.biobasedfuels.de

Abstract

Biobasierte Altfette und nicht essbare Pflanzenöle lassen sich durch katalytisches Cracken in Blendingkomponenten für biogene flüssige und gasförmige Treibstoffe umsetzen. Die Flüssigprodukte sind dabei langkettige Kohlenwasserstoffe primär im Diesel-Siedeschchnitt; sekundäre Produkte sind dem Kerosin- und Benzin-Siedeschchnitt zuzuordnen. Als primäre gasförmige Zielprodukte sind Erdgassubstitut („Substitute Natural Gas“ - SNG) und Flüssiggas („Liquified Petroleum Gas“ – LPG) zu nennen. Als Katalysatoren fungieren vornehmlich Aktivkohlen. Zeolithe führen verstärkt zu ungesättigten Produkten, die als Chemierohstoffe verwendbar sind.

Die erfolgreiche Anwendbarkeit des Verfahrensprinzips wird für Reststoffe wie Dekanterfett aus der Vorklärung eines Ölpflanzenverarbeiters, Havariefett aus der Ölpflanzenverarbeitung, Altfett aus der Gastronomie und lebensmittelverarbeitenden Industrie sowie für Jatropha Curcas-Öl gezeigt. Laboruntersuchungen im Maßstab 60 ml/h Input werden dabei durch Technikumsuntersuchungen (2-3 l/h Feed) ergänzt.

Im Labormaßstab ließen sich Einsatzstoffe wie Havarie- und Dekanterfette aus der Ölpflanzenverarbeitung mit Ausbeuten bis zu 68 % massenbezogen und 80 % energiegehaltbezogen zu sauerstofffreiem organischen Flüssigprodukt umsetzen, das nach Destillation zur Verwendung für Kraftstoffblends geeignet ist. Es konnte gezeigt werden, dass sich gasaktivierte Aktivkohle durch Reaktivierung mit Wasserdampf für das untersuchte Verfahren mehrfach hintereinander als Katalysator zurückgewinnen lässt.

Für die gezielte Gasproduktherstellung konnten geeignete Versuchsbedingungen beschrieben werden, deren Temperaturen mit 475-500 °C deutlich oberhalb des Temperaturniveaus der reinen Flüssigproduktherstellung liegen. Experimentell wurden an Aktivkohle bis zu 34 Gew.-% massenbezogener Ausbeute entsprechend 47 % energetischer Ausbeute für den organischen Anteil am Gasprodukt (OGP) erzielt. Mit einem HZSM-5-Zeolithen als nicht kohlenstoffbasiertem Katalysator konnten bis zu 43 Gew.-% massenbezogener Ausbeute entsprechend 64 % energetischer Ausbeute für das OGP erreicht werden.

Schlagwörter: Katalytische Decarboxylierung, katalytisches Cracken, Altfette, Altöle, Fettsäuren, LPG, SNG, Jatrophaöl, Biotreibstoffe

Katalytisches Cracken biobasierter Fette und Öle

Durch das hier beschriebene katalytische Cracken wird „biobasierter Diesel“ hergestellt, dessen wesentliche Inhaltsstoffe als Hauptbestandteile fossiler Kraftstoffe oder ihrer Vorprodukte bekannt sind. Dieser biobasierte Diesel ist von dem chemisch anders aufgebauten Biodiesel zu unterscheiden.

Pflanzliche und tierische Fette bestehen in erster Linie aus Triglyceriden, also Stoffen, in denen drei Fettsäuremoleküle über Esterbindungen an einen Glycerinrest gebunden sind. Bei der Biodieselherstellung werden diese katalytisch mit Methanol zu drei Molekülen Fettsäuremethylester („FAME“) und einem Glycerinmolekül umgesetzt. Durch die sauerstoffhaltige Esterbrücke unterscheiden sich die FAME-Moleküle von den Inhaltsstoffen fossiler Kraftstoffe, welche nahezu sauerstofffrei sind. Dies bedingt die eingeschränkte Kompatibilität dieser Produkte mit den meisten Kraftfahrzeug-Dieselmotoren.

Beim katalytischen Cracken an mikroporösen Substanzen hingegen wird aus diesen Triglyceriden – ebenso wie aus den besonders in Altvetten enthaltenen „freien Fettsäuren“ – der Sauerstoff mit den an ihn gebundenen Kohlenstoffatomen als CO_2 oder aber als CO und H_2O ausgetragen. Dabei werden die gebundenen Fettsäuren vom Glycerinrest abgespalten. Insbesondere bei Verwendung von Aktivkohle findet zudem ein Übergang von Wasserstoffatomen an die ungesättigten Doppelbindungen der so gebildeten Kohlenwasserstoffe statt. Aus den typischen Pflanzenöl-Fettsäuren mit 16 oder 18 Kohlenstoffatomen („C16“, „C18“) entstehen so langkettige C15- und C17-Alkane. Teile des Ausgangsmaterials bilden Aromaten oder verkoken noch weiter bis hin zu graphitähnlichen Strukturen und setzen so den zur beschriebenen Absättigung notwendigen Wasserstoff frei.

Durch das Verkoken setzen sich die Poren des Katalysators mit der Zeit zu, so dass dieser ausgetauscht und regeneriert werden muss. Im eigentlichen Wortsinn findet hier also keine Katalyse statt, da der mikroporöse Stoff systemimmanent bei der Reaktion verändert wird. Zur sprachlichen Vereinfachung soll dieser Begriff hier dennoch benutzt werden. Abbildung 1 stellt die vereinfachten Reaktionswege beider Synthesen gegenüber.

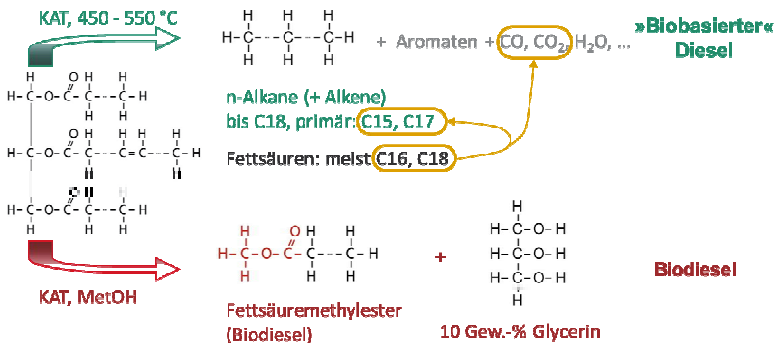


Abbildung 1: Vereinfachte Reaktionswege bei der Herstellung von biobasiertem Diesel und Biodiesel.

Abbildung 2 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschema des katalytischen Crackens. Das Substrat wird verdampft und gemeinsam mit einem Trägergas sowie gegebenenfalls Wasserdampf bei Temperaturen ab 450 °C über einen mikroporösen Katalysator geleitet. Hier zersetzen sich die Einsatzstoffe zu langkettigen Kohlenwasserstoffen. Sauerstoff wird aus den Molekülen abgetrennt; weiterhin treten Sekundärreaktionen (Cracken, Ringbildungen etc.) auf. In einer anschließenden Kühlung und Stofftrennung werden gasförmige und flüssige Produkte aufgetrennt. Flüssige und gasförmige Teilfraktionen können zur Reaktorbeheizung verwendet werden; ein Teil des Inertgases wird optional zurückgeführt.

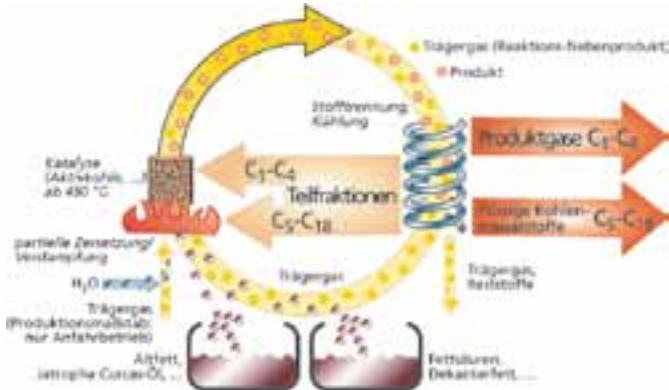


Abbildung 2: Vereinfachtes Verfahrensschema des katalytischen Crackens biobasierter Fette und Öle.

Das Verfahren basiert auf einem bereits 1932 von René Oppenheim eingereichten Patent, das eine Umsetzung biobasierter Fette und Öle an Aktivkohlefasern unter Überdruck bei 300-350 °C zu hochkalorischen Gasen und flüssigen Kohlenwasserstoffen beschreibt (Oppenheim 1932). Im Gegensatz hierzu wird das in diesem Artikel vorgestellte Verfahren bei Normaldruck betrieben. Jüngere Veröffentlichungen konzentrieren sich meist auf Umsetzungen an zeolithischen Katalysatoren, insbesondere an HZSM-5-Zeolithen. Beispielhaft seien hier die Arbeiten von Prasad et al. und Taufiqurrahmi et al. zum katalytischen Cracken von Rapsöl bei 340-400 °C beziehungsweise von gebrauchtem Speise-Palmöl an nanokristallinen zeolithischen Katalysatoren ZSM-5, Beta und Y bei 400-500 °C im Festbettreaktor genannt (Prasad 1986; Taufiqurrahmi 2011). Vorschläge für eine Beschreibung der Reaktionsmechanismen beim katalytischen Cracken biobasierter Öle an HZSM-5-Zeolithen wurden beispielsweise von Sadrameli et al. vorgelegt (Sadrameli 2009).

Zielprodukte und Visionen

Die hier berichteten Arbeiten wurden in den beiden Vorhaben „Screening von biogenen Abfallsubstanzen zur Umwandlung in Benzin- und Dieselmotorkraftstoffe durch katalytisches Cracken“ und „SNG und LPG aus biogenen Reststoffen – technische Machbarkeit und Wertungspotenzial“ durchgeführt. Diese Projekte laufen unter dem Förderkennzeichen BMU-03KB007 („CRACKEN“) und BMU-03KB028 („SNG und LPG“) im Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ durchgeführt. Die technologischen Grundlagen sind in

verschiedenen Ländern patentrechtlich für Fraunhofer UMSICHT als durchführende Forschungsstelle geschützt (Cinquemani 2003; Heil 2005, 2008)

Der Fokus im Projekt „CRACKEN“ lag auf der Herstellung flüssiger Kraftstoffkomponenten aus Reststoffen und Koppelprodukten pflanzlicher Öle und Fette. Es sollte die Herstellung von Blendingkomponenten als „grüne“ Anteile von Diesel, Kerosin und Benzin ohne motortechnisch bedingte Einschränkung der Zumischbarkeit untersucht werden.

Im Projekt „SNG und LPG“ wurde die gezielte Produktion der Gasphase beim katalytischen Cracken biobasierter Öle untersucht. Hierbei sollten die Möglichkeiten zur Herstellung hochwertiger gasförmige Kohlenwasserstoffgemische wie Erdgassubstitut („Substitute Natural Gas“ - SNG) und Flüssiggas („Liquified Petroleum Gas“- LPG) beleuchtet werden. Ein spezielles Zielprodukt des Vorhabens war ein Brenngasgemisch (LPG oder ähnliche Gaszusammensetzung), mit welchem Biomethan zu netzeinleitbaren Erdgasqualitäten aufgewertet werden kann. Damit sollte eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Herstellung von komplett biogenem, spezifikationsgerechtem SNG aufgezeigt werden. Des Weiteren deckte das Projekt mit den Produkten „Bio-SNG“ und „Bio-LPG“ insbesondere auch beide technisch relevanten Gasgemische des Mobilitätssektors ab. Als Substrate wurden neben Reststoffen auch nicht essbare Pflanzenöle untersucht.

Methoden und Anlagen

Für die grundlegenden Untersuchungen wurde eine Laboranlage zur Umsetzung von 60 ml/h flüssigem Öl-oder Fetteinsatzstoff aufgebaut, die Abbildung 3 zeigt. Aus einem bei 70 °C temperierten, gerührten Vorlagebehälter (1) wird das Substrat durch eine Schlauchpumpe (2) in einen Schrägröhrverdampfer (4) geleitet und geht dort bei 350-450 °C in die Gasphase über. Aus einem Wasserverdampfer und Gasvorwärmer (3) können Stickstoff als Inertgas sowie Wasserdampf bei mit bis zu 350 °C zugegeben werden. Das Gasgemisch durchströmt im Abstrom einen Festbettreaktor (5), welcher mit dem Katalysator gefüllt ist und mittels eines Klapprohrofens auf bis zu 550 °C beheizt werden kann. Der entstehende primäre Produktgasstrom wird in zwei in Reihe angeordnete, bei 5 °C betriebene Schlangenkühler (6) geleitet. Anfallendes Kondensat wird unterhalb der Kühler gesammelt und als entnommen. Nicht kondensiertes Produkt wird in zwei mit Wasser gefüllte Waschflaschen (in der Abbildung 17 ist von der ersten nur der Ansatz zu sehen) und danach in eine thermische Nachverbrennung geleitet. An deren Zuleitung befindet sich eine Vorrichtung für die Entnahme von Gasproben, deren Zusammensetzung im Gaschromatographen (GC-FID/WLD) analysiert werden kann.



Abbildung 3: Laboranlage zum katalytischen Cracken.

Die spezifische Oberfläche der Aktivkohlepartikel nach Brunauer, Emmett und Teller („BET-Oberfläche“; Brunauer-1938, DIN 66 131) nimmt im Prozess bis zum Durchbruch der Fettsäuren auf etwa 15 % des Ausgangswertes ab. Die teils graphitischen Strukturen, die sich in den Katalysatorporen ablagern, lassen sich nicht durch nasschemische Reaktivierung oder thermisches Austreiben herauslösen, so dass die verbrauchten Aktivkohlen erneut aktiviert werden müssen. Hierzu bietet sich die Gasaktivierung an.

Technisch geschieht diese meist in Drehrohrreaktoren mit Wasserdampf ($C + H_2O \rightleftharpoons H_2 + CO$; $C + 2 H_2O \rightleftharpoons 2 H_2 + CO_2$) und / oder Kohlendioxid ($C + CO_2 \rightleftharpoons 2 CO$) bei Temperaturen bis zu 1000 °C (von Kienle1980: 40 ff.). Die erfolgreiche, mehrfache Reaktivierbarkeit und Wiedereinsatzbarkeit dampfaktivierter Aktivkohlen wird an anderer Stelle gezeigt (Heil-2012b: 64 ff.).

Zur Maßstabsübertragung wurde eine Technikumsanlage eingesetzt, welche als Ausschnitt in Abbildung 4 zu sehen ist. Grundsätzlich folgt der Aufbau der Technikumsanlage dem Verfahrensprinzip der Laboranlage. Insgesamt können im Gegensatz zur Laboranlage aber etwa 3 l/h Alt fett umgesetzt werden, was einem Scale-up-Faktor von etwa 50 entspricht. Zwei weitere wichtige Unterschiede stellen die Konzepte zur Verdampfung und Überhitzung sowie zum Kühlen des Produktes nach dem Reaktor dar. Während in der Laboranlage ein schräg liegendes Rohr das Aufheizen, Verdampfen und Überhitzen des Feedstromes in einem Apparat realisiert, geschieht jede dieser Operationen in der Technikumsanlage in einem eigenen Apparat. Der aus dem Reaktor austretende Produktgasstrom wird mittels einer Quenche abgekühlt und so das OLP auskondensiert (in der Laboranlage wurde dieser Teil mittels zweier Schlangenkühler umgesetzt). Als Quenchflüssigkeit fungiert Wasser, so dass das organische Flüssigprodukt einer Tagesproduktion durch Dekantieren abgezogen werden kann.



Abbildung 4: Technikumsanlage zum katalytischen Cracken, Ausschnitt (Fettbereitstellung bis Verdampfung, Produkttrennung und -lagerung).

Analytik und Definitionen

Das in den Versuchen erzeugte organische Flüssigprodukt („OLP“ - Organic Liquid Product) wird mit Hilfe eines Gaschromatographen mit massenspektrometrischem Detektor (GC-MS) analysiert. Mittels der Daten, die nach der Trennung durch das Massenspektrometer aufgenommen werden, können die verschiedenen Substanzen identifiziert und quantifiziert werden. Die Auswertung erfolgt anhand der 30 höchsten Signale (Peaks) von insgesamt 300 bis 400 Peaks. Durch die 30 signalstärksten Komponenten werden zumeist 40 % bis 50 % des OLP charakterisiert, wobei eine Differenzierung in folgende Fraktionen erfolgt: Alkane bis C11, Alkane ab C12, ungesättigte Verbindungen, alkylierte Benzole, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe und Carbonsäuren. Bei den Alkanen handelt es sich vorwiegend um die unverzweigten Verbindungen. Alle detektierten Komponenten werden zudem in einem Summenparameter erfasst, welcher den mit Gaschromatographie zu messenden Anteil des flüssigen Produktes darstellt. In den Diagrammen nicht aufgeführte Produktklassen wurden unter den 30 höchsten Peaks nicht detektiert.

An der Laboranlage können vor dem Einleiten des Gasstroms in die TNV Gasproben zur Analyse im GC-WLD/FID (Gaschromatograph mit Wärmeleitfähigkeits- und Flammenionisationsdetektor) gezogen werden. Durch den WLD werden die Gase Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan, Ethan, Wasserstoff und Stickstoff detektiert. Über den FID-Strang lassen sich Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge (C1-C6) nachweisen und weiter zwischen verschiedenen Isomeren sowie zwischen Alkanen und Alkenen unterscheiden. In der weiteren Auswertung werden die Messwerte für Methan und Ethan aus beiden Detektoren jeweils arithmetisch gemittelt. Der mittlere Molanteil eines Produktgases ergibt sich dann als Mittelwertbildung über alle Messzeiten (bis zu zwei Messungen pro Stunde).

Zur Auswertung der Versuche wird weiterhin neben der (massenbezogenen) Ausbeute (Masse eines Produktes, geteilt durch die Masse der eingesetzten Öle und Fette als Einsatzstoffe oder „Edukte“) auch die „Energiegehaltbezogene Ausbeute“ oder kurz „Energetische Ausbeute“ verwendet, bei deren Berechnung die die Ausbeute mit dem für motorische Verbrennungen relevanten Heizwert H_i (früher als „unterer Heizwert“ H_u bezeichnet) gewichtet wird:

$$\text{Energetische Ausbeute}_i = \frac{\text{Masse Produkt}_i \cdot H_i}{\sum_j (\text{Masse Edukt}_j \cdot H_j)} \quad (1)$$

Bei jedem Versuch wird eine Katalysatormasse $m_{\text{Katalysator}}$ vorgelegt und eine gesamte Eduktmasse m_{Feed} im Laufe des Versuches darüber geleitet. Das Verhältnis dieser Massen bildet den spezifischen Katalysatoreinsatz μ des Versuches:

$$\mu = \frac{m_{\text{Katalysator}}}{m_{\text{Feed}}} \quad (2)$$

Der spezifischen Katalysatoreinsatz μ ist nicht mit dem spezifischen Katalysatoreinsatz beim Fettsäure-Durchbruch μ_D zu verwechseln, der sich in dem Moment einstellt, wo das erste Mal Carbonsäuren in nicht mehr tolerablem Umfang hinter dem Reaktor detektiert werden können. μ_D gibt die Belastungsgrenze des Katalysators an; ist dies erreicht, muss der Katalysator als nicht mehr hinreichend aktiv angesehen werden.

Aufgrund seiner Definition ist μ_D nicht nur von den Reaktionsbedingungen abhängig, sondern auch davon, welcher Carbonsäuregehalt im Feed toleriert wird. In den vorgestellten Untersuchungen wird der Katalysator als nicht mehr hinreichend aktiv eingestuft, wenn in dem beschriebenen OLP-Analyseverfahren eine Carbonsäure unter den 30 höchsten GC-MS-Peaks auftritt. In diesem Fall ist die Belastungsgrenze des Katalysators erreicht oder überschritten, es gilt $\mu \leq \mu_D$.

Einsatzstoffe und Ergebnisse

Die dargestellten Versuche zeigen die Umsetzung von indonesischem Jatropa Curcas-Öl, „Dekanterfett“ (Fettsäurerückstände aus der chemisch-physikalischen Vorklärung eines Ölpflanzenverarbeiters), „Havariefett“ (im Verarbeitungsprozess anfallendes, verunreinigtes Öl/Fett aus der Ölpflanzenverarbeitung sowie als „Smeu“ bezeichnetes gemischtes, homogenisiertes und vorgereinigtes Altfett aus der Gastronomie und lebensmittelverarbeitenden Industrie).

Die eingesetzten Aktivkohlen werden – passend zur Nomenklatur der Abschlussberichte – als AK2 und AK4 bezeichnet. AK2 ist eine gasaktivierte Kornaktivkohle mit einer „BET-Oberfläche“ von ca. 1260 m²/g und einer spezifischen Mesoporenoberfläche nach Barrett, Joyner und Halenda („BJH“, Joyner-1951, DIN 66 134/) von 56 m²/g. Die wasserdampfaktivierte Formaktivkohle auf Holzkohlebasis AK4 ist mit spezifischen Oberflächen von ca. 1250 m²/g (BET) und 80 m²/g (BJH) leicht mesoporöser als die AK2. AK3 schließlich ist eine wasseraktivierte Kornaktivkohle auf Kokoschalenbasis, die quasi keine Mesoporen aufweist, so dass die spezifische Oberfläche (BET) von 1090 m²/g fast alleine den Mikroporen zuzurechnen ist.

Havariefett konnte im Laborreaktor bei einer Reaktortemperatur von 450 °C und einem N₂-Trägergasstrom von 100 l/h mit einer OLP-Ausbeute von 68 Gew.-%, entsprechend einer energetischen Ausbeute von 80 % umgesetzt werden, wie Abbildung 5 zeigt. Die organischen Anteile des Gasproduktes („OGP“, Organic part of the Gas Product) erreichten 9 Gew.-% Ausbeute und 13 % energetische Ausbeute. Das OGP enthielt in den ersten 210 min. des Versuchs neben Alkanen ab C₁₂ auch kürzerkettige Alkane sowie alkylierte Benzole; im weiteren Verlauf des 350 min. dauernden Versuches wurden nur noch Alkane ab C₁₂ bestimmt. Damit konnten in erster Linie Produkte im Diesel-Siedeschnitt erzeugt werden; daneben traten in relevantem Maße auch Flüssigprodukte im Benzin-Siedeschnitt sowie gasförmige Kohlenwasserstoffe auf. Kerosinkomponenten würden sich aus dem Überlappungsbereich des Benzin- und Diesel-Bereiches erzeugen lassen; alkylierte Benzole werden als Bestandteile von Turbinentreibstoffen benötigt. Energetisch gesehen entfallen lediglich 2 % auf die anorganischen Gase und 6 % auf die Ablagerungen in der Aktivkohle; der Anteil des Gases ließe sich in einer technischen Anlage energetisch zur Reaktorbeheizung nutzen, der in der Aktivkohle gebundene würde bei der Aktivkohlereaktivierung als nutzbare Verbrennungswärme frei.

Mit $\mu = 0,14$ wurde ein für dieses Verfahren recht geringer spezifischer Katalysatoreinsatz erreicht; die durch μ_D gegebene Katalysator-Belastungsgrenze wurde nicht überschritten (Heil-2012b: 52 ff.).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die Produktzusammensetzung des katalytischen Crackens auch durch die Nutzungsdauer des Katalysators beeinflussen lässt.

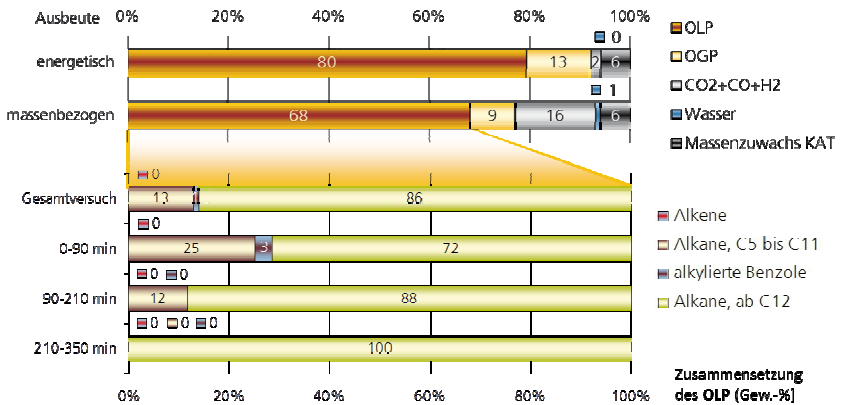


Abbildung 5: Laborversuch mit Havarietett an AK2 bei 450 °C: Ausbeuten und OLP-Zusammensetzung.

Abbildung 6 zeigt am Beispiel der Umsetzung von Dekanterfett an AK2, dass sich die Ausbeuten durch Erhöhung der Reaktionstemperatur, hier von 450 auf 475 °C, stark zugunsten der organischen Gasprodukte verschieben lassen. Eine Erhöhung der Verweilzeit im Reaktorbett durch Reduktion des Trägergasstromes erhöht die OGP-Ausbeute noch weiter, so dass schließlich massenbezogen 34 % und energetische 48 % für das OGP erhalten werden konnten. Wiederum bezogen auf die Fetteinsatzmasse kommen die LPG-Bestandteile Propan, Butan und Propan-2-yl-Pentan-2-yl auf eine Gesamtausbeute von 14 Gew.-%, während Methan als SNG-Hauptbestandteil 3 Gew.-% erreicht (Heil-2012a: 48 ff.).

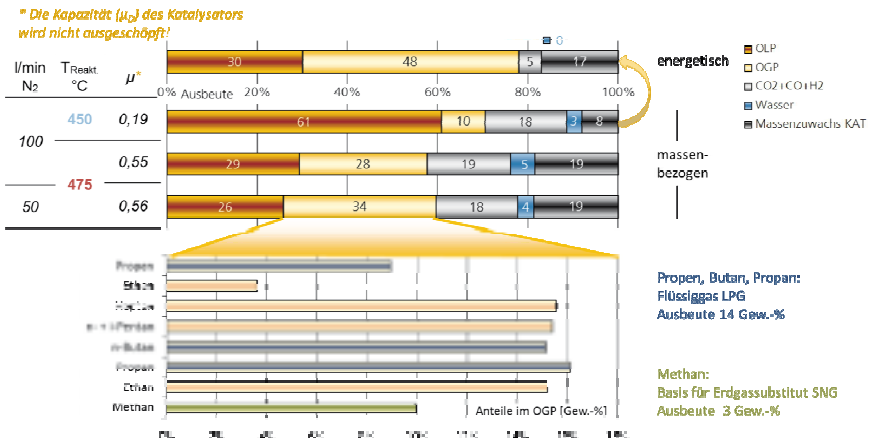


Abbildung 6: Laborversuch mit Dekanterfett an AK2 bei 450 °C: Ausbeuten und Gaszusammensetzung.

Wie Abbildung 7 am Beispiel der Jatropha-Curcas-Öl-Umsetzung (500 °C Reaktortemperatur, 100 l/h N₂) verdeutlicht, führt die Verwendung eines kommerziellen HZSM-5-Zeolithen zu einer starken Verschiebung der Gasproduktanteile hin zu den Olefinen Ethen und insbesondere Propen. Für beide Stoffe gemeinsam ergibt sich, wiederum auf die Eduktmasse bezogen, eine Ausbeute von 34 Gew.-%, wovon 88 % auf das Propen entfallen. Die bevorzugte Bildung dieser Chemierohstoffe ist allerdings damit verbunden, dass das OPL hauptsächlich aus alkylierten Benzolen und Alkenen besteht; die Bildung langkettiger Alkane geschieht hier nur in wesentlich geringerem Maße als an Aktivkohle (Heil-2012a: 34 ff.).

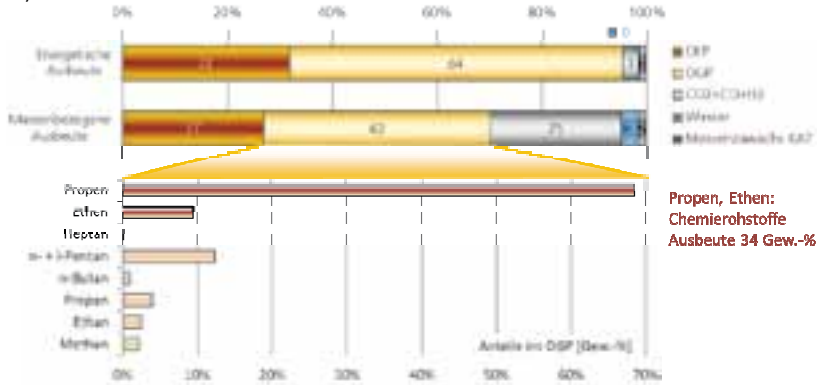


Abbildung 7: Laborversuch mit Jatrophaöl an HZSM-5 bei 500 °C: Ausbeuten und Gaszusammensetzung.

Die Zusammensetzungen des OLP aus fünf Versuchen mit Havariefett und gemischtem Altfett an AK3 und AK4 bei 450-460 °C Reaktortemperatur in der Technikumsanlage zeigt Abbildung 8. An AK4, die nennenswerte Mengen an Mesoporen aufweist, wurden zwischen 55 und 64 Gew.-% Alkane ab C₁₂ erzielt; der Anteil der Alkene betrug 8-9 Gew.-%. Der Einsatz der rein mikroporösen AK3 hingegen führte zu geringeren Anteilen an Alkanen ab C₁₂ (23 und 40 Gew.-%). Während die Alkene hier nur bei jeweils 1 Gew.-% lagen, bildeten sich 5-6 Gew.-% polyzyklischer Aromaten, die beim Einsatz von AK4 nicht beschrieben wurden. Dies weist darauf hin, dass für die gezielte Erzeugung der als Diesel-Blend geeigneten C₁₅- und C₁₇-Alkane als Primärprodukte Aktivkohlen mit einer ausgeglichenen Porenradienverteilung zu bevorzugen sein könnten.

Die Siedekurve des Gemisches aus allen fünf Versuchen liegt zwischen denen von kommerziellen Diesel- und Benzin-Kraftstoffen, was auf eine gute Verwertbarkeit der Produkte hinweist.

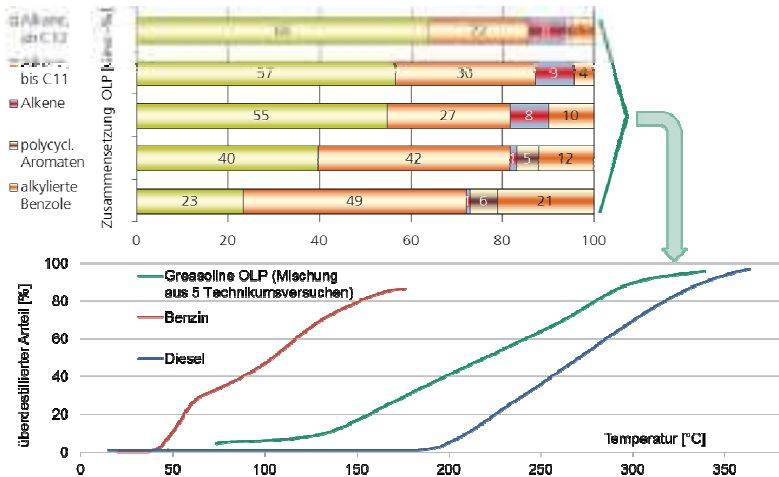


Abbildung 8: Technikumsversuche mit Havariefett und gemischtem Altfett an AK3 und AK4 bei 450-460 °C.

Die beschriebenen, vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ geförderten Vorhaben bauen auf früheren Arbeiten auf, die von der Europäischen Kommission im 6. Forschungsrahmenprogramm als „CRAFT“-Projekt (mittelstandsorientierte Kooperationsforschung) Nr. 018109 GREASOLINE sowie durch das Land Mecklenburg-Vorpommern gefördert wurden. Wir danken allen Fördergebern für die Unterstützung.

Das Bundesumweltministerium, die Europäische Kommission und das Land Mecklenburg-Vorpommern sind in keiner Weise verantwortlich für den Inhalt dieser Veröffentlichung; die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine bei den Autoren.

Literatur

Brunauer, S.; Emmett, P. H.; Teller, E. (1938): Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. In: Journal of the American Chemical Society, 2, 1938, Nr. 60, S. 309-319.

Cinquemani, C. et al. (2003): Schutzrecht DE 103 27 059 B4 / EP 1 489 157 B1: Verfahren zum Konvertieren von fett- oder ölhaltigen Roh- und Abfallstoffen in Gemische mit hohem Kohlenwasserstoffanteil, mit diesem Verfahren hergestellte Produkte und deren Verwendung.

Heil, V. et al (2005): Schutzrecht DE 10 2005 023 601 B4 7 EP 1 724 325 A1: Verfahren zur kontinuierlichen oder teilkontinuierlichen Konvertierung von fett- oder ölhaltigen Roh- und Abfallstoffen in Gemische mit hohem Kohlenwasserstoffanteil, mit diesem Verfahren hergestellte Produkte und deren Verwendung.

Heil, Volker et al. (Heil 2012a): SNG und LPG aus biogenen Reststoffen – technische Machbarkeit und Verwertungspotenzial. Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Mai 2012. Abschlussbericht des gleichnamigen Vorhabens, Förderkennzeichen 03KB028, Kurztitel „SNG und LPG“, für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

URL: <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-2052263.pdf> (Stand: 01.12.2012)

Heil, Volker et al. (Heil 2012b): Screening von biogenen Abfallsbstanzten zur Umwandlung in Benzin- und Dieselmkraftstoffe durch katalytisches Cracken. Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Juni 2012. Abschlussbericht des gleichnamigen Vorhabens, Förderkennzeichen 03KB007, Kurztitel „Cracken“, für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. URL: <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-2083342.pdf> (Stand: 01.12.2012).

Joyner, L. G.; Barrett, E. P.; Halenda, P. P. (1951): The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. In: Journal of the American Chemical Society, 1, 73, S. 378-380.

von Kienle, H.; Bäder, E. (1980): Aktivkohle und ihre industrielle Anwendung. Enke, Stuttgart - ISBN 3 432 90881 4.

Norm DIN 66131, 1993. Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmett und Teller (BET). Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

Norm DIN 66134, 1998. Bestimmung der Porengrößenverteilung und der spezifischen Oberfläche mesoporöser Feststoffe durch Stickstoffsorption - Verfahren nach Barrett, Joyner und Halenda (BJH) . Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.

Oppenheim, R. (1932): Schutzrecht US 1960951: Method of converting by catalysis mineral and vegetable oils.

Prasad, Y. S.; Bakhshi, N. N.; Mathews, J. F.; Eager, R. L. (1986): Catalytic conversion of canola oil to fuels and chemical feedstocks. I: Effect of process conditions on the performance of HZSM-5 catalyst. In: Canadian journal of chemical engineering, Nr. 64, S. 278-284.

Sadrameli, S. M.; Green, A. E. S.; Seames, W. (2009): Modeling representations of canola oil catalytic cracking for the production of renewable aromatic hydrocarbons. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Nr. 86, S. 1-7.

Schutzrecht DE 10 2008 049 778 A1 / EP 2 342 306 A1 (2008): Verfahren zur Gewinnung von gasförmigen Kohlenwasserstoffen aus biogenen Rohstoffen.

Taufiqurrahmi, N.; Mohamed, Abdul, Bhatia, S. (2010): Production of biofuel from waste cooking palm oil using nanocrystalline zeolite. In: Chemical Engineering Journal, 163, S. 413-421.

Landesweite Biomasseberechnung von Gehölzen auf OpenSource-Basis

Alfons Krismann*, Holger Bischooping¹, Matthias Rentsch²

* Universität Hohenheim, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie

¹ Bischooping Geoinformation Consulting München

² Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Fakultät für Geoinformation

Adresse: Universität Hohenheim

August-von-Hartmann Str. 3, 70593 Stuttgart

* E-Mail: a_krismann@uni-hohenheim.de

Abstract

Zum Biomassepotenzial von Landschaftspflegeholz existieren bislang nur Schätzungen und Hochrechnungen. Diese gehen z.T. von einem der größten ungenutzten technischen Potenziale aus (Nachhaltigkeitsrat Bad.-Württ. 2008; Fritsche et al. 2004). Flugzeuggestützte Laserscanning-3D-Daten, die bis 2014 mit Ausnahme von großen Teilen Niedersachsens deutschlandweit vorliegen werden, ermöglichen nicht nur die Berechnung von Gelände- und Oberflächenmodellen sondern auch die Extraktion von Gehölzen als 2D- und 3D-Objekte. Dieser Datensatz wurde benutzt um automatisiert und massendatentauglich eine GIS-Gehölzdatenbank aufzubauen, die mittels spezieller Algorithmen Einzelbäume, Gehölzgruppen und Gehölztypen sowie deren Grünvolumen bestimmt. Mittels Feldeichungen und Eichungen anhand höheraufgelöster Laserscan-Daten wurden je Gehölztyp Biomassekonversionsfaktoren bestimmt, die eine Umrechnung in Biomasseeinheiten (z.B. Schüttraummeter Hackschnitzel) erlaubt.

Die immensen Datenmengen (10 bis 50 Mrd. Punkte je Bundesland) stellen eine besondere Herausforderung an die Entwicklung von Algorithmen aber auch an die Verarbeitungs-umgebung. Gängige COTS-Systeme (Commercial off-the-shelf) aus den Bereichen Geoinformatik und Bildanalyse können diese Anforderungen nur unzureichend erfüllen. Im Rahmen des Projektes "Biomasse per Laserscan" (FKZ: 03KB037), gefördert durch das Forschungsprogramm "Energetische Biomassennutzung" des BMU, wurde ein im Rahmen eines Softwareentwicklungsprojektes ein System entwickelt, das diesen Anforderungen gerecht wird. Schwerpunkt war die Realisierung und Optimierung der notwendigen, komplexen Algorithmen wie Segmentierung, Triangulation, vektorielle Skelettierung und die regelbasierte Gruppierung von Einzelobjekten. Weiterhin wurde eine flexible Workflowumgebung entwickelt, die verschiedene Konzepte aus dem Grid- und Clustercomputing auf die Erfordernisse der vorliegenden Datenstrukturen und Datenverarbeitung anwendet. Die Algorithmen wurden in dieses Workflowsystem integriert. Bei dem Projekt kamen Methoden des professionellen Softwareengineerings, des Konfigurations- und Release-Management, sowie der Dokumentation zum Einsatz.

Schlagwörter: Biomasseberechnung, Landschaftspflegeholz, Wald, Laserscanning, Gehölztypen, Datenbank

Einleitung

Auf Basis von OpenSource-Bibliotheken wurde mittels der Programmiersprache Python die eigenständige Software „Biomass“ erstellt, die mittels neuer regelbasierter und geometrischer Algorithmen aus 3D-Punktclouds (Laserscanning) vollautomatisiert parametrisierte Einzelgehölze und Gehölzgruppen für beliebig große Gebiete abgrenzen und prozessieren kann. In einem zweiten Prozessschritt werden mittels eines ESRI ArcGIS-Modells Gehölztypen klassifiziert und folgend deren Biomasseinhalte (Schüttraummeter Hackschnittel oder andere Biomasseeinheit) berechnet.

„Biomass“ wurde für Windows 7 (64 bit-Betriebssysteme) realisiert und läuft komplett parallelisiert (Nutzung beliebig vieler Rechenkerne). In die Bedienoberfläche ist ein GIS-Viewer integriert, mit dem in Echtzeit (auch über einen Webserver) der Fortschritt der Prozessierung visuell verfolgt werden kann. Die Software läuft sehr robust und unterstützt eine detaillierte Diagnose (beispielsweise wenn Eingangsdaten korrupt sind). Mittels „Application checkpointing“, einem Konzept aus dem Bereich der Verteilten Anwendungen, wird der aktuelle, technische Prozessstatus permanent mitgeführt. Somit kann vermieden werden, dass im Falle von Rechner- oder Stromausfällen Zwischenergebnisse verloren gehen. Die Prozessierung wird automatisch an der Abbruchstelle wieder aufgenommen.

Die Gehölztypisierung und Biomassevisualisierung erfolgt in der weit verbreiteten Anwendersoftware ESRI ArcGIS 10.1 mittels eines vorgefertigten Modells und Arcobjects (Menüfenster: „Addins“). Innerhalb von „Biomass“ und den ArcGIS-Modellen wurden insgesamt fünf neue (geometrische und regelbasierte) Algorithmen implementiert.

Methoden und Ergebnisse

Der entwickelte Workflow zur „Einzelgehölz und Gehölzgruppenbestimmung“ besteht im Wesentlichen aus den folgenden Arbeitsschritten, wobei einzelne Arbeitsschritte aufgrund der Anforderungen der Parallelisierung in mehrere Unterschritte zerlegt sind (vgl. Abbildung 1):

1. Datenkatalogisierung als Vorbereitung für den Import
2. Import der Eingangsdaten basierend auf dem Datenkatalog
3. Generieren der Prozesskacheln
4. Segmentierung (einschließlich Interpolation)
5. Gruppierung (Gehölzgruppenbildung)
6. Vektorielle Skelettierung
7. Berechnen der Einzelobjekt- sowie der Gruppenmerkmale (Attribute)

Dieser Workflow ist in die Bedienoberfläche der Software „Biomass“ integriert und kann bei Bedarf erweitert werden. „Biomass“ kann mit allen gängigen Laserscan-Datenformaten arbeiten (Größen- und Projektionsunabhängig). Die Daten werden im Rahmen des ersten Verarbeitungsschritts in das interne 3D-Format der Datenbank transformiert. Die Daten müssen in der üblichen Trennung von First-Pulse- (Reflexion an Gebäude- oder Gehölzoberflächen) und Last-Pulsedaten (Bodenreflexion) vorliegen. Weiterhin sollten diese Daten bereits in Hoch- und Bodenpunkte klassifiziert sein. Diese Klassifikation liegt für die First-Pulsedaten nicht in allen Bundesländern vor bzw. nicht in gleichartiger Form, kann aber mittels der OpenSource-Software LAStools (Martin Isenburg 2012: <http://lastools.org>) nachprozessiert werden.



Abbildung 2: Freie Parametrisierung der Software „Biomass“ (Programmoberfläche mit Menüreitem).

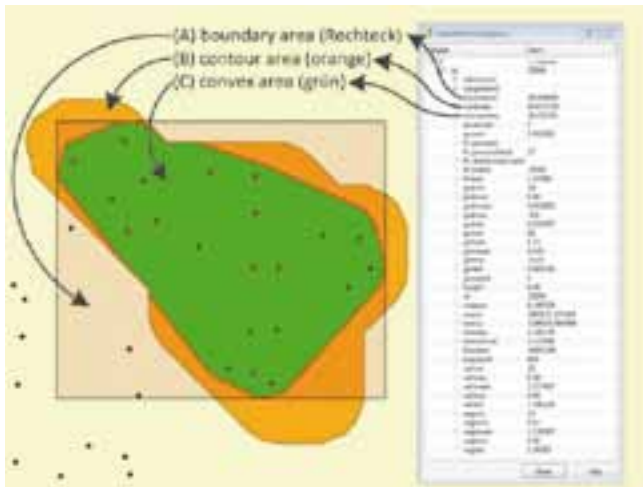


Abbildung 3: Darstellung zur Vorgehensweise des iterativen Wachstumsalgorithmus zur globalen Gruppierung.

Bei der Implementierung der Algorithmen kamen die freien Bibliotheken PySide, OpenCV, GDAL/OGR, SciPy, Numpy, psycomp2, psyutil und blist zum Einsatz. Als Visualisierung wurde die OpenSource-GIS-Software QuantumGIS zusammen mit einem Apache-Webserver integriert.

Durch die Parallelisierung der einzelnen Arbeits- bzw. Prozessschritte kann die Rechenleistung heutiger, vielkerniger Computer zu 100 % ausgenutzt werden. Der programmtechnische Aufwand, um diese Parallelisierung zu erreichen, war erheblich, v.a. bei der Gehölzgruppengruppierung (iterativer Wachstumsalgorithmus). Die wichtigsten Algorithmen des Workflows (vgl. Abbildung 1) werden im Folgenden erläutert:

- Ausgangspunkt der **Segmentierung** sind die in die Datenbank übertragenen 3D-Laserscanning-Daten. Nach einer Interpolation von Gelände- und Oberflächenmodell erfolgt zunächst die Berechnung des normalisierten Geländemodells. Anschließend werden mittels mathematischer Morphologie und einer iterativen Höhengleichung des Oberflächenmodells die Saatpunkte (seedpoints) für die **Watershed-Transformation** bestimmt (Beucher 1992). Diese Vorgehensweise berücksichtigt im Besonderen die Eigenschaften des Objektmodells „Baum“ (Modellierung der abstrakten Merkmale "kompakte und runde Baumkrone", sowie "höchster Punkt etwa in der Mitte der Baumkrone"). Ergebnis der Watershed-Transformation sind die Objektkonturen von Bäumen (Einzelobjekte). Basierend auf den Konturen wird anschließend das Oberflächenmodell verlassen und mit den ursprünglichen 3D-Punktwolken weitergerechnet. Aus den 3D-Punktwolken werden je Kontur die exakten konvexen Objekthüllen bestimmt. Für freistehende Einzelgehölze bilden diese konvexen Hüllen gut die Kronendeckung ab. Die Abbildung 3 veranschaulicht die verschiedenen Objektflächen, mit denen im Anschluss weiter gerechnet wird.



Abbildung 4: Abtrennung eines (Gehölz-)Seitenzweiges aufgrund eines vorgegebenen Längen-Breiten-Verhältnisses (unten rechts: Detailausschnitt).

- Die **Gruppierung von Einzelobjekten zu Gehölzgruppen** basiert auf einem Buffering sowie einer gewichteten, prozentualen Objektüberschneidung (siehe Abbildung 8 & 9). Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Vermeidung von Objektzerschnidungen an Kachelgrenzen gelegt. Weiterhin wurde ein dynamischer Verriegelungsmechanismus (iterativer Wachstumsalgorithmus) auf der Basis der Prozesskacheln entwickelt, der es ermöglicht, dass mehrere Gruppierungsprozesse parallel laufen können. Die Gehölzgruppenumrisse bilden gut die Kronendeckung von komplexen Gehölzen ab.

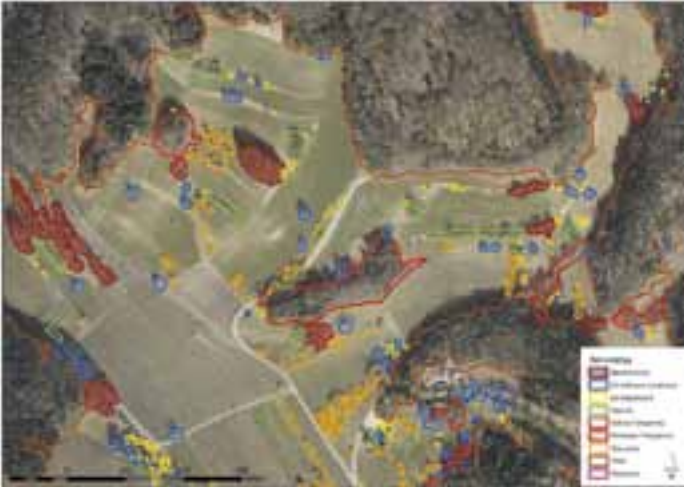


Abbildung 5: Beispiel für die Gehölzklassifikation (Quelle Ortholuftbild: Stadt Radolfzell 2010).

- Ziel der **Skelettierung** ist die Bestimmung der Mittellinie (Hauptachse) eines Polygons (hier Gehölzgruppe) sowie der Seitenzweige. Aus diesen Daten können folgende Informationen abgeleitet werden: Länge und Breite eines Polygons, Abtrennbarkeit von Seitenzweigen, die bestimmten Kriterien (Flächen, Verhältnis Länge/Breite) genügen (vgl. Abbildung 4). Die vektorielle Skelettierung basiert auf einer zuvor berechnete Triangulation des jeweiligen Polygons. Dabei wurde eine eigens modifizierte Variante des von David Eberly beschriebenen „Triangulation by Ear Clipping“ (Eberly 2008) implementiert. Bei diesem Algorithmus musste besonderes Augenmerk auf die Performance sowie auf die Robustheit und Reproduzierbarkeit des Ergebnisses gelegt werden. Bei der eigentlichen vektoriiellen Skelettierung wurde eine Arbeit von Tao Wang zugrunde gelegt (Wang 2009). Jedoch wurde der dort beschriebene Algorithmus sicherlich noch nicht auf vergleichbar umfangreiche und komplexe Polygone angewendet, so dass im Rahmen der Entwicklung eine Anpassung des beschriebenen Algorithmus erforderlich war.

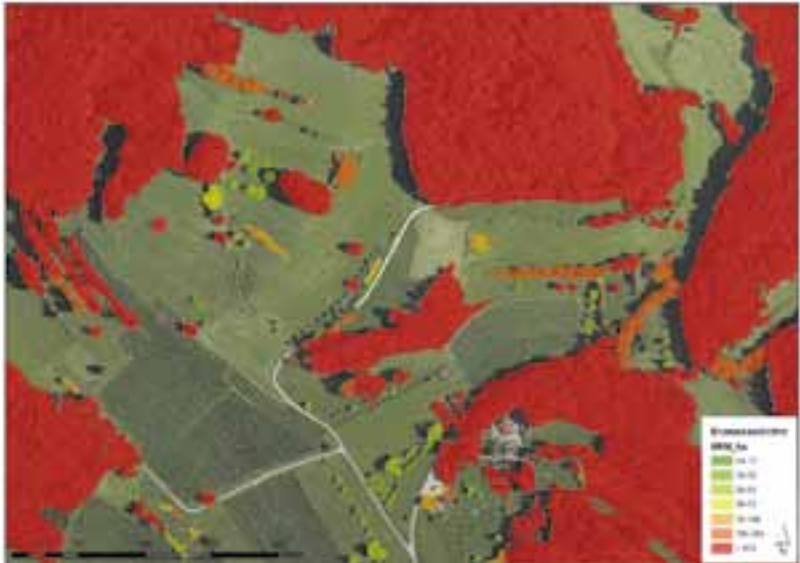


Abbildung 6: Beispiel für die Berechnung der Biomassedichten von Landschaftspflegeholz, Quelle Ortholuftbild: Stadt Radolfzell 2010.

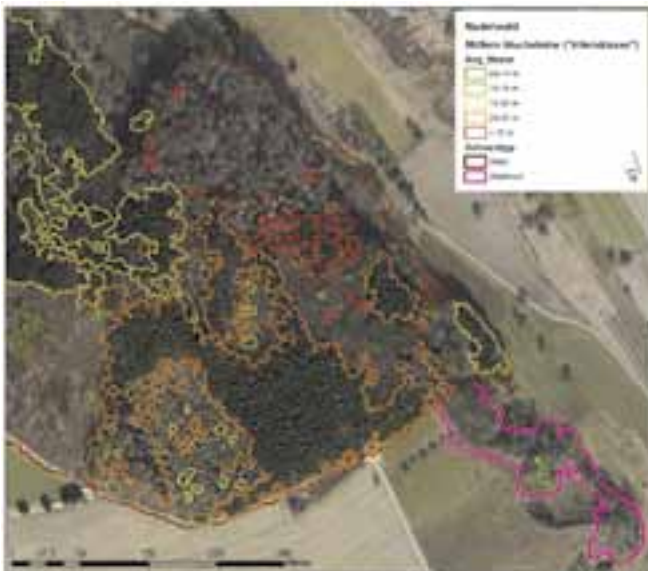


Abbildung 7: Beispiel für die Abgrenzung von Nadelbaumbeständen nach "Alters-" bzw. Größenklassen, Quelle Ortholuftbild: Stadt Radolfzell 2010.



Abbildung 8 & 9: Baumhecken mit Darstellung der berechneten Baumstandorte, Baumhöhen, konvexen Hüllen und Baumgruppen. Oben: Sommerluftbild ein halbes Jahr vor einer im Rahmen dieses Projektes zu Eichzwecken durchgeführten Gehölzernte. Unten: Winterluftbild zwei Wochen nach der Beerntung (Abschnitte a, b, c; oben rechts ist noch ein Holz-Rückehaufen zu erkennen).

Die Biomassekonversionsfaktoren der einzelnen Gehölztypen zur Umrechnung von Grünvolumen zu Schüttraummeter wurden teilweise bereits veröffentlicht (Rentsch et al. 2011). Zur Streuobstklassifikation wird im Kern ein neuartiger "Pflanzgitter-Algorithmus" (Krismann & Hasler unveröff.) verwendet, der hier optional verwendet werden kann (ArcPython-Skript). Die Abbildungen 5 bis 7 zeigen Beispiele für die Gehölztypisierung, Biomassedichteberechnung und als Spezialanwendung die Klassifikation von Nadelbaumbeständen nach Altersklassen.

Ausblick

Die Software "Biomass" und die ArcGIS-Models wurden im Rahmen der Praxispartner erfolgreich in Baden-Württemberg und zurzeit in NRW (Bioenergieregion Rhein-Erft-Kreis) angewandt. Die Berechnungszeiten für 1.000 km² liegen mit einer aktuellen Workstation bei fünf Tagen bzw. mit Streuobstklassifikation bei 12 Tagen. Eine Umstellung auf Python 2.7 ist in Arbeit. Später soll die Performance durch Übergang zu reiner 64 bit-Software nochmals optimiert werden.

Literaturverzeichnis

Beucher, S. (1992): The Watershed Transformation applied to image segmentation. Scanning Microsc Suppl 6, S. 299-314.

Eberly, D. (2008): Triangulation by Ear Clipping: URL: www.geometrictools.com/Documentation/TriangulationByEarClipping.pdf (Stand: 12.12.2012)

Fritsche, U.R. et al. (2004): Bioenergie Nachwuchs für Deutschland. Öko-Institut (BMU).

Nachhaltigkeitsbeirat BaWü (2008): Energie aus Biomasse: Potenziale und Empfehlungen für BaWü. Gutachten des Nachhaltigkeitsbeirats der Landesregierung Baden-Württemberg, Stuttgart.

Rentsch, M.; Krismann, A.; Krzystek, P. (2011): Extraction of non-forest trees for biomass assessment based on airborne and terrestrial LiDAR data. In: U. Stilla et al. (Hrsg.): PIA 2011, LNCS 6952, Springer, S. 121-132.

Wang, T. (2009): Extraction of optimal skeleton of polygon based on hierarchical analysis. In J. Zhang et al. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, 28-7/C4, S. 272-276.

Ein neuartiges System für die Entschwefelung von Biogas

Burghardt Klöden¹, Gunnar Walther¹, Marc Lincke², Eberhard Friedrich², René Poss³,
Andreas Tillmann³, Stefan Gläser⁴

¹ Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, E-Mail: burghardt.kloeden@ifam-dd.fraunhofer.de, gunnar.walther@ifam-dd.fraunhofer.de

² Fraunhofer Institut Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Winterbergstr. 28, 01277 Dresden, E-Mail: marc.lincke@ikts.fraunhofer.de, eberhard.friedrich@ikts.fraunhofer.de

³ Alantum Europe GmbH, Lyonel-Feiningger-Str. 28, 80807 München, E-Mail: rposs@alantum.com, atillmann@alantum.com

⁴ Lehmann Maschinenbau GmbH, Jocketa-Bahnhofstr. 34, 08543 Pöhl, E-Mail: s.glaeser@lehmann-maschinenbau.de

Abstract

Zur Erzeugung von Biogas in Erdgasqualität ist der Prozessschritt der Entschwefelung, insbesondere der Feinent Schwefelung, von zentraler Bedeutung. Der H₂S-Gehalt von Bio-Erdgas darf nicht höher als 5 mg/m³ sein. Alle derzeit für die Feinent Schwefelung eingesetzten Verfahren sind durch einen hohen Chemikalienverbrauch und Entsorgungskosten gekennzeichnet. Vor diesem Hintergrund ist es, aufbauend auf der Funktionsfähigkeit dieses Reinigungssystems, das innovative Ziel des Projektes, durch mit diesem System mögliche neue Maßnahmen zur Verringerung dieser beiden genannten Kostenpunkte die Energieeffizienz der Biogasentschwefelung im Vergleich zu derzeit existierenden Entschwefelungsverfahren signifikant zu verbessern.

Es wurde begonnen ein Entschwefelungssystem, das aus einem metallischen Schaum als Trägermaterial und Eisen(III)-oxid (Fe₂O₃) als Sorbens besteht, zu evaluieren. Zur Herstellung des metallischen Schaums existiert bereits eine für die Massenproduktion geeignete Technologie. Deshalb konzentrierten sich die Entwicklungsarbeiten auf Aspekte der Machbarkeit in Bezug auf die Herstellung des Entschwefelungssystems und auf bestimmte Prozessschritte. Zuerst wurden verschiedene Technologien evaluiert, mit denen die Sorbens auf den Träger aufgebracht werden kann. Dabei erwies sich das Verfahren des Nasspulversprühens als am besten geeignet. Es konnten reproduzierbar die erwarteten Zielbelastungen erreicht werden. Weiterhin wurde systematisch untersucht, wie sich der anfallende elementare Schwefel entfernen lässt, so dass das Entschwefelungssystem über mehrere Zyklen betrieben werden kann. Dafür wurden zwei Versuchsreihen (Metall/Sorbens + Schwefel, Metallschaum + Schwefel) durchgeführt, bei denen eine thermische Entfernung evaluiert wurde. Dabei erweist sich der Temperaturbereich 200-300°C als prinzipiell geeignet. Erste Versuchsreihen zur Entschwefelung wurden im Labormaßstab durchgeführt. Dabei wurde die prinzipielle Machbarkeit der Prozessschritte Entschwefelung und Regenerierung nachgewiesen.

Schlagwörter: Feinentschwefelung, Bio-Erdgas, metallischer Schaum, Eisen(III)-oxid

Einleitung

Mit der am 12.03.2008 durch das Bundeskabinett verabschiedeten Verordnung zur Förderung der Biogaseinspeisung [GasnetzzugangsV] in das bestehende Erdgasnetz wurde eine wichtige Weichenstellung für eine vorrangige und kostengünstige Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz geschaffen. Bei der Einspeisung von Biogas ist sicherzustellen, dass das Gas am Einspeisepunkt und während der Einspeisung den Voraussetzungen der Arbeitsblätter G 260 und G 262 der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfachs e.V. entspricht, das heißt, das Biogas ist auf Erdgasqualität aufzubereiten. Ein wesentlicher Verfahrensschritt dabei ist die Entschwefelung des Biogases. Dabei wird der im Biogas befindliche Schwefelwasserstoff (H_2S) entfernt. Dieser Reinigungsschritt ist für die Biogasqualität von zentraler Bedeutung, da durch H_2S verursachte Korrosionsschädigungen, z.B. in Rohrleitungen, während der Einspeisung vermieden werden müssen. Der H_2S -Gehalt von Bio-Erdgas darf nicht höher als 5 mg/m^3 sein. Um diesen geringen Wert einzuhalten, muss zuerst eine Grob- und nachgeschaltet eine Feinentschwefelung vorgenommen werden. Speziell für letzteren Prozessschritt ist ein Reinigungsverfahren, das mit einem wirtschaftlich betreibbaren Reinigungssystem die Grenzwerte zuverlässig über die Betriebsdauer garantiert, unabdinglich.

Im Rahmen eines Verbundprojektes wird ein neuartiges Reinigungssystem bestehend aus einem metallischen Schaum als Trägermaterial und einer speziell zur Entschwefelung geeigneten Sorbens (Fe_2O_3) entwickelt. Ziel des Projektes ist der Nachweis der Eignung dieses Systems für die Feinentschwefelung, d.h. die Einhaltung des H_2S -Grenzwertes von 5 mg/m^3 sowie die Überprüfung der Regenerierbarkeit der Reinigungsmasse. Alle derzeit für die Feinentschwefelung eingesetzten Verfahren sind durch einen hohen Chemikalienverbrauch und Entsorgungskosten gekennzeichnet. Vor diesem Hintergrund ist es, aufbauend auf der Funktionsfähigkeit dieses Reinigungssystems, das innovative Ziel des Projektes, durch mit diesem System mögliche neue Maßnahmen zur Verringerung dieser beiden genannten Kostenpunkte die Energieeffizienz der Biogasentschwefelung im Vergleich zu derzeit existierenden Entschwefelungsverfahren signifikant zu verbessern.

Stand der Technik zu Projektbeginn

Biogasentschwefelung

Die für das Projekt gewählte Route der Feinentschwefelung mit Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) zählt zu den chemischen Verfahren. Die ablaufenden Reaktionsschritte sind wie folgt (Ramesohl et al. 2005):



d.h., in Reaktion (1) wird Schwefelwasserstoff unter der Bildung von Eisen(III)-sulfid entfernt, welches nachfolgend in Reaktion (2) unter Luftzufuhr wieder in Eisen(III)-oxid umgewandelt wird (dabei verbleibt elementarer Schwefel auf der Oberfläche). Dieses Funktionsprinzip der Biogasentschwefelung wird zum Beispiel auf Basis von mit Eisen(III)-oxid imprägnierten Holzschnitzeln bzw. -pellets eingesetzt. In Abhängigkeit der Eingangskonzentration an H_2S schwankt der Restgehalt an Schwefelwasserstoff zwischen 1,5 und 150 mg/m^3 . Nachteilig sind bei diesen Verfahren die hohen Chemikalienverbräuche sowie die hohen Entsorgungskosten. Speziell im Fall der Pellets kommen als weitere Limitierungen die sehr begrenzten Möglichkeiten zur Regenerierung sowie die bei der Regenerierung (siehe Reaktionsgleichung [2]) infolge der exothermen Reaktionsabläufe bestehende Brandgefahr hinzu.

Herstellung metallischer Schaum

Der für das Forschungsvorhaben ausgewählte Metallschaum zählt zu den offenporigen porösen Strukturen (eine Übersicht zu Metallschäumen ist in (Levebvre et al. 2008) zu finden). Zuerst wird ein reiner Ni-Schaum über eine PVD- und nachfolgende galvanische Beschichtung eines organischen Substrates hergestellt (Paserin et al. 2005). Im zweiten Schritt wird der Ni-Schaum über eine am Fraunhofer IFAM Dresden zusammen mit der Alantum Europe GmbH entwickelten Technologie in einen Ni-Basis-Schaum überführt (Walther et al. 2008). In Abbildung 1 sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Schaumoberfläche eines Ni-Schaums und eines Ni-Basis-Schaums zu sehen. Es fällt auf, dass die Oberfläche des Legierungsschaums deutlich vergrößert ist. Das ist beispielsweise für das Anhaften von funktionellen Schichten, für die der Schaum als Trägermaterial dient, von Vorteil.

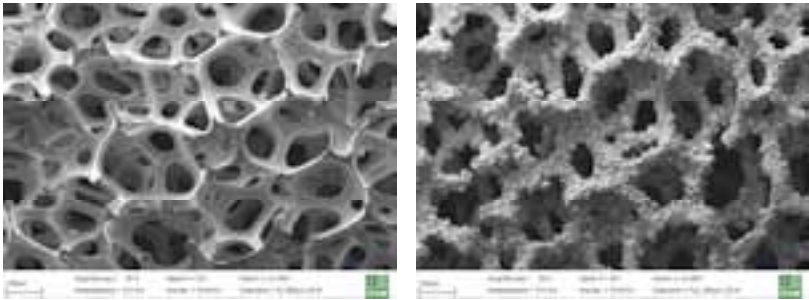


Abbildung 1: Oberflächenbilder (REM) eines reinen Ni-Schaums (links) und eines Legierungsschaums (rechts).

Entschwefelungssystem

Herstellung

Das Entschwefelungssystem besteht aus dem Träger (metallischer Schaum) und der Sorbens (Fe_2O_3). Letztere muss über ein Beschichtungsverfahren auf den Träger aufgebracht werden. Nachfolgend ist eine Wärmebehandlung notwendig, um zum einen organische Bestandteile zu entfernen und andererseits ein Anhaften der Sorbens zu befördern.

Für die Beschichtung kommen verschiedene Verfahren infrage:

Tauchbeschichtung [TB] (Träger wird in Suspension eingetaucht, die die Sorbens enthält)

Nasspulversprühen [NPS] (Suspension mit Sorbens wird auf Schaum mit Sprühpistole verteilt)

Pulveraufstreuung [PA] (analog zur Technologie der Herstellung des Legierungsschaums)

Als Sorbens kam ein Fe_2O_3 -Pulver mit einer Körnung 1-5 μm zum Einsatz. Für die Verfahren TB und NPS wurde eine Suspension, bestehend aus dem Pulver, Binder (PVP) und Wasser angesetzt.

Es wurde mit dem Verfahren PA begonnen, da hier die meisten Vorkenntnisse existierten. Allerdings war es nicht möglich, eine gute Beschichtungsqualität zu erhalten. Der Grund hierfür ist die Feinkörnigkeit der Sorbens, welche zur Partikelagglomeration und damit zu einem Verstopfen der Poren führt. Dieses Verfahren wurde nicht weiter verfolgt.

Mit dem Verfahren TB lässt sich die Sorbens auf den Träger aufbringen. Es kommt jedoch zum teilweisen Zusetzen der Poren (Abbildung 2a), was nachteilig für die Anwendung ist. Durch Ausblasen mittels Druckluft zwischen den Beschichtungsgängen werden die Poren wieder durchlässig. Es erwies sich allerdings als schwierig, die Beladungskapazität der Sorbens, welche für die Reinigungseffizienz eine Rolle spielen kann, gezielt einzustellen. Aus diesem Grund wurde das Verfahren für die weitere Beschichtung nicht weiter verfolgt.

Die besten Beschichtungsergebnisse wurden mit dem Verfahren NPS erzielt (Abbildung 2b). Auch hier sind die Poren nach der Beschichtung zwar teilweise blockiert und müssen mittels Druckluft wieder durchlässig gemacht werden. Es lässt sich aber sehr gezielt die

Beladungskapazität einstellen. Dies erwies sich insofern als wichtig, als z.B. die maximal möglichen Beladungen mit Sorbens von der Porengröße des Schaums abhängen. Damit sind auch die optimalen Beladungen, die zur besten Kombination aus Gasdurchlässigkeit und Reinigungseffizienz führen, porengrößenabhängig. Für die weiteren Beschichtungen (Laboranlage und Demonstrator) wird das Nasspulversprühen gewählt.

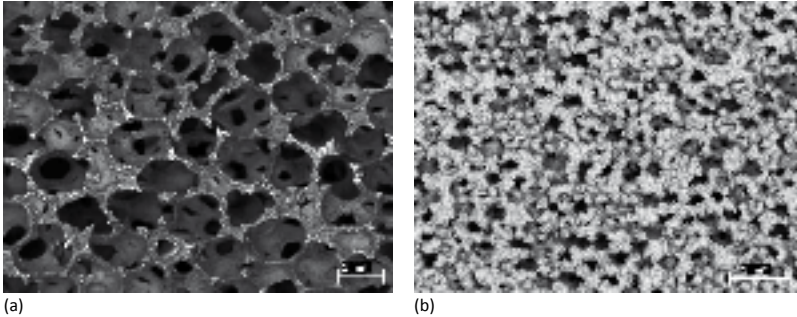


Abbildung 2: Oberflächenbilder beschichteter metallischer Schäume: (a) Tauchbeschichtung, (b) Nasspulversprühen.

Entfernung des elementaren Schwefels

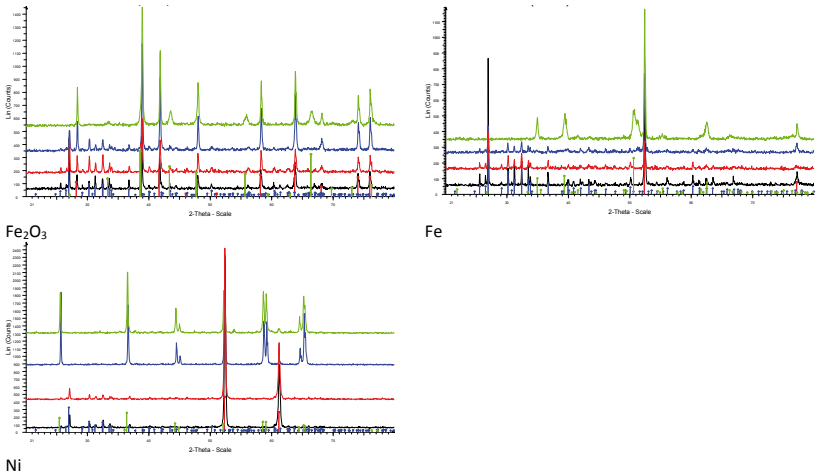
Durch den bei der Regenerierung auf der Schaumoberfläche verbleibenden elementaren Schwefel (siehe Gleichung [2]) wird die aktive Oberfläche verringert. Oberhalb einer kritischen Schwefelbeladung ist die geforderte Reinheit nicht mehr gewährleistet und das Filterelement muss getauscht werden. Bisherige Technologien (Aktivkohle, Zinkoxid und Holzpellets) sehen in diesem Fall nur eine Deponierung vor. Dieser Nachteil soll durch eine Technologie gelöst werden, durch die der Schwefel von der Schaumoberfläche thermisch entfernt wird, ohne dass es zu einer nachteiligen Beeinflussung des Entschwefelungssystems (insbesondere zu einer Deaktivierung der Sorbens oder einer nachhaltigen Schädigung des Schaums) kommt. Unter der Annahme, dass für die geforderte Reinheit 50 % aktive Oberfläche als Untergrenze notwendig sind und dass nach der ersten Reinigung noch 90 %, nach der zweiten Reinigung noch 80 % usw. ... der aktiven Fläche wieder verwendbar sind, kann das Reinigungssystem theoretisch über fünf Einsatzzyklen verwendet werden. Eine weitere Wertschöpfung ist möglich, sofern der entfernte Schwefel gesammelt und bspw. als Dünger in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt wird.

Da Schwefel bei ca. 115 °C beginnt zu schmelzen und bei ca. 445 °C in die Gasphase übergeht, wurde der zu untersuchende Temperaturbereich auf 100-400°C festgelegt.

Zuerst wurde untersucht, inwiefern metallische Elemente und die Sorbens mit Schwefel in diesem Temperaturbereich reagieren. Als metallische Elemente wurden Nickel und Eisen ausgewählt, da sie aufgrund der derzeit verfügbaren Schaumsubstrate zwei der Hauptelemente in den Metallschäumen sind. Es wurden Pulvermischungen Metall/Sorbens + Schwefel hergestellt, die zu zylindrischen Testkörpern verpresst wurden (Abbildung 3). Danach erfolgte eine thermische Behandlung (100 / 200 / 300 / 400 °C, 1 h, Argon). Im Anschluss wurde eine Phasenanalyse mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt.



Abbildung 3: Zylindrische Testmuster FeO + Schwefel (links), Eisen + Schwefel (rechts).



Ni

Abbildung 4: Ergebnisse Röntgendiffraktometrie für die Reaktionspaare FeO+S (oben), Fe + S (Mitte), Ni + S (unten) (Legende Diffraktogramm: schwarz = 100°C, rot = 200°C, blau = 300°C, grün = 400°C; Legende Peaks: rot = Metall, blau = Schwefel, grün = Metallsulfid).

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Phasenanalyse zusammengefasst. Der Indikator für eine Reaktion ist das Auftreten eines Metallsulfids, dessen Peaks im Vergleich zum reinen Metall bzw. Schwefel an anderen Positionen bzw. Winkeln auftreten. Für alle Reaktionspaare findet bis 200 °C keine Wechselwirkung statt. Für Nickel wird bei 300 °C die Sulfidbildung detektiert. Für Fe und Fe₂O₃ tritt die Sulfidbildung oberhalb von 300 °C auf. Es ist zu betonen, dass es sich bei diesem Test um ein „worst case scenario“ handelt, da zum einen im Betrieb keine so hohen Schwefelbeladungen zu erwarten sind (es wurden bis zu 40 Masseprozent beigemischt) und zum anderen die Verpressung eine extrem hohe Kontaktfläche generiert, während im Betrieb der Schwefel nur punktuell auf der Oberfläche haftet. Nichtsdestotrotz wurde für den weiteren Testbetrieb von einer maximal erlaubten Temperatur von 200-300 °C ausgegangen.

In einer zweiten Testserie wurden verschiedene Legierungsschäume mit Schwefel beladen. Auch hier wurde eine Beladung gewählt, die im Betrieb nicht zu erwarten ist (d.h. bis zu 60 Masseprozent Schwefel wurden auf den jeweiligen Schäumen abgeschieden). Ein Vergleich zwischen unbeladenen und mit Schwefel beladenen Schaumproben ist in Abbildung 5 zu sehen. Es wurden thermische Behandlungen bei 200 °C und 300 °C durchgeführt. Um die Effizienz der Schwefelentfernung zu bestimmen, wurde die Masse vor und nach der Wärmebehandlung gemessen. Weiterhin wurde mittels REM untersucht, ob eine Reaktion zwischen Schaum und Schwefel stattgefunden hat.



Abbildung 5: Mit Schwefel beladene Schaumproben (oben), unbeladener Legierungsschaum (unten).

Bei der Massebestimmung wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

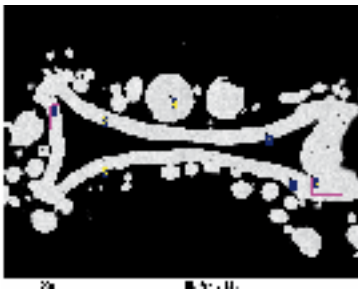
Bei $T = 200^{\circ}\text{C}$ findet bereits eine Entfernung von Schwefel statt, diese erfolgt aber nur unvollständig (ca. 15 - 20% des Schwefels werden entfernt).

Bei $T = 300^{\circ}\text{C}$ findet eine überwiegende bzw. vollständige Entfernung des Schwefels statt.



	B	Al	Si	S	Cr	Fe	Ni	Mo
1			2.61		21.41	5.51	31.66	38.81
2		0.44	1.64		25.72	5.33	57.92	8.95
3	32.83		0.34	66.27			0.56	
4		0.38	1.41	3.51	27.35	5.51	61.84	
5		0.40	1.81		25.53	5.09	58.10	9.07
6			3.36		22.94	6.67	47.29	19.75
7				100.00				

Abbildung 6: Mit Schwefel beladener Ni-Basis-Schaum (IN625) nach Wärmebehandlung bei 300°C (die Entfernrungsrate beträgt ca. 75%), Punkte 1, 2, 4, 5, 6 = Schaumsteg; Punkte 3, 7 = Schwefel.



	Al	Si	Cr	Fe	Ni
1	6.12	0.48	21.19	72.21	
2	6.02	0.46	20.46	73.06	
3	6.30	0.47	20.02	73.22	
4	5.77	0.89	20.74	72.59	
5	5.98	0.42	20.61	72.08	0.91
6	6.13	0.62	21.26	70.87	1.12
7	6.00	0.40	20.33	73.27	

Abbildung 7: Mit Schwefel beladener Fe-Basis-Schaum (FeCrAl) nach Wärmebehandlung bei 300°C (die Entfernrungsrate beträgt > 95%).

In Abbildung 6 (Ni-Basis) und Abbildung 7 (Fe-Basis) sind REM-Bilder schwefelbeladener Schäume nach der Wärmebehandlung ($T = 300^{\circ}\text{C}$) sowie die gemessenen Zusammensetzungen an verschiedenen Punkten im Schaum & Umgebung zusammengefasst. Es wurde

lediglich an einem Messpunkt (Punkt 4 in Abbildung 6) Schwefel nachgewiesen; eine Reaktion zwischen metallischen Elementen des Schaums und Schwefel wird bis zu dieser Temperatur als unwahrscheinlich eingestuft. Speziell für die Ni-Basis-Schäume ist dies ein gutes Ergebnis, da der „worst case“ Test mit dem Reaktionspaar Nickel-Schwefel nicht bestätigt wird. Die Unterschiede im Grad der Schwefelentfernung liegen unter Umständen in der Morphologie des Schaums begründet: beim Ni-Basis-Schaum ist im Wesentlichen der Schwefel, der sich im Inneren der Schaumstege angesammelt hat, nicht entfernt worden. Im eigentlichen Betrieb wird von keiner so hohen Beladung insbesondere an der Innenseite der Schaumstege ausgegangen. Weitere zukünftige Versuche speziell im Temperaturbereich 200-300 °C unter Variation der Parameter Atmosphäre und Prozesszeit können der Optimierung des Verfahrens dienen.

Entschwefelungstests im Labormaßstab

Am Fraunhofer IKTS wurden zur Bewertung der Reinigungsleistung und der Regenerationsfähigkeit mit Luftsauerstoff sowie zur Ermittlung der optimalen Verfahrensparameter für eine spätere Maßstabsübertragung umfangreiche Versuche zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus synthetischem Biogas im Labormaßstab durchgeführt. Zur Durchführung der Versuche wurde eine Laborversuchsanlage errichtet. Zur Bewertung der unterschiedlichen Chargen an beschichteten Schäumen wurden zur Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse die folgenden Versuchsparameter eingestellt:

- Eingangskonzentration Schwefelwasserstoff: ca. 500 ppm
- Absorberhöhe: 100 mm
- Absorberdurchmesser: 34 mm
- Volumenstrom: 2 L/min

Für diese Versuchsbedingungen wurden jeweils die Durchbruchskurven für die unterschiedlichen Chargen ermittelt. In der folgenden Abbildung ist die Durchbruchskurve einer Charge Absorberschaum dargestellt, die im Nasspulversprühverfahren beschichtet wurde. Zur Minimierung der Randströmungen wurden die Scheiben in Aluminiumfolie ummantelt und in das Modul gepresst. Der Absorber konnte die für den Anwendungsfall Gaseinspeisung erforderliche Reinigungsleistung von $< 5 \text{ mg/m}^3$ für ca. 60 min erbringen (vgl. Abbildung 8a). Unmittelbar nach der Beaufschlagung des Absorbers mit dem synthetischen Biogas kam es zur erforderlichen Reinheit. Die zeitliche Verzögerung im Diagramm ist auf die Trägheit der elektrochemischen Messzelle zurückzuführen.

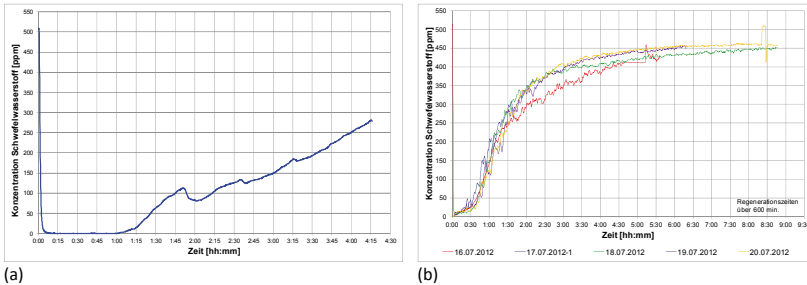


Abbildung 8: Durchbruchkurven Laborversuche.

Weiterhin wurden zur Bewertung der Regenerationsfähigkeit der Absorber Versuche durchgeführt, bei welchen die Schäume mit Druckluft regeneriert wurden. Die Versuche haben gezeigt, dass eine Regeneration ohne Beeinträchtigung der Reinigungsleistung möglich ist. Die in der Abbildung 8b dargestellten Durchbruchkurven wurden mit niedrig beladenen Schäumen ermittelt. Die Regenerationszeit lag bei allen Zyklen über 600 min. Für weitere Versuchsreihen werden Entschwefelungssysteme hergestellt, die über die Variation der Beschichtungsparameter zu Aussagen führen sollen, inwiefern sich die Zeit bis zum Durchbruch verlängern lässt.

Zusammenfassung

Es wurde begonnen ein Entschwefelungssystem, das aus einem metallischen Schaum als Trägermaterial und Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) als Sorbens besteht, zu evaluieren. Zuerst wurden verschiedene Technologien evaluiert, mit denen die Sorbens auf den Träger gebracht werden kann. Dabei erwies sich das Verfahren des Nasspulversprühens als am besten geeignet. Es konnten reproduzierbar die erwarteten Zielbelastungen erreicht werden. Weiterhin wurde systematisch untersucht, wie sich der anfallende elementare Schwefel entfernen lässt, so dass das Entschwefelungssystem über mehrere Zyklen betrieben werden kann. Dabei erweist sich eine thermische Entfernung im Temperaturbereich 200-300 °C als prinzipiell machbar. Erste Versuchsreihen zur Entschwefelung wurden im Labormaßstab durchgeführt. Dabei wurde die prinzipielle Machbarkeit der Prozessschritte Entschwefelung und Regenerierung nachgewiesen.

Literatur

- L.-P. Lelevbre et al.: Adv. Eng. Mater. 10 (2008), S. 775.
- V. Paserin et al.: Proceedings MetFoam (2005), S. 317.
- S. Ramesohl et al.: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse (2005), Bd. 3, S. 46 ff.
- G. Walther et al.: Adv. Eng. Mater. 10 (2008), S. 803.

BioSyn – Biomassevergasungsprozess zur Produktion eines teerfreien Synthesegases

Christian Lintner*, Luisa Burhenne, Lisbeth Rochlitz, Thomas Aicher

Adresse: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

* E-Mail: christian.lintner@ise.fraunhofer.de

Abstract

Ein neuartiges Festbett-Vergasungsverfahren für Biomasse („BioSyn Vergaser“) zur Produktion eines teerfreien Synthesegases wurde entwickelt und am Fraunhofer ISE aufgebaut. Das Verfahren besteht aus vier Zonen und zwar der Vergasung, der Teilverbrennung, dem Cracken und einer Reduktions-/Oxidations- (Redox) Zone. Diese Zonen sind durch bewegliche Roste getrennt um die Verweilzeit der Biomasse in jedem Schritt kontrollieren zu können. Das thermische Cracken aller höheren Kohlenwasserstoffe und Teere wird durch Temperaturen in der Crackzone von bis zu 1000 °C erreicht, welche durch eine Teilverbrennung des Rohgases gewährleistet wird. Zudem wirkt die Kohle in der Crackzone katalytisch. Um den Heizwert des Produktgases und somit die Effizienz des Gesamtprozesses zu erhöhen, wird der gesamte Kohlenstoff oxidiert und CO aus der Reduktionszone mit dem Produktgas vermischt. Das hergestellte Gas wird für eine kombinierte Wärme- und Stromproduktion (CHP) mit einem Gasmotor benutzt.

Zur Demonstration der Umsetzbarkeit des Verfahrens wurde eine Pilotanlage mit 50 kW_{LHV (Biomasse)} konstruiert, in Betrieb genommen und mit Holzpellets getestet. Der Vergaser produzierte ein brennbares Gas mit einem Heizwert von 5,7 MJ/m³ und CO, H₂ und CH₄-Konzentrationen von 26, 15 bzw. 2 %. Im laufenden Betrieb konnte ein Teergehalt unter 30 mg/Nm³ erreicht werden. Die Ergebnisse ließen auf einen bedeutenden Effekt der Temperatur und der Betthöhe in der Crackzone auf die Reduktion der CH₄-Konzentration schließen, was in Verbindung mit der Verminderung des Teergehalts im Produktgas steht. Nachdem die optimalen Vergasungsparameter für einen Betrieb mit Holzpellets bekannt waren, wurden andere Biomasse wie Kohle aus der hydrothermischen Carbonisierung getestet.

Schlagwörter: Biomasse, Kraft-Wärme-Kopplung (CHP), Vergasung, Teer, thermochemische Umwandlung, erneuerbare Energien

Einleitung

Biomassevergasung ist eine der vielversprechendsten erneuerbaren und CO₂-neutralen Technologien zur Produktion von Synthesegas. Für die Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren im kleinen Maßstab hat die Festbettvergasung den Vorteil einer höheren Umsetzungseffizienz mit einem signifikant niedrigeren Teergehalt im Produktgas (Martínez 2011). Das Prinzip der gestuften Vergasung ist gut bekannt und dokumentiert (Lettner 2007, Henriksena 2006). In den meisten Verfahren finden die Pyrolyse- und Holzkohlevergasungsschritte in zwei getrennten Reaktoren statt, was eine unabhängige Kontrolle der Hauptreaktionen ermöglicht. In den letzten Jahren wurden diese Festbettvergaser in Bezug auf eine reduzierte Teerproduktion und eine höhere Effizienz optimiert (Anisa 2011). Allerdings wird selten eine akkurate Messung aller Verfahrensströme durchgeführt und die veröffentlichten Teergehalte hängen stark von dem verwendeten Gasmesssystem ab. Ein standardisiertes und robustes Probe- und Analyseverfahren ist notwendig, um die Produktgasqualität zu untersuchen. In industriellen Verfahren basiert die Kontrolle und Optimierung oft auf dem Know-How des Konstrukteurs, anstatt auf Produktanalysen und dem Verständnis der beteiligten Mechanismen (Van de Steene 2010).

Die Verunreinigung des Produktgases mit Teer ist immer noch eine der größten Herausforderungen für eine erfolgreiche Markteinführung dieser Technologie.

Aus diesem Grund ist eine Verbesserung der Produktgasqualität in Bezug auf die Teerreduktion, -kontrolle und -messung weiterhin notwendig, um den verlässlichen Betrieb aller Biomassevergasungsanlagen zu gewährleisten.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, wurde ein neuartiges Biomassevergasungsverfahren zur Produktion eines teerfreien Synthesegases entwickelt. Das Ziel dieses Verfahrens war es ein mehrstufiges Reaktorsystem zu entwickeln, genannt BioSyn-Vergaser, in dem die einzelnen Umwandlungsstufen, wie Pyrolyse, Vergasung und Teercracking, sowie Reduktion und Oxidation, getrennt sind, um jede einzelne Stufe kontrollieren zu können.

Die Grundidee hinter diesem Forschungsprojekt war einen Vergasungsprozess zu entwickeln, der ohne nachgeschaltete Maßnahmen ein teerfreies Synthesegas liefert. Folglich ist keine kostspielige Gaswäsche nötig, sondern nur ein Heißgasfilter der auch Teil aller konkurrierenden „Standardvergasungstechnologien“ ist. Die Methode der Teerentfernung innerhalb des Prozesses ist eine geschützte Idee, für die das Fraunhofer ISE ein Patent besitzt (DE 10 2004 024672 B4). Ab einer Leistung von 200-300 kW_{LHV(Biomass)} können mit dem BioSyn-Verfahren ökonomisch vielversprechende Anlagen realisiert werden.

Das experimentelle Vorgehen bestand darin zuerst die Realisierbarkeit des Biosyn-Verfahrens in Laborexperimenten zu demonstrieren und später eine Pilotanlage im technischen Maßstab zu konstruieren und zu bauen. In einem letzten Schritt wurde die Anlage für Holzpellets optimiert.

Das BioSyn-Verfahren

Das BioSyn-Verfahren basiert auf dem Wamslers Thermoprozessor, einem mehrstufigen Gleichstrom-Vergaser, getestet im Energieressourcen-Institut e.V. Cottbus. Der größte Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die verschiedenen Umwandlungsstufen, wie Pyrolyse, Vergasung und Teer cracking getrennt voneinander von oben nach unten angeordnet sind. Das BioSyn-Vergasungsverfahren basiert zwar auf diesem Prozess, aber es wurden wichtige Veränderungen vorgenommen, wie die Teilverbrennung und eine zusätzliche Reduktions-/Oxidationsstufe. In Abbildung 1 ist der BioSyn-Vergaser dargestellt und das Verfahren wird im Anschluss erklärt.

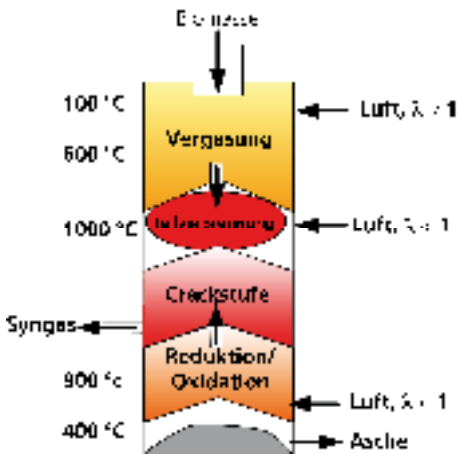


Abbildung 1: Prozessflussbild des BioSyn-Vergasers am Fraunhofer ISE.

In der ersten Zone, der Vergasungszone, erfolgt die Festbettvergasung auf einem beweglichen Rost. In dieser Zone entsteht ein teerhaltiges Rohgas. Dieses strömt abwärts durch ein heißes Bett aus pyrolysiertem Material, an welchem das primäre Cracken stattfindet. Anschließend fließt das Gas in die zweite Zone, wo es teilverbrannt wird. Die Teilverbrennung des Rohgases bewirkt eine Temperaturerhöhung auf etwa 1.000°C. Nach der Temperaturerhöhung passiert das Rohgas die Crackzone, die mit Kohle aus der Vergasungszone gefüllt ist. Die hohen Temperaturen ermöglichen thermisches und katalytisches Cracken von Teeren ohne zusätzlichen Katalysator. Es ist wichtig, dass die Crackzone ausreichend hoch ist, um lange Verweilzeiten zu garantieren und dadurch die komplette Umwandlung der Teere sicherzustellen. Der letzte Schritt ist die Reduktionszone, die von der Crackzone getrennt ist.

In der Reduktionszone werden alle verbliebenen brennbaren Feststoffe in ein Kohlenmonoxid reiches Gas umgewandelt. In dieser Zone wird außerdem versucht, durch vollständige Umsetzung des restlichen Kohlenstoffs, den kompletten Heizwert des Brennstoffs zu nutzen. Dadurch können Kohlenstoffrückstände in der Asche unter 5 % gehalten werden.

Das Produktgas soll einen Teergehalt von weniger als 50 mg/Nm^3 aufweisen. In dieser Veröffentlichung werden alle Kohlenwasserstoffe mit einem größeren Molekulargewicht als Benzen als Teere definiert.

Die BioSyn-Pilotanlage

Um das entwickelte Biosyn-Verfahren zu erproben wurde eine Pilotanlage im technischen Maßstab für einen Brennstoffeintrag von $50 \text{ kW}_{\text{LHV(Biomasse)}}$ entworfen. Dies entspricht einem Holzmassenstrom von etwa 10 kg/h . Das technische Ziel des geplanten Verfahrens war es, einen Heizwert für trockenes Syngas von $6\text{-}12 \text{ MJ/Nm}^3$ zu erreichen, mit einem H_2 und CO -Gehalt von $12\text{-}18 \text{ Vol.}\%$ bzw. $22\text{-}28 \text{ Vol.}\%$. Es wird eine Kaltgaseffizienz (=chemische Energie des Produktgases geteilt durch die chemische Energie des Brennstoffs) von 80% erwartet. Im Vergleich mit bestehenden Anlagen ist dies eine erhebliche Verbesserung.

Die Anlage besteht aus diversen Komponenten welche in Abbildung 2 dargestellt und nachstehend beschrieben sind. Alle Anlagenteile sind bewährt und entsprechen dem aktuellen Stand der Technik.

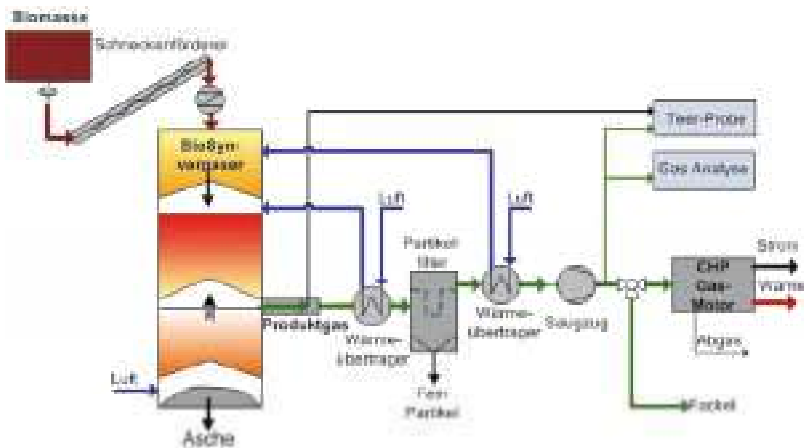


Abbildung 2: Prozessflussbild der BioSyn-Pilotanlage im technischen Maßstab.

Der BioSyn-Reaktor und die Gasaufbereitung

Der BioSyn-Reaktor besteht aus einem hitzebeständigen Rohr, hergestellt aus 1.4828 Edelstahl, das innen mit einer Schicht aus Keramikfasern isoliert ist, welche von einem Innenlayer geschützt wird, um mechanische Abnutzung zu verhindern. Das Reaktorrohr ist zusätzlich von außen mit Steinwolle gedämmt. Die absolute Höhe beträgt 4500 mm , der Außendurchmesser $323,9 \text{ mm}$ und der Innendurchmesser $227,9 \text{ mm}$. Das Rohr ist in vier Zonen unterteilt, die durch bewegliche Roste getrennt sind, um die Biomasse in jeder Zone zu halten (Abbildung 3). Die Pendelfrequenz der beweglichen Roste ist über einen elektrischen Motor unabhängig voneinander kontrollierbar, zur Regulierung der Betthöhen und der Verweilzeiten der Biomasse in jeder Zone.

Die Biomasse gelangt über einen Schneckenförderer und eine Zellradschleuse am oberen Ende des Reaktors in die erste Zone, die Vergasungszone. Dieses Eintragungssystem ermöglicht eine Trennung der Umgebungsluft von der Reaktorkammer sowie eine kontrollierbare Biomasseeinspeisung zwischen 2 und 20 kg/h über die Drehfrequenz des Schneckenförderers. In die Vergasungszone wird über eine Düse gleichmäßig Luft in der Mitte der Zone eingeblasen. Dadurch wird Wärme für die endothermen Trocknungs-, Erhitzungs- und Pyrolyseprozesse bereitgestellt. In dieser Zone werden 75 Gew.% der eingesetzten Biomasse in Gas umgewandelt und bilden ein teerreiches Rohgas.



Abbildung 3: Links: Drei Reaktorschichten. Rechts: Beweglicher Pendelrost.

Das Rohgas fließt im Gleichstrom abwärts durch die heiße Zone der glühenden Kohle, in die Teilverbrennungszone. Hier wird das Rohgas teiloxidiert um die Temperatur auf 1000 °C zu erhöhen und dadurch das thermische Cracken der langkettigen Kohlenwasserstoffe und Aromaten zu ermöglichen. Durch die Bewegung des ersten beweglichen Rosts fällt die in der Vergasungszone entstandene Kohle in die nächste Zone, die Crackzone. Aufgrund des katalytischen Effekts der nicht komplett umgewandelten Kohle aus der ersten Zone werden die Teere zu permanenten Gasen gecrackt.

Die restliche Kohle gelangt in die letzte Zone und wird einer partiellen Oxidation unterzogen. Es entsteht über das Boudouard-Gleichgewicht CO. Die Menge wird über die Sauerstoffzufuhr zu dieser Zone kontrolliert. Das CO-reiche Gas aus der Reduktionszone wird mit den heißen Permanentgasen in der Crackzone vermischt, und bilden das Produktgas, das sogenannte Syngas. Das teerfreie Syngas wird aus der Crackzone mit einem Saugzug abgezogen, weshalb der absolute Reaktordruck leicht unter dem Atmosphärendruck liegt. Das heiße Syngas verlässt den Reaktor mit einer Temperatur von etwa 900°C. Zwei Wärmeübertrager werden installiert um die Verfahrensluft vorzuheizen und das Produktgas auf eine Temperatur von 450 °C zu kühlen bevor es in das Gasreinigungssystem gelangt. Das Gasreinigungssystem besteht nur aus einem Keramikpartikelfilter. Die Filtereinsätze sind mit Kalkstein vorbeschichtet und werden mit Stickstoffdruckstößen gereinigt.

Das gefilterte Gas kann direkt nach dem Abkühlen in den eingebauten Verbrennungsmotor eingespeist werden. Während des An- und Abfahrens der Anlage wird das Gas in einer Fackel verbrannt. Abbildung 4 zeigt ein Foto des BioSyn-Reaktors (rechts) und des Heißgasfilters (links).



Abbildung 4: BioSyn-Vergasungsanlage im technischen Maßstab, ohne Isolierung.

Verfahrenskontrolle und Analyse

Das Verfahren wird über die LabVIEW-Software (National Instruments) überwacht und kontrolliert. Als Schnittstelle zwischen der LabVIEW-Software und allen kontrollierbaren Anlagenkomponenten fungieren A/D-Wandler. Die Anlage ist mit 25 Temperatursensoren ausgerüstet, von denen zwölf im Reaktor installiert sind, um die Temperatur in den verschiedenen Zonen zu überwachen. Die Temperaturen werden kontrolliert, indem der Luftstrom in jeder Zone mittels Massenflussmesser eingestellt wird. Der Reaktordruck wird über verschiedene Druckmesser überwacht. Um den Unterdruck im Reaktor sicherzustellen kontrolliert ein eingebauter PID-Regler den Druck in der ersten Zone über die variable Saugfrequenz. Der Biomassefüllstand in jeder Zone wird mit Hilfe von Drehflügel-Füllstandssonden überwacht.

Das produzierte Syngas und alle Kondensate werden in verschiedenen Phasen analysiert. Die Volumenanteile an CO, CO₂, CH₄, H₂ and O₂ werden online mit einer mobilen Gasanalyse gemessen. Der Benzengehalt des Gases wird mit einem Mikro-Gaschromatographen überprüft. Alle anderen Stoffe werden in verschiedenen Stufen des Verfahrens mit einer eigens dafür entwickelten Entnahmeeinheit entnommen und dann in einem Gaschromatographen, gekoppelt mit einem Massenspektrometer analysiert (GC/MS). Die Entnahmeeinheit wurde angelehnt an die Tar guideline DIN CEN/TS 15439 entwickelt. In Abbildung 5 ist ein Schema der Entnahmeeinheit dargestellt.

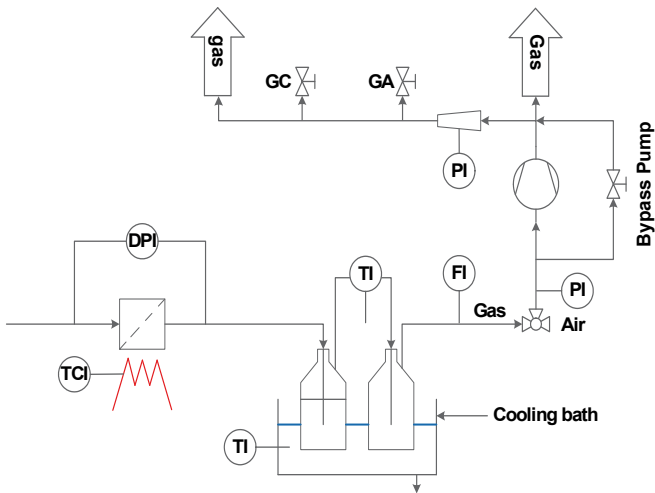


Abbildung 5: Fließbild der Entnahmeeinheit.

Betrieb der BioSyn-Anlage

Nach der erfolgreichen Installation wurde die Anlage mehrfach mit Holzkohle gestartet, um das Anfahren und Herunterfahren der Anlage zu optimieren und angemessene Parameter für einen Dauerbetrieb zu finden. Der Reaktor wurde mit vorgeheizter Luft aus einem elektrischen Heißluftgebläse, der in die Vergasungszone führt, angefahren. Um Teerbildung während des Anfahrens zu verhindern wurde Kohle oder Holzkohle aus vorhergehenden Versuchen genutzt, bis die Temperatur in der Crackzone 900 °C erreichte. Bei einem Kaltstart dauerte dies etwa vier Stunden, bis die Anlage für den Dauerbetrieb bereit war.

Für die ersten Dauerbetriebstests wurden Holzpellets ausgewählt, da diese einen wohldefinierten, einfach zu handhabenden und gut verstandenen Brennstoff darstellen. Obwohl die vorhandene BioSyn-Anlage für eine Holz-Durchflussmenge von etwa 10 kg/h ausgelegt ist, wurde die Zufuhr auf 14 kg/h erhöht. Die Luftströme wurden so angepasst, dass die Temperatur nicht über 800 °C in der Vergasungs-, 1000 °C in der Crack- und 1.000 °C in der Reduktionszone stieg. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Roste und damit der Durchlauf an Biomasse wurde manuell in Abhängigkeit von den Füllstandssonden geregelt. Die Crackzone wurde so voll wie möglich gehalten, um eine möglichst lange Kontaktzeit des Rohgases mit dem Kohlenstoff sicherzustellen.

Mehrere zwölfstündige Betriebsphasen wurden durchgeführt, bevor mit 60-stündigen Messkampagnen mit Holzpellets begonnen wurde. Die BioSyn-Anlage wurde insgesamt mehr als 500 h betrieben.

Ergebnisse und Diskussion

Nach der erfolgreichen Installation der Anlage wurden erste Versuche mit Holzpellets durchgeführt. Ein Beispiel für einen typischen Testlauf mit Holzpellets ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Ziel dieses Testlaufs war es, Prozessparameter für eine komplette Umwandlung des Ausgangsmaterials, minimale Teerkonzentration im Syngas und dadurch eine optimale Verfahrenseffizienz zu finden. Der Vergaser wurde bei 20 °C um 8:51 Uhr bis 9:22 Uhr mit vorgeheizter Luft gestartet. Aufgrund häufiger Variation der Parameter ist der in Abbildung 6 dargestellte Prozess noch nicht sehr stabil. Die variierten Parameter waren der Luftstrom in die Vergasungszone, die Crackzone und die Redoxzone sowie die Verweilzeit der Biomasse oder Kohle in diesen Zonen, kontrolliert über die Drehfrequenz der Pendelroste.

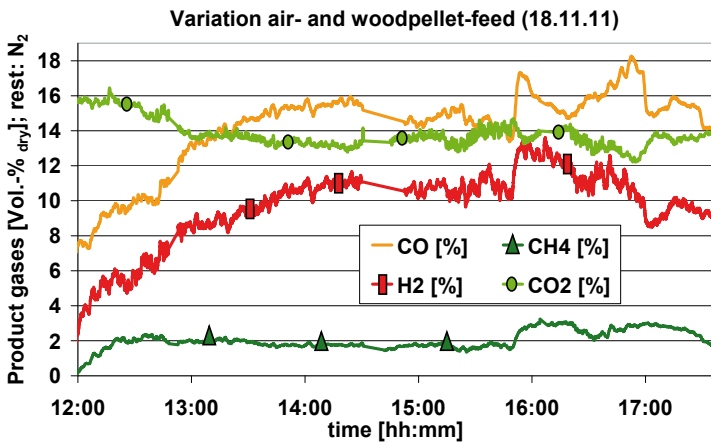


Abbildung 6: Zusammensetzung des trockenen Produktgases beim Anfahren mit Holzpellets.

In Abbildung 7 ist die Gaszusammensetzung bei einem typischen 12-Stunden-Betrieb mit Anfahren um 9 Uhr und Herunterfahren um 21 Uhr dargestellt. Die Schwankungen entsprechen den Schwankungen des Biomasseeintrags. Größere Änderungen in der Gaszusammensetzung beruhen auf Filterabreinigungen oder Gasanalysen Wartung. Die Temperaturen in der Vergasungszone lagen zwischen 600 °C und 800 °C und die maximale Cracktemperatur lag bei 1.100 °C. Das Synthesgas hatte am Austritt des Reaktors eine Temperatur von 900 °C

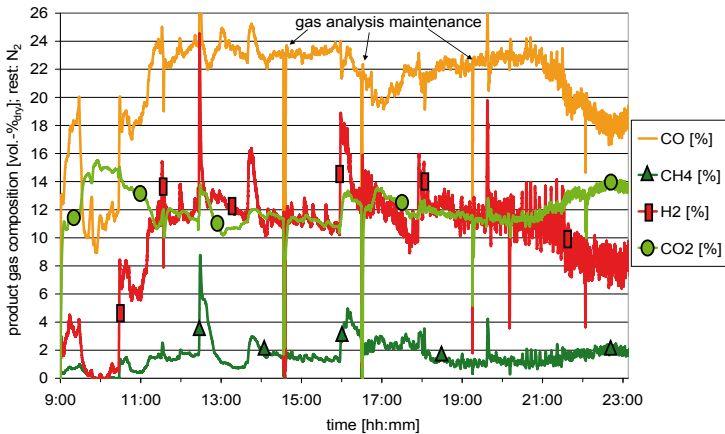


Abbildung 7: Zusammensetzung des trockenen Produktgases vom 15.02.2012. Betrieb mit Holzpellets bei einer Pelletzufuhr von 12 kg/h (LHV von 60 kW).

Während einem 60-stündigen Betrieb (Abbildung 8), wurden mehrfach Teerproben aus dem Syngas direkt am Reaktorausgang genommen. Um den Einfluss der Temperatur in der Crackzone auf die Teermenge im Syngas zu veranschaulichen, werden in Abbildung 9 zwei Teerproben dargestellt. Die erste Probe wurde um 19:10 Uhr genommen. Um diese Zeit lagen die Temperaturen in der Crackzone bei etwa 800 °C. Der Teer bestand vor allem aus Naphthalin, Toluol und Benzen. Auf Grund der relativ niedrigen Cracktemperatur lag die absolute Teerkonzentration im Syngas noch bei 128 mg/Nm³ bzw., die Gesamtkonzentration an Kohlenwasserstoffen inklusive Benzol bei 917 mg/Nm³. Folglich war der Teergehalt noch zu hoch um den CHP-Motor zu betreiben. Die zweite Teerprobe wurde bei einer Cracktemperatur von 900 °C entnommen. Wie in Abbildung 9 zu sehen, hat die Teermenge deutlich abgenommen und liegt bei 33 mg/Nm³ bzw. 368 mg/Nm³ mit Benzol eingerechnet. Gemäß diesen exemplarischen Teerproben kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Temperatur in der Crackzone einen signifikanten Einfluss auf die Teerkonzentration im Syngas hat.

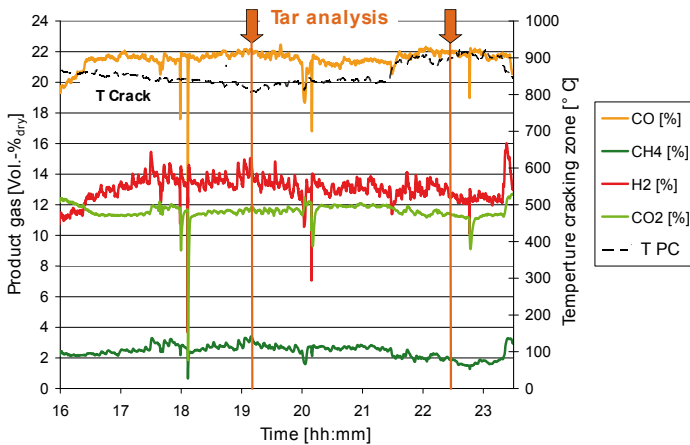


Abbildung 8: Zusammensetzung des trockenen Produktgases und Temperatur in der Crackzone (T crack) vom 28.02.2012. Betrieb mit Holzpellets bei einer Zufuhr von 12 kg/h. Teerproben wurden um 19:10 Uhr und um 22:30 Uhr genommen.

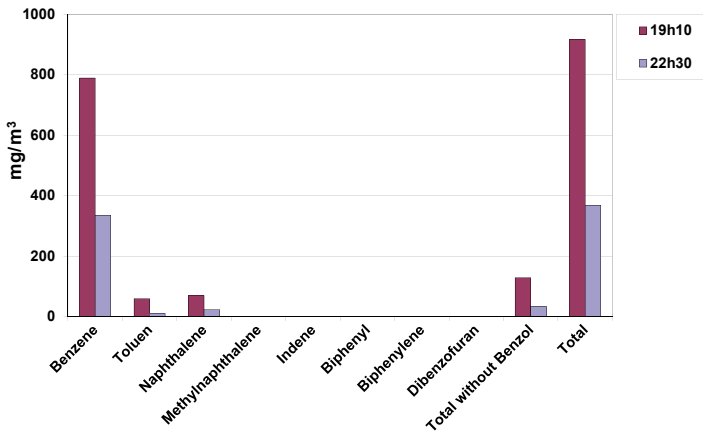


Abbildung 9: Teermenge und Zusammensetzung von zwei Proben aus dem Betrieb mit Holzpellets. Probenentnahme um 19:10 Uhr bei 800 °C in der Crackzone und um 22:30 bei 900 °C in der Crackzone.

Während dem Anlagenbetrieb konnte des Weiteren festgestellt werden, dass neben der Temperatur auch die Betthöhe in der Crackzone einen maßgeblichen Einfluss auf die Teer-reduktion hat. Je höher das Holzkohlebett ist, desto länger ist die Verweildauer des Rohgases wodurch mehr kondensierbare Komponenten zu permanenten Gasen gecrackt werden. Allerdings hängt die optimale Betthöhe stark von der Zusammensetzung der Kohle, ihrer Struktur und somit von der eingesetzten Biomasse und den Betriebsbedingungen in der Vergasungszone ab. Um die optimalen Betthöhen für jede eingesetzte Biomasse zu ermitteln sind weiterführende Forschungen erforderlich.

Potenziale von Mikrogasturbinen bei der Kopplung mit atmosphärischen Festbettvergasern

Timo Zornek^{1*}, Marijke De Graaff², Thomas Monz¹, Manfred Aigner¹

¹ Institut für Verbrennungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

*E-Mail: timo.zornek@dlr.de

² EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Adresse: Durlacher Allee 93, 76221 Karlsruhe
E-Mail: m.degraaff@enbw.com

Abstract

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Nachhaltiges dezentrales Holzvergaserkraftwerk mit gekoppelter Mikrogasturbine (DeHoGas)“ (FKZ: 03KB047) wird ein Mikrogasturbinen-basiertes Blockheizkraftwerk (BHKW) für die direkte Befuerung mit Holzgas entwickelt. Das BHKW wird mit einem bestehenden atmosphärischen Gleichstrom-Festbett-Holzvergaser (Holzvergaser) gekoppelt und innerhalb einer Demonstrationsphase experimentell charakterisiert. Das Betriebsverhalten der Mikrogasturbine und der Holzvergaseranlage werden zunächst getrennt voneinander analysiert. Anschließend werden beide Systeme im Anlagenverbund unter thermodynamischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Mit Hilfe des am DLR entwickelten Simulationsprogramms für Mikrogasturbinenanlagen erfolgt die Untersuchung des stationären Betriebsverhaltens der Mikrogasturbine. Im Fokus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stehen die Stromgestehungskosten und eine Sensitivitätsanalyse zweier Anlagenkonzepte. Im ersten Konzept werden getrocknete Hackschnitzel gekauft und direkt in den Holzvergaser eingeleitet. Im zweiten Konzept werden dagegen frische Hackschnitzel gekauft und durch einen Teil der Abwärme der Mikrogasturbine getrocknet. Der Brennstoffmassenstrom ist bei einer Mikrogasturbine, die mit Holzgas betrieben wird, aufgrund des geringen Heizwerts des Holzgases um den Faktor zehn größer als beim Betrieb mit Erdgas. Das Mikrogasturbinen-BHKW erreicht nach Abzug der elektrischen Leistung des Brennstoffkompressors einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 25 %. Unter Berücksichtigung der Abwärmenutzung ergibt sich eine Gesamteffizienz des BHKWs von ca. 78 %. Die Stromgestehungskosten wurden ausgehend von dem unteren Heizwert des Holzgases und 6.000 Vollbenutzungsstunden der Anlage berechnet. Sie liegen beim Anlagenkonzept mit Holzrocknung bei 20 ct/kWh und ohne Holzrocknung bei 21 Cent/kWh. Im Vergleich liegen die Stromgestehungskosten von Biogasanlagen in einem Leistungsbereich von 190 bis 600 kW_{el} bei 15,6-20,4 ct/kWh_{el}. Die Stromgestehungskosten von Biomassevergasungsanlagen in einer Leistungsklasse von 3 MW_{el} liegen bei ca. 17,7 ct/kWh_{el} (BMU 2011). Die Variationen des elektrischen Wirkungsgrads und der Modulkosten für die Anlagenkonzepte zeigen, inwieweit technologische Verbesserungen die Stromgestehungskosten beeinflussen. Zudem wurde der Einfluss

des Wärmeerlöses, der Brennstoffkosten sowie der Anzahl an Vollbenutzungsstunde der Anlage auf die Stromgestehungskosten untersucht und mit der derzeitigen Vergütung nach EEG 2012 verglichen.

Schlagwörter: Mikrogasturbine, Holzvergaser, BHKW, Anlagenkonzepte, Wirtschaftlichkeit

Einleitung

Um einen KWK-Strom-Anteil von 25 % der Gesamtnettostromerzeugung in Deutschland bis 2020 zu erreichen ist es notwendig alternative und regenerative Energieträger effizient für die Energieversorgung zu nutzen (BMW, BMU 2011). Die Entwicklung thermischer Vergasungsprozesse zur Umsetzung cellulosier und lignocellulosier Biomasse sowie die Entwicklung anaerober Vergärungsprozesse tragen zur Erschließung neuer, regenerativer Energieträger bei. Brennstoffflexible, Mikrogasturbinen-basierte KWK-Anlagen bieten eine Möglichkeit zur Nutzung dieser regenerativen Energieträger für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung. Im Folgenden wird eine technische und wirtschaftliche Analyse eines Holzvergaser-Kraftwerks vorgestellt. Das Holzvergaser-Kraftwerk, bestehend aus einem atmosphärischen Holzvergaser, einem Holzgasverdichter und einer Mikrogasturbine Turbec T100 (100 kW_{eI}) wurde am DLR mittels stationärer thermodynamischer Kreislaufberechnungen detailliert analysiert. Die EnBW führte auf der Basis dieser Ergebnisse Wirtschaftlichkeitsanalysen zu verschiedenen Anlagen- und Betriebskonzepten des Holzvergaser-Kraftwerks durch.

Kopplung von Vergaser und Mikrogasturbine

Abbildung 1 zeigt das Anlagenschema eines Holzvergaserkraftwerkes, bestehend aus einem Holzvergaser und einem BHKW basierend auf einer Mikrogasturbine (MGT). Die Holzhackschnitzel werden dem Holzvergaser zugeführt und bei Temperaturen über 1000 °C in ein brennbares Produktgas (Holzgas) umgesetzt. Das Holzgas weist bei Festbettvergaser sehr niedrige untere Heizwerte im Bereich von 3,7-5,6 MJ/Nm³ auf (Kaltschmitt 2009). Da das entstehende Holzgas Verunreinigung wie Teer und Staub enthalten kann, ist eine anschließende Produktgasreinigung erforderlich. Für den Betrieb der MGT wird das Holzgas mit Hilfe eines Verdichters auf einen Vordruck von ca. 6 bar komprimiert. Der Brennkammerdruck kann je nach Betriebszustand der MGT bis zu 4,5 bar betragen. Die Luft wird über den Verdichter angesaugt, verdichtet und im Rekuperator durch die Abwärme des Turbinenabgases auf 600 °C aufgeheizt. Je nach Betriebszustand der MGT werden bis zu 0,8 kg/s Luft vom Verdichter angesaugt. Innerhalb der Brennkammer wird das Holzgas mittels eines FLOX[®]-Brennerkammersystems unter Einhaltung der Emissionsgrenzwerte verbrannt. Das Abgas der Brennkammer wird über die Turbine entspannt. Dabei wird im Generator Strom erzeugt der über eine Leistungselektronik ins Netz eingespeist. Dem Rekuperator ist zusätzlich ein Wasserwärmetauscher nachgeschaltet, mit dem die im Abgas auf einem Temperaturniveau von 270-300 °C enthaltene Restwärme zur Versorgung eines Fernwärmenetzes und zur Holz Trocknung genutzt wird.

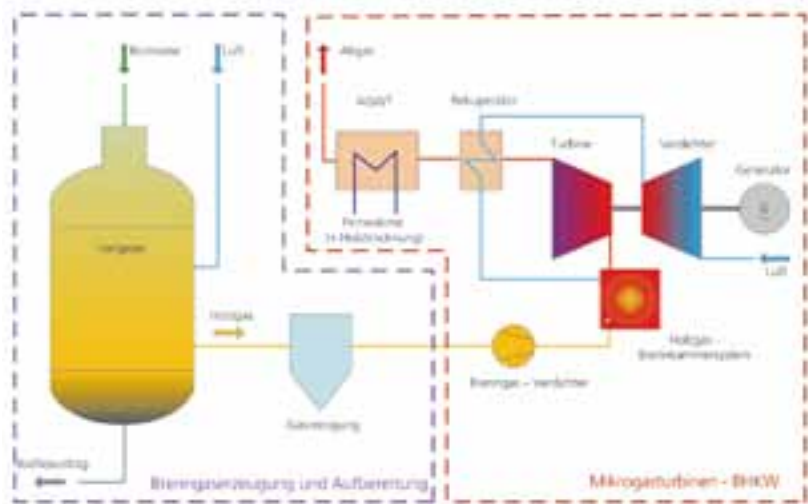


Abbildung 1: Anlagenschema eines Holzvergaserkraftwerks bestehend aus einer Holzvergaseranlage (links) gekoppelt mit einem MGT-BHKW (rechts).

Um das stationäre Betriebsverhalten der Mikrogesturbinen bei der Kopplung mit einem Holzvergaser zu untersuchen, wurden thermodynamische Kreislaufberechnungen durchgeführt. Für diese Berechnungen wurde das am DLR entwickelte, Kennfeld-basierte MGT-Anlagen-Simulationsprogramm verwendet. Als Eingabegrößen für die Simulation dienen die Brennstoff- und Luftdaten, die Maschinendrehzahl und die Turbinenaustrittstemperatur. Da der untere Heizwert des Brennstoffes großen Einfluss auf die sich einstellenden Massenströme von Luft und Brennstoff hat, wurden Gaszusammensetzungen ausgewählt, die die übliche Bandbreite des unteren Heizwertes von Holzgas aus atmosphärischen Festbett-Holzvergasern abdecken (Kaltschmitt 2009). Die verwendeten Daten stammen aus Messungen an Festbett-Holzvergasern, die die Projektpartner Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg und Hochschule Offenburg durchführten. Zum Vergleich sind in Tabelle 1 ebenfalls die Brennstoffzusammensetzung, der untere Heizwert und die angenommene Brennkammereintrittstemperatur für die Erdgas-basierten thermodynamischen Kreislaufberechnungen dargestellt. Für die Berechnung der übertragenen thermischen Leistung des Abgaswärmetauschers wurden eine Vorlauftemperatur von 50 °C und eine Rücklauftemperatur von 90 °C für das Wasser angenommen. Für die Luft wurden die Isobedingungen ($T_U=15^\circ\text{C}$, und $p_U=1\text{atm}$) und eine relative Feuchte von 60 % angenommen. Da sich das Holzgas bei der Kompression erwärmt, wurde für das Holzgas eine Brennkammereintrittstemperatur von 125 °C angenommen.

Tabelle 1: Gaszusammensetzungen, untere Heizwerte H_u und Brennkammereintrittstemperaturen $T_{Br, ein}$ der untersuchten Brennstoffe

Brennstoff	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	CO ₂	O ₂	H _u	T _{Br, ein}
	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	Vol%	MJ/Nm ³	°C
Holzgas 1 (HG1)	22	18	2,25	0	0	47,25	12	0	5,53	125
Holzgas 2 (HG2)	17,5	15,5	2,3	0	0	50,4	14,3	0	4,71	125
Holzgas 3 (HG3)	20,9	5,3	1,9	0	0	61	6,9	4	3,89	125
Erdgas (EG)	0	0	96	3	1	0	0	0	40,3	15

In Abbildung 2 sind die Betriebskennlinien der MGT beim Einsatz der in Tabelle 1 aufgeführten Brennstoffe im Verdichterkennfeld der MGT dargestellt. Die Betriebskennlinien sind für den jeweiligen Brennstoff von minimaler Teillast bis Volllast der MGT dargestellt. Dabei ist das Druckverhältnis des Verdichters über dem korrigierten Massenstrom aufgetragen. Die rote Linie in Abbildung 2 entspricht der Pumpgrenze des Verdichters. Linien konstanter Drehzahl sind schwarz dargestellt. Die Grafik zeigt deutlich, dass sich die Betriebskennlinie mit sinkendem unterem Heizwert in Richtung der Pumpgrenze bewegt. Der Grund dafür ist der starke Anstieg des erforderlichen Brennstoffmassenstroms, der benötigt wird, um eine Turbinenaustrittstemperatur von 645 °C zu erreichen. Weiterhin ist aus Abbildung 2 ersichtlich, dass für alle betrachteten Brennstoffe und Betriebspunkte der MGT ein ausreichend großer Abstand zur Pumpgrenze des Verdichters besteht. Daher ist davon auszugehen, dass die eingesetzte Mikrogasturbine mit den aufgeführten Holzgasen über einen weiten Betriebsbereich betrieben werden kann.

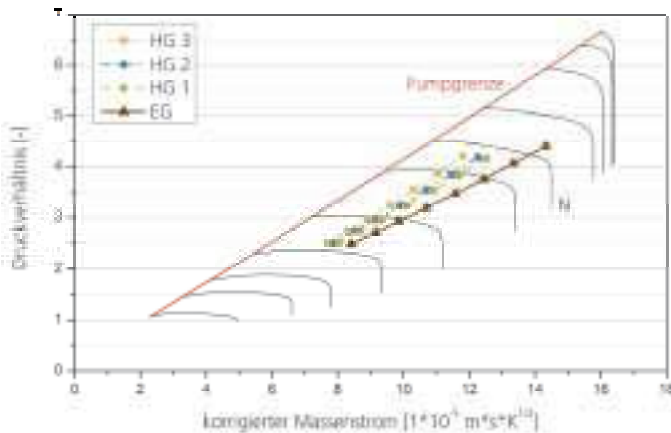


Abbildung 2: Betriebskennlinien der MGT für verschiedene Holzgase und Erdgas (siehe Tabelle 1) im MGT-Verdichterkennfeld.

Ab etwa 97 % der maximalen MGT-Drehzahl ($n_{\max}=70000 \text{ min}^{-1}$) können mit den MGT-Anlagen Simulationstool keine stationären Betriebspunkte beim Einsatz von Holzgas berechnet werden, da für diese Bedingungen keine MGT-Kennfelder zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund liegen die Vollastpunkte der Betriebskennlinien für Holzgase in Abbildung 2 bei einer Drehzahl von $n=67.500 \text{ min}^{-1}$. In Tabelle 2 sind die elektrischen und thermodynamischen Prozessgrößen der MGT und des Holzgasverdichters für die verschiedenen Brennstoffe aus Tabelle 1 bei einer Drehzahl von $n=67.500 \text{ min}^{-1}$ zusammengefasst. Für die Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung des Brennstoffverdichters P_v wurden ein Gesamtwirkungsgrad des Verdichters von 70 % und ein Ausgangsdruck von 6 bar angenommen. Wegen des geringen unteren Heizwertes des Holzgases HG1 im Vergleich zum Erdgasbetrieb ist ein mehr als zehnfach so großer Brennstoffmassenstrom notwendig. Bei einer Drehzahl von $n=67.500 \text{ min}^{-1}$ wird am Generator eine zum Erdgasbasierten Vollastbetrieb vergleichbare elektrische Leistung $P_{\text{el,Gen}}$ erreicht. Allerdings reduziert sich der elektrische Wirkungsgrad durch den hohen Leistungsbedarf des Brennstoffverdichters von $\eta_{\text{el,Gen}}=30,2 \%$ auf $\eta_{\text{el}}=25,1 \%$. Wird jedoch die nutzbare Wärmeleistung beim Einsatz des Holzgases HG1 berücksichtigt, ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 78,6 %. Mit sinkendem Heizwert steigen der Brennstoffmassenstrom und die benötigte elektrische Leistung des Brennstoffverdichters an. Da der Verdichter der MGT wegen des steigenden Brennstoffmassenstroms weniger Luft fördert, reduziert sich die im Rekuperator übertragene thermische Leistung und die Temperatur des Abgases am Austritt des Rekuperators steigt an. Dadurch und wegen des größeren Gesamtmassenstroms durch die MGT werden größere Wärmeleistungen am Abgaswärmetauscher erzielt. Der Abfall des Gesamtwirkungsgrades ist deshalb wesentlich geringer als der des elektrischen Wirkungsgrades η_{el} . Weiterhin haben die Ergebnisse gezeigt, dass eine Erhöhung der Brennkammereintrittstemperatur des Brennstoffes um $100 \text{ }^\circ\text{C}$ den elektrischen Wirkungsgrad der MGT um 1 % erhöht. Eine Aufheizung des Holzgases könnte durch einen zusätzlichen Rekuperator im Abgasstrang der MGT technisch umgesetzt werden.

Tabelle 2: Elektrische und thermodynamische Prozessgrößen des Holzvergaser-Kraftwerks am Vollastpunkt der MGT beim Einsatz verschiedener Holzgase und Erdgas

Brennstoff	n	\dot{m}_{Br}	$P_{\text{el,Gen}}$	$\eta_{\text{el,Gen}}$	Q_{th}	P_v	η_{el}	η_{ges}
	min^{-1}	g/s	kW	$\%$	kW	kW	$\%$	$\%$
HG1	67500	74,7	112	30,2	198	19	25,1	78,6
HG2	67500	94,2	115	30,0	208	23	23,8	78,1
HG3	67500	125,9	119	29,9	220	29	22,7	78,0
EG	70000	7,4	113	30,7	188	4,5	29,5	80,6

Wirtschaftliche Analyse

Nachstehend werden die Stromgestehungskosten einer mit einem Holzvergaser gekoppelten Mikrogasturbine betrachtet. Aufbauend auf den Ergebnissen der thermodynamischen Betrachtung werden Annahmen zu Kostenpunkten getroffen und anschließend relevante Einflussfaktoren einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Es werden zwei verschiedene Anlagenkonzepte beleuchtet. Im Konzept 1 werden frische Hackschnitzel (WG 50 – Wassergehalt von 50 %) gekauft und mit einem Teil der Abwärme der Mikrogasturbine getrocknet. Das zweite Konzept (Konzept 2) sieht den Kauf getrockneter Hackschnitzel der Güte WG 20 (WG 20 – Wassergehalt von 20 %) vor, die dem Holzvergaser direkt zugeführt werden.

Die Stromgestehungskosten berechnen sich aus der Differenz der verschiedenen spezifischen Kostenpunkten – Kapitalkosten und Betriebskosten – und den Gewinnen aus der Abwärmennutzung, jeweils bezogen auf eine Kilowattstunde erzeugten Strom. Für die Berechnung wurde vorausgesetzt, dass die restliche anfallende Wärme bei 6.000 Vollastbetriebsstunden komplett in ein Wärmenetz eingespeist wird. Die angenommene Holzgaszusammensetzung entspricht dem Holzgas 1 aus Tabelle 1. Die Hackschnitzelpreise wurden unter Beachtung des von (C.A.R.M.E.N. 2012) veröffentlichten Preisindex gewählt und sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Der Wärmeerlös wurde zu 3 ct/kWh gewählt und entspricht nach (BMU 2011) dem durchschnittlichen Erlös aus Fernwärme in Deutschland.

Tabelle 3: Annahmen für das Mikrogasturbinen-basierte Holzvergaser-BHKW

Kostenpunkte	Wert
Investition	500 T€
Hackschnitzel (WG 50)	55 €/t
Hackschnitzel (WG 20)	135 €/t
Wartungskosten	1,12 ct/kWh _{el}
Generalüberholung	0,2 ct/kWh _{el}

In Abbildung 3 werden die Ergebnisse der Stromgestehungskosten beider Anlagenkonzepte grafisch dargestellt. Die Stromgestehungskosten liegen im Konzept 1 (mit eigener Trocknung) bei 20,8 Cent/kWh_{el}, im Konzept 2 bei 21,5 ct/kWh_{el}. Im Vergleich hierzu würde die Vergütung nach dem EEG 2012 20,3 ct/kWh (Grundvergütung 14,3 ct/kWh + Einsatzstoffklasse 1 mit 6 ct/kWh) vorsehen. Mit 51 % (Konzept 1) und 39 % (Konzept 2) bilden die kapitalgebundene Kosten gemeinsam mit den Brennstoffkosten mit 42 % (Konzept 1) und 49 % (Konzept 2) den Hauptteil an den Stromgestehungskosten. Wegen des hohen Anteils der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten können sich Schwankungen der Hackschnitzelpreise auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage deutlich auswirken. Steigen beispielsweise die Hackschnitzelpreise um 5 %, würden die Stromgestehungskosten des Konzeptes 1 um 2,3% und des Konzeptes 2 um 3,4% steigen.

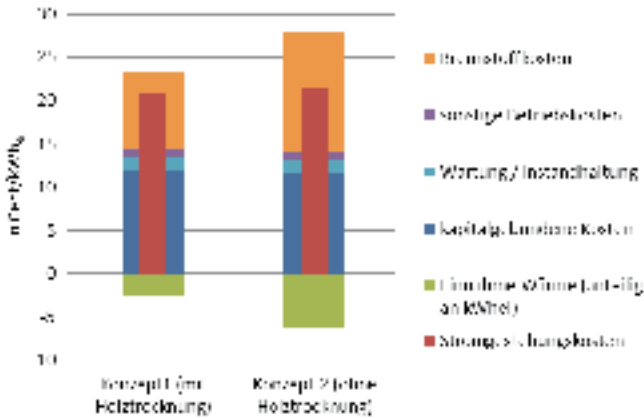


Abbildung 3: Zusammensetzung der Stromgestehungskosten der Anlagenkonzepte 1 und 2.

Nach (Schweikardt, et al., 2012) liegen die Wärmepreise in Deutschland in einer Spannweite von 3 ct/kWh_{th} bis 17 ct/kWh_{th}. Bei einem Wärmeerlös von 4,5 ct/kWh_{th} liegen die Stromgestehungskosten bereits unterhalb der EEG-Vergütung. Unter Wärmeerlös wird hier der Wärmepreis abzüglich Kosten für die Fernwärmebereitstellung, also Netzbetrieb und zugehörige Investitionen, verstanden. Die Stromgestehungskosten hängen linear von den Wärmeerlösen ab. Die Wärmeerlöse beeinflussen die Stromgestehungskosten des Konzeptes 2 (ohne Trocknung) stärker, da hier größere Wärmemengen in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Dies führt dazu, dass bei niedrigen Wärmeerlösen dieses Anlagenkonzept im Vergleich zum Konzept 1 günstigere Stromgestehungskosten aufweist. Bei höheren Wärmeerlösen ist jedoch das Konzept 1 günstiger. Der Wendepunkt liegt im betrachteten Fall bei etwa 3,5 ct/kWh_{th}. Die Lage des Wendepunktes wird von den Hackschnittelpreisen beeinträchtigt, welche in die Kosten der erzeugten Wärme eingehen. Wie in Abbildung 4 zu erkennen, verschiebt sich der Wendepunkt mit steigenden Hackschnittelpreisen hin zu höheren Wärmeerlösen. Der Graph kennzeichnet all jene Punkte, bei welchen die Stromgestehungskosten beider Anlagenkonfigurationen identisch sind.

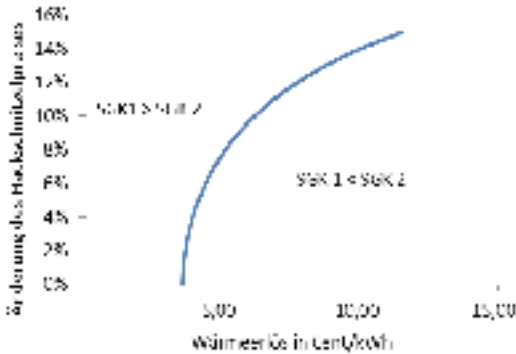


Abbildung 4: identische Stromgestehungskosten (SGK) der Anlagenkonzepte 1 und 2.

Das Centrale Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk erhebt seit 2003 quartalsweise Daten zur Preisentwicklung von Waldhackschnitzeln in Deutschland und veröffentlicht diese auf ihrer Webseite (C.A.R.M.E.N. 2012). Die Preise der Güteklasse WG 20 sind in den letzten Jahren bis 2011 gestiegen und befinden sich derzeit um 25 % oberhalb der Preise von 2008. Neben den Wärmeerlösen und Brennstoffpreisen beeinflussen auch der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs, Kapitalkosten der gesamten Anlage, sowie die Anzahl der Vollbenutzungsstunden die Stromgestehungskosten der Anlage. Die Ergebnisse der diesbezüglich durchgeführten Sensitivitätsanalyse sind für beide Anlagenkonzepte in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Dabei wird die prozentuale Änderung vom Referenzpunkt des jeweiligen Einflussfaktors berechnet und auf der Abszisse aufgetragen. In Tabelle 4 ist der betrachtete Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit den entsprechenden Werten der Faktoren festgehalten. Technologisch bedingte Randbedingungen wurden hierbei zugunsten der wirtschaftlichen Analyse der Konzepte untergeordnet.

Tabelle 4: Änderungsgrad innerhalb der Sensitivitätsanalyse und entsprechende Werte der Faktoren

Kostenpunkte	Referenz	Minimum	Maximum
Änderungsgrad [%]	0	-10	50
Investition [T€]	500	550	250
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	25,1	22,6	37,7
Brennstoffkosten [€/t]	135 (WG20) 55 (WG50)	121 (WG 20) 49 (WG 50)	205 (WG 20) 82,50 (WG 50)
Wärmeerlöse [ct/kWh]	3	2,7	4,5
Vollbenutzungsstunden [h]	6000 h	5400	9000

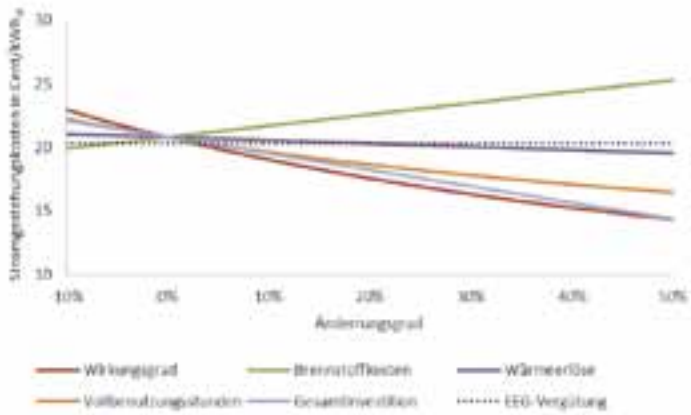


Abbildung 5: Sensitivitätsanalyse des Konzepts 1: mit Holz Trocknung.

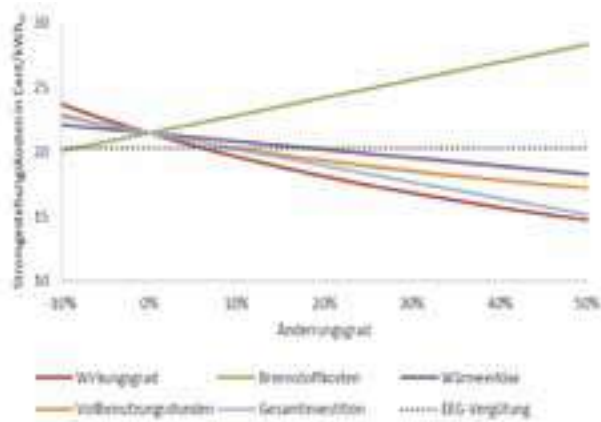


Abbildung 6: Sensitivitätsanalyse des Konzepts 2: ohne Holz Trocknung.

Der Ausgangspunkt (vgl. Tabelle 3) beim Änderungsgrad 0 % bildet den oben betrachteten Fall ab, welcher dem Schnittpunkt der Kurven entspricht. Dieser liegt oberhalb der EEG-Vergütung und kann durch eine zukünftige Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads um 2,5 % oder einer Verringerung der Gesamtinvestition um 3 % soweit abgesenkt werden, dass die Stromgestehungskosten der EEG-Vergütung entsprechen. Kombiniert mit einer Steigerung der Gesamteffizienz und der Wartungsintervalle des Holzvergaser-Kraftwerks, kann die Wirtschaftlichkeit des Holzvergaserkraftwerks zusätzlich gesteigert werden. Eine Reduzierung der Anlagenkosten und der Wartungsintervalle kann durch eine effiziente Serienfertigung und erhöhte Stückzahlen der einzelnen Anlagenkomponenten (Holzvergaser, Holzgasverdichter, Produktgasreinigung und Mikrogasturbine) erreicht werden. Während derzeit Stromgestehungskosten im Bereich der EEG-Vergütung nur bei Volllaststunden über 6.250 h erreicht werden, würden durch die genannten Verbesserungen die Stromgestehungskosten im Bereich der EEG-Vergütung auch bei Vollbenutzungsstunden unter 6.000 h liegen. Wärmegeführte BHKW-Systeme werden aktuell mit 4.000-6.000 Vollbenutzungsstunden ausgelegt und betrieben.

Zusammenfassung und Ausblick

In der Arbeit wurden die Kreislauf-Simulationsergebnisse eines mit Holzgas betriebenen MGT-BHKW beschrieben. Unter Einbezug unterschiedlicher Zusammensetzungen des Holzgases wurde ein Vergleich mit einem Erdgas betriebenen MGT-BHKW durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeit wurde anhand zweier verschiedener Konzepte unter Einbezug einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass trotz des geringeren Heizwertes des Holzgases und des notwendigen Einsatzes eines Holzgasverdichters das MGT-BHKW elektrische Wirkungsgrade bis zu 25 % erreichen kann. Durch Anheben der Brennkammereintrittstemperatur des Holzgases kann der elektrische Wirkungsgrad weiter gesteigert werden. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage kann durch eine Steigerung des Wirkungsgrades, eine Reduktion der Anlagenkosten sowie einer hohen Anlagenausnutzung erreicht werden. Die Wirtschaftlichkeit hängt dabei maßgeblich von den aktuellen Hackschnitzelpreisen und den zu erreichenden Wärmeerlösen ab. Das aufgezeigte technologische und wirtschaftliche Potential eines MGT-basierten Holzvergaserkraftwerks zeigt trotz des noch bestehenden Entwicklungsbedarfs eine zukunftsweisende Möglichkeit für die dezentrale Energieversorgung mittels alternativer und regenerativer Energieträger.

Literatur

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit – BMU (2011): Entwurf: Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbaren-Energien-Gesetz. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie – BMWi (2011): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Zwischenprüfung des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BmwI), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2011.

C.A.R.M.E.N.- Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Energie-Netzwerk e.V [Online].: Energie: Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel-der Energiejolz-Index. URL: http://www.carmen-ev.de/dt/energie/hackschnitzel/hackschnitzelpreis_jahresmittelwerte.html (Stand: 20.09.2012).

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag, Berlin und Heidelberg 2009; S. 599-669.

Schweikardt, S.; Didycz, M.; Engelsing, F.; Wacker, K. (2012): Abschlussbericht Sektoruntersuchung Fernwärme. Bonn : Bundeskartellamt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern, IUTA und HS-Offenburg für Anregungen und Messdaten. Des Weiteren danken die Autoren dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

Optimierung der dezentralen SNG-Erzeugung durch die Heißgasreinigung von Synthesegas

Christoph Baumhagl*, Jürgen Karl

Adresse: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg

*E-Mail: christoph.baumhagl@cbi.uni-erlangen.de

Abstract

In diesem Beitrag werden Möglichkeiten zur Minimierung des Gasreinigungsaufwands für die Reinigung von Synthesegas aus der thermischen Vergasung für die SNG-Produktion präsentiert. Durch Einsatz einer Heißgasreinigung kann sowohl der Anlagenaufwand minimiert, sowie der Wirkungsgrad des Prozesses gesteigert werden. Partikel und Alkalien können mit Hilfe von Filterkerzen bei 350-550 °C abgeschieden werden. Die Entschwefelung und HCl-Abscheidung findet in Festbettadsorbentien statt. Höhere Kohlenwasserstoffe/Teere werden nicht abgetrennt, sondern direkt im Zuge der Methan-Synthese am Ni-Katalysator umgesetzt. In experimentellen Untersuchungen wird am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (EVT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg die komplette Prozesskette validiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die damit erzielbaren Gasreinheiten gut für die Methan-Synthese geeignet sind. Trotz auftretender Katalysatordeaktivierung sind die ermittelten Deaktivierungsraten vielversprechend und bestätigen das hohe Potential der Heißgasreinigung von Synthesegas für die SNG-Produktion.

Schlagwörter: Substitute Natural Gas, SNG, Heißgasreinigung, Entschwefelung, Methan-Synthese

Einleitung

Substitute Natural Gas (SNG) aus Biomasse stellt einen der möglichen Beiträge zum Energiemix der Zukunft dar. Unter derzeitigen Bedingungen ist eine Produktion von SNG nur im großtechnischen Maßstab und unter Nutzung sämtlicher Nebenerzeugnisse wirtschaftlich. Um auch im kleinen, für dezentrale Biomasseanwendungen geeigneten Leistungsbereich konkurrenzfähig zu werden, muss vor allem die Anlagenkomplexität minimiert werden. Dies wurde auch schon im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „CO₂freeSNG“ (CO₂freeSNG 2012) für die Erzeugung von SNG aus Braunkohle demonstriert. Unter Koordination des Lehrstuhls für Energieverfahrenstechnik (EVT) der Universität Erlangen-Nürnberg wurde gemeinsam mit europäischen Projektpartnern die gesamte Prozesskette der SNG-Erzeugung untersucht.

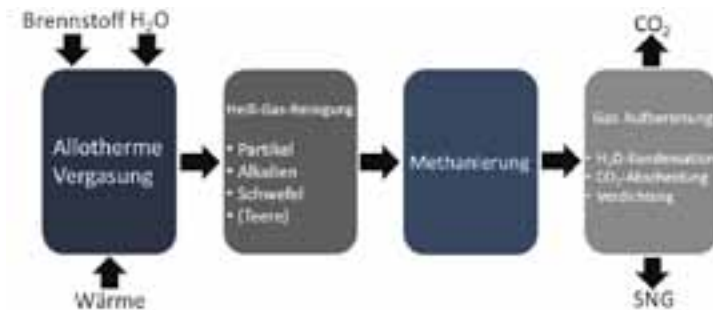
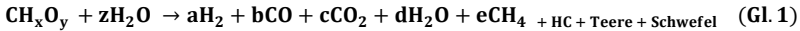


Abbildung 1: Prozesskette der SNG-Produktion.

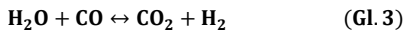
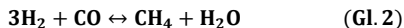
Schwerpunkte der Untersuchung lagen neben der allothermen Vergasung vor allem auf der Heißgasreinigung und Methan-Synthese und deren Prozessintegration. Neben umfangreichen thermodynamischen Systemanalysen wurden die einzelnen Teilschritte auch experimentell validiert. Durch die Zusammenfassung verschiedener Prozessschritte konnte eine deutliche Vereinfachung gegenüber Stand-der-Technik Prozessen erreicht werden. Obwohl dieses Forschungsprojekt den Fokus auf braunkohlebasierte Anwendungen hatte, sind die dabei gewonnenen Erkenntnisse direkt auf Biomasse-Anwendungen übertragbar. Neben den ähnlichen Eigenschaften der verwendeten Braunkohle Rheinbraun Power Split (RWE 2007) zu holzartiger Biomasse ist vor allem das erzielte Synthesegas optimal für die Auslegung und Untersuchung von Heißgasreinigungs-Prozessen geeignet. Durch den erhöhten Schwefelgehalt stellt die Braunkohle einen „Worst-Case“ für Biomasse dar.

Theoretischer Hintergrund der SNG-Produktion

Ausgangspunkt für die Erzeugung von SNG aus Biomasse ist die thermische Vergasung. Diese kann für Synthesen entweder allotherm mit Wasserdampf oder autotherm mit Sauerstoff und Wasserdampf erfolgen. Die meisten Projekte, die sich mit der SNG-Produktion aus Biomasse befassen, setzen auf die allotherme Vergasung, da diese ideale Gaszusammensetzungen für die Methan-Synthese bietet. Das bei der allothermen Vergasung (Gleichung 1) erzielbare trockene Synthesegas besteht zum großen Teil aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid, mit zusätzlichen Anteilen von Kohlendioxid und Methan. Je nach Wasserdampfüberschuss der Vergasung kann das Synthesegasgemisch bis zur Hälfte Wasserdampf enthalten. Zusätzlich zu den erwünschten Synthesegaskomponenten finden sich verschiedene Verunreinigungen, wie höhere Kohlenwasserstoffe / Teere, Alkali-, Chlor- und Schwefelverbindungen im Gas.



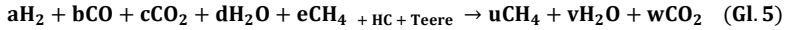
In der Regel wird Nickel als Katalysator für die Methansynthese eingesetzt. Dieser katalysiert neben der Methanierungsreaktion (Gleichung 2) auch die Wassergas-Shift-Reaktion (Gleichung 3). Dadurch ist es möglich, vollständigen Methanumsatz auch bei Gasgemischen, die vom idealen stöchiometrischen Verhältnis $\text{H}_2/\text{CO} = 3$ abweichen, zu erzielen.



Um die für die katalytische Methansynthese nötige Synthesegas-Reinheit zu erzielen, ist es je nach verwendetem Konzept erforderlich, Verunreinigungen auf einen sehr niedrigen Grenzwert abzureinigen. In Abbildung 7 sind typische Konzentrationen an Verunreinigungen im Synthesegas sowie typische Grenzwerte für Nickel-Katalysatoren dargestellt.

Das vom EVT vorgeschlagene und untersuchte Konzept für die Methan-Synthese besteht aus einem polytropen Festbettreaktor. Das heißt, der Rohrreaktor wird im Bereich des Synthesegaseintritts adiabatisch und im restlichen Teil gekühlt betrieben. Durch die Exothermie der Methanierungsreaktion kommt es direkt nach dem Eintritt in den Reaktor zu einem starken Temperaturanstieg auf 500-550°C. Dieser Temperaturpeak erlaubt es, höhere Kohlenwasserstoffe ($\text{C}_2\text{-C}_5$ und Teere) direkt im Zuge der Methansynthese (Gleichung 5) umzusetzen. Vorteile dadurch sind, dass auf Vor-Reformierung bzw. Abscheidung von höheren Kohlenwasserstoffen verzichtet werden kann und zusätzlich diese als Ausgangsstoff für die Methansynthese zur Verfügung stehen. Eine große Herausforderung stellt dabei die Minimierung/Vermeidung von Kohlenstoffablagerungen am Katalysator dar. Diese sind einerseits durch das thermodynamische Gleichgewicht bedingt, werden aber besonders durch höhere Kohlenwasserstoffe gefördert.

Ein wichtiger Einflussfaktor um Kohlenstoffablagerungen zu vermeiden, ist ein ausreichend hoher Wasseranteil (30-40 vol. %) im Synthesegas.



Um die nötige Produktgasqualität, bedingt durch das thermodynamische Gleichgewicht zu erzielen, wird der Reaktor auf eine Austrittstemperatur von ca. 250°C gekühlt.

Heißgasreinigung

Durch die direkte Umsetzung von höheren Kohlenwasserstoffen im Zuge der Methan-Synthese kann der Anlagenaufwand für die Gasreinigung stark vereinfacht werden, da auf eine eigene Teerabscheidung verzichtet werden kann. Üblicherweise werden Teere durch nass-chemische Wäschen aus dem Synthesegas ausgewaschen. Das bringt neben einem hohen apparativen Aufwand auch exergetische Verluste durch Abkühlen des Gases mit sich. Eine oft vorgeschlagene Alternative dazu könnte die Hochtemperatur-Teerreformierung bieten. Diese Technologie befindet sich aber noch im Forschungsstadium.

Wichtigste Komponenten, die vor der Methan-Synthese abgeschieden werden müssen, sind neben Partikel und Alkalien, Schwefelverbindungen und Chlorwasserstoff (HCl). Im vorgeschlagenen Konzept (Abbildung 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) werden Partikel an Sintermetall- oder keramischen Filterkerzen abgeschieden. Durch den Betrieb bei 350-550°C können auch Alkalien am Filterkuchen kondensieren. Filterkerzen sind eine seit Jahren erprobte Technologie und werden bereits in verschiedensten Anlagen, wie am Heatpipe-Reformer von Agnion (Agnion 2012) und an der Bioiq-Pilotanlage am KIT (Leibold 2012) zur Gasreinigung eingesetzt.

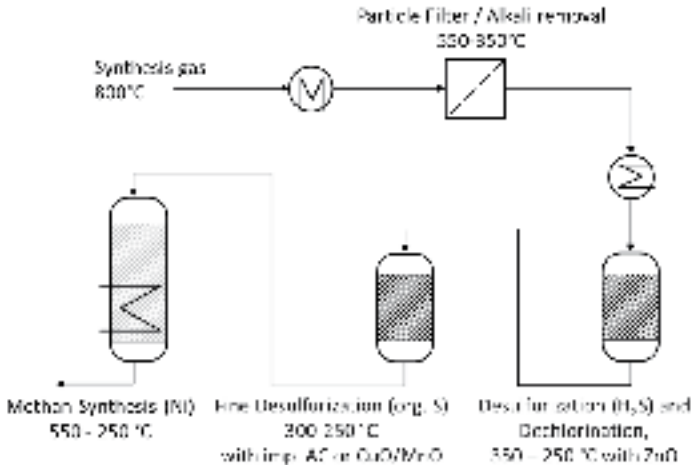
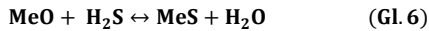


Abbildung 2: Konzept zur Heißgasreinigung von Synthesegas für die Bio-SNG-Produktion.

Schwefelkomponenten und HCl werden in adsorptiven Festbettreaktoren abgeschieden. In der ersten Stufe findet die Abscheidung mit einem Sorbent auf Zink-Oxid-Basis statt. Neben H_2S als Hauptschwefelkomponenten werden dabei auch COS und CS_2 , teilweise auch andere organische Schwefelverbindungen und HCl abgeschieden. Die zweite Stufe hat die Aufgabe, die nach der ersten Adsorberstufe verbleibenden Verunreinigungen, hauptsächlich organische Schwefelverbindungen, abzuscheiden. Dazu können unterschiedliche imprägnierte Aktivkohlen oder ein Sorbent auf CuO/MnO eingesetzt werden.

Theorie zur Heißgasreinigung

Die adsorptive Gasreinigung basiert darauf, dass die unterschiedlichen Verunreinigungen chemische Reaktionen mit dem Sorbent eingehen (Gleichung 6). In der Regel werden verschiedene Metall-Oxide als Sorbent eingesetzt.



Für die Abscheidung von H_2S eignet sich im besonderen ZnO. Wie in Abbildung 3 dargestellt, sind mit ZnO sehr niedrige Schwefelkonzentrationen auf Grund des thermodynamischen Gleichgewichtes erzielbar. Mit CuO würden sich noch höhere Gasreinheiten erzielen lassen, doch das CuO lässt sich nur sehr erschwert unter reduzierenden Bedingungen, wie es bei Synthesegas der Fall ist, einsetzen (Schweiger 2008).

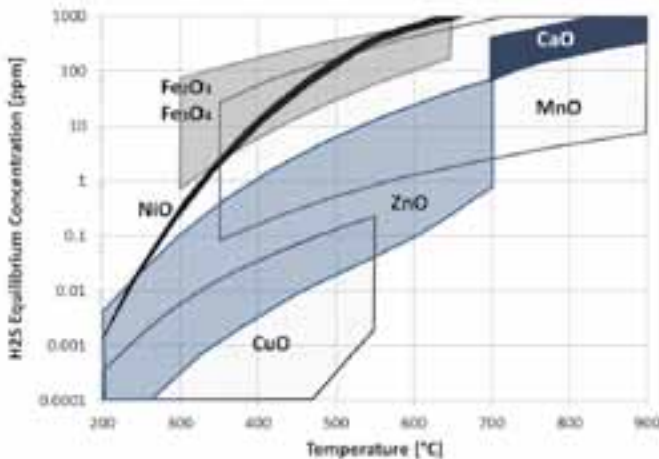
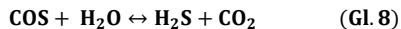
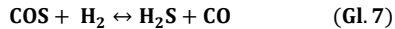


Abbildung 3: Entschwefelungsgleichgewicht für unterschiedliche Sorbentien für H_2S in Abhängigkeit der Temperatur und Gasfeuchte (Obere Grenze 40 Vol. % H_2O , untere Grenze trocken).

Größte Herausforderung bei der Entschwefelung stellen organische Schwefelverbindungen dar. Diese stellen zwar nur einen kleinen Teil (2-7 %) des im Synthesegas befindlichen Schwefels dar (Higman & Burgt 2008), aber auch diese würde zur Deaktivierung des Ni-Katalysators führen. Organische Schwefelverbindungen lassen sich in der Regel nicht direkt an Metall-Oxiden adsorbieren. Sie müssen zuerst durch Hydrierung (Gleichung 7) oder Hydrolyse (Gleichung 8) in H_2S umgewandelt werden. Auf Grund der hydrierenden und adsorptiven Wirkung von CuO/MnO kann dieses für eine Abscheidung von organischem Schwefel eingesetzt werden. In den experimentellen Untersuchungen am EVT hat sich allerdings auch gezeigt, dass COS bereits vollständig an ZnO umgesetzt werden konnte. Entweder liegt das daran, dass COS direkt mit ZnO zu ZnS und CO_2 reagiert, oder dass auf Grund des hohen H_2 - und H_2O -Anteils eine Hydrierung/Hydrolyse direkt am ZnO stattfindet.



Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen hatten die Aufgabe, sowohl die Gasreinigung, als auch die Methan-Synthese unter realen Bedingungen zu testen und zu optimieren. Dazu wurde neben Labortests mit flaschengemischtem Synthesegasgemischen und gezielt dosierten Verunreinigung auch die komplette Prozesskette mit realem Synthesegas aus der thermischen Vergasung getestet. Der Schwerpunkt der hier präsentierten Arbeit liegt auf den Realgastests.

Versuchsaufbau

Für die Realgastests wurde die gesamte Prozesskette der SNG-Erzeugung, von der Vergasung über die Heißgasreinigung und Methan-Synthese im Labormaßstab am EVT aufgebaut (Abbildung 4 und Abbildung 5). Das Synthesegas wird in einem allothermen stationären Wirbelschicht-Vergaser druckaufgeladen bei bis zu 4 bar mit einer maximalen Leistung von 5 kW erzeugt. Als Vergasungsmedium und zur Fluidisierung wird Wasserdampf eingesetzt. Vor der adsorptiven Gasreinigung werden Partikel und Alkalien in einem Zyklon und Sintermetallfilter bei ca. 350 °C abgeschieden. Alternativ kann ein flaschengemischtes Synthesegas über eine Gasregelstrecke bereitgestellt werden.

Die adsorptive Gasreinigung erfolgt zweistufig. Die erste Stufe ist mit einem ZnO -Sorbent gefüllt und wird bei 250-300 °C betrieben. In der zweiten Stufe können unterschiedliche Sorbentien eingesetzt werden. Bei den hier präsentierten Tests wurde eine mit Kaliumiodid imprägnierte Aktivkohle bei einer Betriebstemperatur von 250-280 °C verwendet.

Die Methanierung selbst erfolgt bei nahezu atmosphärischem Druck in einem polytropen gekühlten Festbettreaktor. Zur Messung der Gaszusammensetzungen an verschiedensten Messstellen im Prozess wird eine Gasanalytik bestehend aus einem ABB AO2020 Gasanalysator und einem Agilent Mikro-GC eingesetzt. Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen Proben nach Tar-Protokoll und nach der SPA-Methode genommen.



Abbildung 4: Foto der Versuchsanlage.

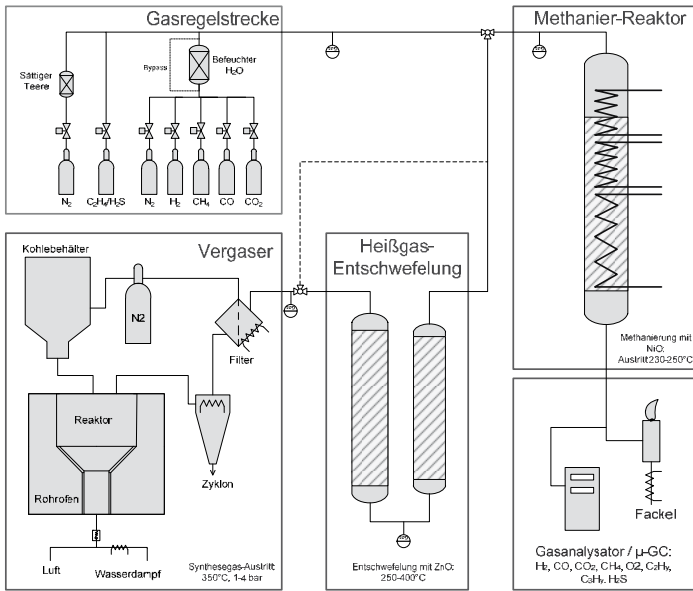


Abbildung 5: Prozessfließbild des gesamten Versuchsaufbaus.

Ergebnisse

Ziel der Untersuchung war es, die Effizienz der Heißgasreinigung sowie die teilweise dadurch resultierende Standzeit des Methanierungs-Katalysators zu ermitteln. Dazu wurden neben den Gaszusammensetzungen und Verunreinigungen auch axiale Temperaturprofile über den Methanierreaktor aufgenommen. Durch Degradation des Katalysators kommt es zu einer Verschiebung des dabei erhaltenen Temperaturprofils.

Die Parameter der Vergasung wurden so gewählt, dass ideale Bedingungen für die Methanierung vorliegen. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die durchschnittlichen Betriebsparameter von Vergasung und Methanierung bei den vier durchgeführten Langzeittests dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Versuchsparameter

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Vergasungstemperatur	800 °C	800 °C	800 °C	800 °C
Brennstoffleistung	1 kW	1 kW	1 kW	1 kW
Dampfzahl σ	6	5	4	4
H ₂ O Syngas	51 Vol.%	45 Vol.%	41 Vol.%	41 Vol.%
Katalysator	EVT01 (Ni)	EVT05 (Ni)	EVT05 (Ni)	EVT05 (Ni)
Space Velocity	3000 h ⁻¹	2700 h ⁻¹	2500 h ⁻¹	2500 h ⁻¹

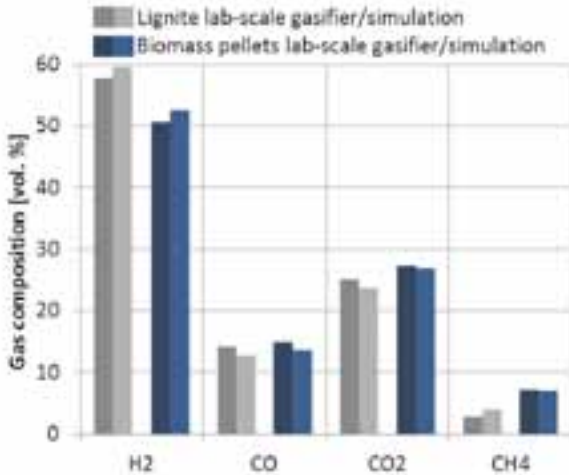


Abbildung 6: Gemessene und Simulierte Gaszusammensetzung für die Vergasung von Biomasse (Pellets) und Braunkohle.

Die bei der Vergasung erhaltene Permanentgaszusammensetzung bietet optimale Voraussetzungen für die Methan-Synthese. In Abbildung 6 sieht man die gemessenen und simulierten Gaszusammensetzungen für die Vergasung von Biomasse und Braunkohle gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die durchgeführten Simulationen sehr gut die realen Gaszusammensetzungen nachbilden und dass bei der Braunkohlevergasung sehr ähnliche Gaszusammensetzungen wie mit Biomasse erzielbar sind.

Zusätzlich zu den Hauptpermanentgaskomponenten sind noch eine Vielzahl an höheren Kohlenwasserstoffen und Verunreinigungen im Synthesegas zu finden. In Abbildung 7 sind in Grün die gemessenen Verunreinigungen eingezeichnet. Nicht dargestellt sind C₂-C₅-Komponenten. Gemessene Bereich dafür waren für C₂H₄ 0,2-0,4 Vol. %, C₂H₆ 0,05-0,2 Vol. %, C₃H₆ 0,05-0,1 Vol. %, C₃H₈ 0,05-0,1 Vol. % und C₄H₈ 0-0,1 Vol. %.

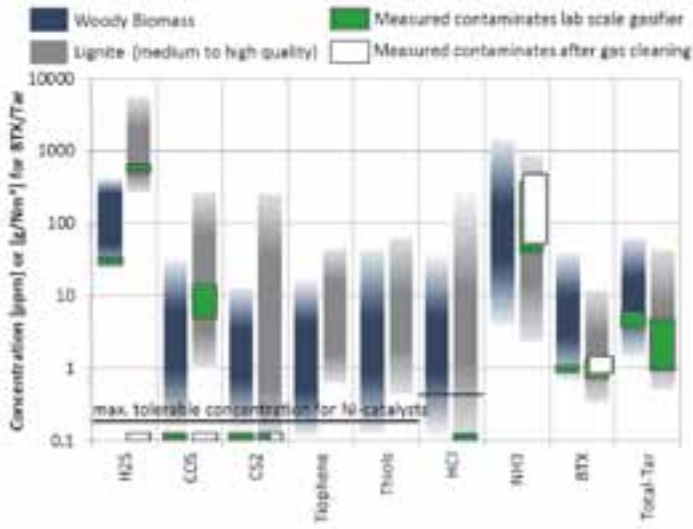


Abbildung 7: Typische Konzentrationen für Verunreinigungen im Synthesegas aus der thermischen Vergasung. Zusätzlich dargestellt sind gemessene Werte vor und nach der Gasreinigung der Labor-Versuchsanlage.

In der ersten adsorptiven Gasreinigungsstufe, gefüllt mit ZnO, konnte der Großteil der Schwefelverbindungen H₂S und COS komplett abgeschieden werden. Die H₂S/COS-Konzentration nach dem ZnO-Adsorber war unterhalb des Detektionslimits von 100ppb. Sowohl nach der ersten Gasreinigungsstufe als auch der zweiten, mit Aktivkohle gefüllten Stufe, konnte in der Regel ein etwas höherer BTX Gehalt im Vergleich zum verunreinigten Synthesegas festgestellt werden. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass ein Teil der höher-molekularen Teere in kleinere gecrackt/reformiert werden dürfte. Die nach der Gasreinigung erzielten Gasreinheiten liefern eine sehr gute Basis für die Umsetzung an Ni-Katalysatoren.

In Abbildung 8 sieht man exemplarisch an Versuch 2 einen typischen Verlauf der Gaszusammensetzung nach der Methan-Synthese. Der hohe Wasserstoffanteil und die damit verbundene geringe Methanausbeute sind auf die hohe Austrittstemperatur zurückzuführen. Bei diesem Versuch war der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Katalysatorstandzeit. Deshalb wurde auf eine Kühlung des Reaktors verzichtet, um die erhaltenen Temperaturprofile nicht zu beeinflussen. Bezogen auf das thermodynamische Gleichgewicht konnte am Reaktorausstritt immer vollständiger Methanumsatz erzielt werden. Der Anstieg der Temperatur und die dadurch bedingten Änderungen in der Gaszusammensetzungen sind auf eine Wanderung des Temperaturpeaks im Reaktor in Richtung des Austritts und somit einer ständigen Deaktivierung zurückzuführen.

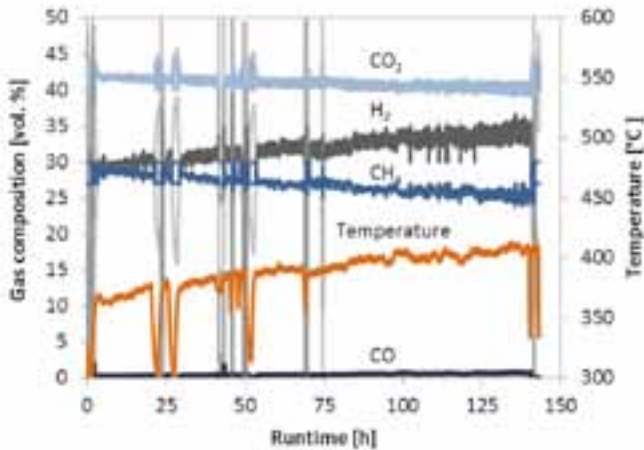


Abbildung 8: Verlauf der Gaszusammensetzung nach der Methan-Synthese und Reaktorausstrittstemperatur bei Versuch 2.

Die beiden durchgeführten Versuche erhaltenen Deaktivierungsraten sind in Abbildung 9 zu sehen. In der linken Grafik sieht man die fortlaufende Abnahme an aktiven Katalysatorvolumen und daraus abgeleitet erhält man die auf der rechten Seite dargestellten spezifischen Katalysatorverbräuche. Die Unterschiede in den Degradationsraten sind zum einen durch die verwendeten Betriebsbedingungen gegeben. In der Regel wirkt sich ein höherer H_2O -Anteil im Synthesegas günstig auf die Katalysatordeaktivierung aus (Kienberger 2012). Versuch 1 wurde mit 50 vol. % H_2O und Versuche 3 und 4 nur mehr mit 41 Vol. % H_2O durchgeführt. Des Weiteren wurde bei Versuch 1 auch ein anderer Katalysator verwendet. Allgemein dürfte die Deaktivierung darauf zurückzuführen sein, dass nicht alle organischen Schwefelverbindungen, wie Thiole und Thiopen, aus dem Synthesegas abgereinigt werden konnten. Wie gut sich diese mit der verwendeten Gasreinigung abtrennen lassen muss noch im Detail untersucht werden. Für eine präzisere Aussage über die Deaktivierungsraten sind aber noch weitere Versuche mit Doppel/Dreifachbestimmung erforderlich.

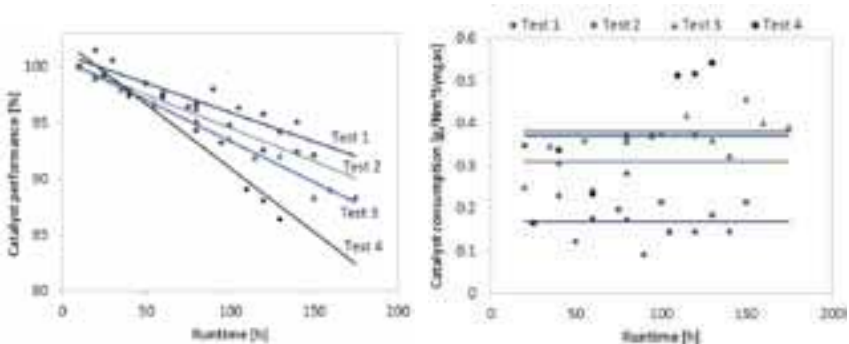


Abbildung 9: Katalysatordegradation und daraus abgeleiteter spezifischer Katalysatorverbrauch.

Zusammenfassung und Fazit

Obwohl Katalysatordeaktivierung nicht verhindert werden konnte, sind die mit der vereinfachten Gasreinigung erreichten Degradationsraten sehr vielversprechend. Gerade bei Anlagen im kleineren Leistungsbereich tragen die Investitionskosten überproportional stark zu den Gesamtkosten einer Anlage bei. Eine Minimierung der Anlagenkosten würde daher auch eine leichte Erhöhung der Betriebskosten durch den Katalysatorverbrauch rechtfertigen.

Weitere Arbeiten sind allerdings noch notwendig, um die Katalysatordegradation weiter zu verringern. Aussichtsreiche Ansätze dabei sind der Einsatz von anderen imprägnierten Aktivkohlen zur Gasreinigung sowie eine Optimierung der Betriebsparameter für die Katalyse.

Literatur

Agnion (2012): www.agnion.de.

CO₂freeSNG (2012): CO₂freeSNG Projekt-Website. Von www.co2freesng.eu abgerufen.

Gunnarsson, I. (2011): The GoBiGas Project - Efficient transfer of biomass to bio-SNG of high quality. SGC International Seminar on Gasification. Malmö.

Higman, C.; Burgt, M. (2008): Gasification.

Kienberger, T. (2012). Methanisierung von Synthesegas.

Kopyscinski, J. et al. (2010): Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. Fuel.

Leibold, H. (2012): Trockene HT Synthesegasreinigung. Methanation Workshop. Nürnberg.

RWE (2007): Power Split Datenblatt.

Schweiger, A. (2008): Reinigung von heißen Produktgasen aus Biomassevergasern für den Einsatz in Oxidkeramischen Brennstoffzellen. Dissertation TU Graz. Graz.

Experimentelle Untersuchung der Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomassesorten bei der AER-Biomassevergasung

Norman Poboß^{1*}, Mariusz Zieba¹, Stefan Steiert², Jochen Brellocks², Michael Specht²

¹Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

*E-Mail: norman.poboss@ifk.uni-stuttgart.de

²Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Industriestr. 6, 70565 Stuttgart

Abstract

Die Biomassevergasung nach dem AER-Verfahren (Absorption Enhanced Reforming) ermöglicht die Erzeugung eines wasserstoff- und heizwertreichen Produktgases (H_2 -Gehalt: ca. 70 Vol.-%; Heizwert: ca. 14 MJ/m³ i.N), was eine nachfolgende Erzeugung von Erdgas-substitut mittels Methan-Synthese ohne weitere Gaskonditionierungsverfahren begünstigt. Dem AER-Verfahren liegt die Wasserdampfvergasung mit einem kalksteinbasierten Bettmaterial in einem Zweibett-Wirbelschichtreaktor zugrunde.

Aufgrund des CaO-basierten Bettmaterials und der reduzierten Vergasungstemperatur eignet sich das AER-Verfahren grundsätzlich für den Einsatz von mineralstoffreichen Biomassesorten, die einen niedrigeren Ascheschmelzpunkt als Holz haben und daher für konventionelle Konversionsverfahren als problematisch eingestuft werden. Zudem können die Mineralstoffe (Asche) aus der Biomasse zusammen mit dem kalksteinbasierten Bettmaterial in Form eines Düngers in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war der experimentelle Nachweis der Einsetzbarkeit verschiedener mineralstoffreicher Biomassesorten bei der AER-Biomassevergasung im Labormaßstab. Hierzu wurden am ZSW rheologische Voruntersuchungen zur Beurteilung des Ascheerweichungsverhaltens von Biomassen und am IFK Vergasungsexperimente an einer Wirbelschichtanlage durchgeführt. Dabei konnte die AER-Vergasbarkeit von mineralstoffreicher Biomasse an einer 20 kW_{th}-Laborwirbelschichtanlage erfolgreich demonstriert werden, wobei für alle eingesetzten Biomassen eine hohe Produktgasqualität und -ausbeute ermittelt werden konnte. Gleichzeitig konnte kein Aufschmelzen der Aschen bzw. keine Defluidisierung durch Agglomeration beobachtet werden.

Schlagwörter: AER, Biomassevergasung, biogene Reststoffe, Brennstoff-Flexibilisierung, Ascheerweichung, Zweibett-Wirbelschicht, Rheometer

Einleitung

Das Fundament unseres heutigen Energiesystems bilden kohlenstoffhaltige Energieträger bzw. Kraftstoffe. Auch zukünftig besteht zur Energiespeicherung und für bestimmte Mobilitätsanwendungen Bedarf an kohlenstoffhaltigen Energieträgern [1]. Eine vielversprechende Option zur Erzeugung regenerativer kohlenstoffhaltiger Energieträger ist die thermo-chemische Veredlung von Biomasse, da hierbei im Gegensatz zu anderen Verfahrensoptionen alle Bestandteile der Biomasse (i. W. Zellulose, Hemizellulose und Lignin) in Kraftstoffe überführt werden können. Mit der absorptionsunterstützten Wasserdampf- reformierung (AER-Prozess) kann feste Biomasse in ein Produktgas von über 70 Vol.-% Wasserstoff umgewandelt werden. Diese wasserstoffreiche Zusammensetzung bietet eine sehr günstige Ausgangssituation für die Erzeugung von regenerativen kohlenstoffhaltigen Energieträgern wie beispielsweise Erdgassubstitut (SNG).

Seit einigen Jahren wird am IFK und ZSW gemeinsam die AER-Biomassevergasung im Zweibett-Wirbelschichtreaktor mit den Forschungsschwerpunkten der Flexibilisierung der Einsatzstoffe und der Produktgasnutzung weiterentwickelt. Vor dem Hintergrund der zunehmenden limitierten Verfügbarkeit von Biomasse wurde die Eignung alternativer Biomassearten für die Bereitstellung eines AER-Synthesegases experimentell untersucht. Dazu erfolgten am ZSW zunächst rheologische Voruntersuchungen des Ascheerweichungsverhaltens verschiedener Brennstoffe in Kombination mit unterschiedlichen Wirbelschicht-Bettmaterialien. Darauf aufbauend wurden anschließend am IFK biogene Brennstoffe, die weder in unmittelbarer Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion noch zur Wärmeerzeugung stehen, wie z.B. Landschaftspflegematerial bzw. landwirtschaftliche Reststoffe, auf ihre Vergasbarkeit im AER-Prozess untersucht. Neben dem AER-Vergasungsverhalten wurde auch das Verbrennungsverhalten, des bei der Vergasung zurückbleibenden Koks-Bettmaterialgemisches, im AER-Regenerator untersucht.

Der AER-Biomassevergasungsprozess

Dem AER-Verfahren liegt die Wasserdampfvergasung mit einem kalksteinbasierten Bettmaterial in einem Zweibett-Wirbelschichtreaktor zugrunde. Das CaO-basierte Bettmaterial zirkuliert dabei zwischen einem Vergasungs- und einem Verbrennungsreaktor. Die wesentlichen Hauptreaktionen der thermochemischen Biomassevergasung mit Wasser als Vergasungsmedium sind nachfolgend in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Hauptreaktionen der Biomasse-Wasserdampfvergasung

Name der Reaktion	Chemische Reaktionsgleichung	Gl.
Biomasse-Dampf-Reformierung	$\text{CH}_x\text{O}_y + (1 - y)\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + [0.5x + (1-y)]\text{H}_2$	(1)
Wasser-Gas-Shift-Reaktion	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	(2)
CO ₂ -Absorption	$\text{CaO} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3$	(3)

Durch den Einsatz von gebranntem Kalk (CaO) als Absorptionsmittel kommt es im Vergasungsreaktor bei Temperaturen zwischen 650 °C und 725 °C zur CO₂-Einbindung nach Gleichung (3). Dadurch wird bereits in situ das chemische Gleichgewicht der Wassergas-Shift-Reaktion und somit auch der Biomasse-Dampf-Reformierung auf die Wasserstoff-Produktseite verschoben. Das CO₂-beladene Bettmaterial wird zusammen mit dem bei der Vergasung zurückbleibenden Koks in die Verbrennungszone transportiert (vgl. Abbildung 1). Durch die Verbrennung des Koks werden Temperaturen von bis zu 900 °C erreicht und es kommt zur Freisetzung des eingebundenen CO₂. Nach der Regeneration wird das Bettmaterial in den Vergasungsreaktor zurückgeführt.

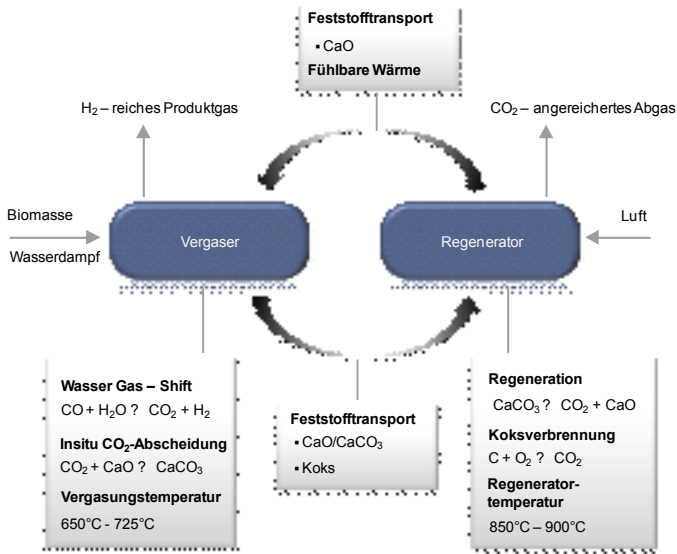


Abbildung 1: Prozessschema AER-Biomassevergasung.

Aufgrund des CaO-basierten Bettmaterials und der reduzierten Vergasungstemperatur eignet sich das AER-Verfahren grundsätzlich für den Einsatz von mineralstoffreichen Biomassesorten, die einen niedrigeren Ascheschmelzpunkt als Holz haben und daher für konventionelle Konversionsverfahren als problematisch eingestuft werden. Darüber hinaus wird durch das CaO-basierte Bettmaterial eine in situ-Gasreinigung beispielsweise hinsichtlich Teere und Schwefel realisiert. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal stellt die für eine nachfolgende Synthese (von z.B. Erdgassubstitut (SNG)) günstige Stöchiometrie des Produktgases aufgrund des hohen Wasserstoffanteils dar [2]. Zudem können die Mineralstoffe (Asche) aus der Biomasse zusammen mit dem kalksteinbasierten Bettmaterial in Form eines Düngers in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden.

Experimentelle Untersuchung der Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomassen

Auswahl biogener Festbrennstoffe

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zur Brennstoffflexibilisierung am IFK wurden acht verschiedenartige Brennstoffe eingesetzt und auf ihre AER-Vergasbarkeit untersucht. Die Auswahl der zu untersuchenden Brennstoffsorten, wie auch die Versuchsplanungen wurden im Kontext einer praxisnahen Anwendbarkeit geplant und durchgeführt. Ausgewählt wurden dabei zwei unterschiedliche Fraktionen:

- Fraktion „Wald“: Holzartige Waldresthölzer (Fichte- und Esche-Stammholz), Kronenholz (Mix aus Esche und Ahorn) mit erhöhtem Grünanteil sowie Rinde (Rindenmulch).
- Fraktion „Grüngutsammelplatz“: Biogene Reststoffe aus der Landschaftspflege (Ast- und Baumschnitt (Birke), Hecken- und Strauchschnitt) sowie Gartenabfälle aus Kompostierungsanlagen (Kompost frisch und Kompost verrottet).

Sämtliche Biomassen wurde nach der Anlieferung auf eine einheitliche Stückigkeit zerkleinert (Lochsiebmaschenweite 7 mm), um sie einerseits für die Dosiereinheit der Vergasungsanlage förderbar zu machen und andererseits die Einflussgröße der Stückigkeit der unterschiedlichen Brennstoffe im Vorfeld zu eliminieren. Vor Versuchsbeginn zur Brennstoffflexibilität und zum Zeitpunkt der Probennahme waren sämtliche Brennstoffe über mehrere Tage auf eine relativ einheitliche Feuchte getrocknet worden (Wassergehalt zwischen 10-20 Ma.-%).

Die untersuchten Brennstoffe wiesen alle einen für Biomasse typischen Anteil an flüchtigen Bestandteilen und fixem Kohlenstoff auf, während sich die Aschegehalte teilweise erheblich voneinander unterschieden. Speziell die Sorten Kompost frisch und Kompost verrottet sowie Rindenmulch zeichneten sich durch sehr hohe Aschegehalte aus.

Alle eingesetzten Biomassesorten wurden auch auf ihren makromolekularen Aufbau hin untersucht. Insgesamt bildeten die drei Anteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin bei beiden Fraktionen zwischen 80 und 100 % der aschefreien Pflanzentrockenmasse. Den restlichen Anteil bilden Substanzen wie Harze, Fette, ätherische Öle und Proteine. Eine Übersicht über die Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe

		Fraktion 1: Wald				Fraktion 2: Grüngutsammelplatz			
		Stammholz		Kronen- nen- holz (Esche/ Ahorn)	Rinden- den- mulch	Ast- schnitt (Birke/ Esche)	Hecken- Strauch- schnitt	Kompost	
		Fichte	Esche					ver- rottet	frisch
Flüchtige		82,6	79,1	79,0	79,9	82,3	81,8	79,0	80,7
C-Fix		17,5	20,9	21,0	20,2	17,7	18,2	21,0	19,3
C		49,3	52,3	51,6	53,6	50,4	52,8	52,1	51,4
H		6,3	6,4	5,7	6,1	6,0	6,2	6,7	6,4
O		44,4	40,9	42,2	39,9	43,1	40,3	38,8	41,2
N		0,0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	2,4	1,1
S	[ma- % _{waf}]	n.b.							
Asche		1,2	3,3	1,5	15,3	2,7	3,6	32,8	15,4
H ₂ O*		16,9/9,6	12,0	19,3	12,2	14,0/7,7	16,8/8,5	8,3	8,9
Cellulose		41,1	59,6	46,7	62,3	41,5	44,1	58,5	50,6
Hemicellu- lose		12,5	17,5	21,3	9,6	17,3	17,0	17,0	0,0
Lignin		27,8	16,1	15,7	30,2	25,7	29,5	38,5	27,4
Unterer Heizwert H _u	[MJ/kg % _{waf}]	18,3	19,9	18,9	20,2	18,6	19,9	20,4	19,5

*Versuchstag 1 / Versuchstag 2

Rheologische Untersuchungen zur Ascheerweichung am ZSW

Bei der Vergasung bzw. Verbrennung von Brennstoffen und Brennstoffgemischen in Wirbelschichten können im Reaktionsraum je nach Temperatur physikalische Veränderungen der Aschen auftreten. Diese reichen je nach Reaktionstemperatur vom Versintern bis hin zum völligen Aufschmelzen der Aschepartikel. Besonders beim Einsatz von mineralstoffreichen, biogenen Brennstoffen (z. B. Stroh, Landschaftspflegematerial) ist das Risiko von Prozessunterbrechungen durch Agglomeration und Anbackungen, aufgrund der deutlich niedrigeren Ascheschmelzpunkte im Vergleich zu holzartigen Brennstoffen hoch. Um die Betriebsstörungen bei der energetischen Nutzung von mineralstoffreichen Biomassen mit niedrigen Ascheschmelzpunkten zu reduzieren, können entweder die Betriebsparameter dem Einsatzstoff angepasst werden oder entsprechende Bettmaterialien (ggf. als Additiv) eingesetzt werden. Beide Optionen erfordern jedoch Kenntnisse über das Ascheerweichungsverhalten des eingesetzten Brennstoffes in Kombination mit den eingesetzten Bettmaterialien.

Um das Ascheerweichungsverhalten zu untersuchen und somit die Einsetzbarkeit mineralstoffreicher, biogener Reststoffe bei der AER-Vergasung zu beurteilen, wurden rheologische Untersuchungen verschiedener Biomasseaschen in Kombination mit verschiedenen Wirbelschicht-Bettmaterialien durchgeführt. Die Experimente erfolgten an einem vom ZSW entwickelten Rheometer-Teststand und hatten die Identifizierung kritischer Reaktionsbedingungen hinsichtlich der Erweichung von Asche-Bettmaterial-Mischungen zum Ziel. Zentrales Element des Versuchsaufbaus war ein sog. Rheometer (Rotationsviskosimeter), das in Verbindung mit einem elektrisch beheizten Ofen in der Lage ist, das Drehmoment beim Rühren einer Asche-Bettmaterial-Mischung in Abhängigkeit der Probentempe-

ratur zu messen. Kommt es innerhalb der Probe aufgrund von Ascheerweichung zur Agglomeration des Bettmaterials, so steigt das Drehmoment sprunghaft an und der Versuch wird beendet. Für einen Versuch wurde eine Mischung aus 3 g Biomasseasche und 22,5 g Bettmaterial in einem Tontiegel im elektrisch beheizten Ofen fixiert und der Rührer des Rheometers ausgerichtet. Mit einem Anfangsdrehmoment zwischen 2 und 5 mNm wird die Probe anschließend unter Rühren mit einer Temperaturerhöhung von 200 K/h bis zu einer maximalen Temperatur von 1300 °C erhitzt. Steigt das Drehmoment während des Versuchs auf einen Wert über 12 mNm an, so wird der Versuch automatisch beendet. Insgesamt wurden Untersuchungen mit vier verschiedenen Biomasseaschen in Kombination mit zwei verschiedenen Wirbelschicht-Bettmaterialien durchgeführt. Als Biomasseaschen kamen dabei Holzasche als Vertreter der Fraktion „Wald“ (Referenzfall), Stroh als mineralstoffreiche Restbiomasse sowie Kompostasche als Vertreter der Fraktion „Grün-gutsammelplatz“ zum Einsatz. Die Aschen wurden jeweils in einer Mischung mit Olivin ($(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$), das als Bettmaterial bei der FICFB-Biomassevergasung (Fast Internally Circulating Fluidised Bed; z.B. umgesetzt im 8 MW_{th}-Maßstab in Güssing, Österreich) zum Einsatz kommt oder mit Kalkstein (CaCO_3), welcher als CO_2 -sorptives Bettmaterial beim AER-Prozess verwendet wird, untersucht. In Abbildung 2 sind die Versuchsergebnisse der Rheometeruntersuchungen von Holz- und Kompostasche sowohl für Kalkstein als auch für Olivin dargestellt.

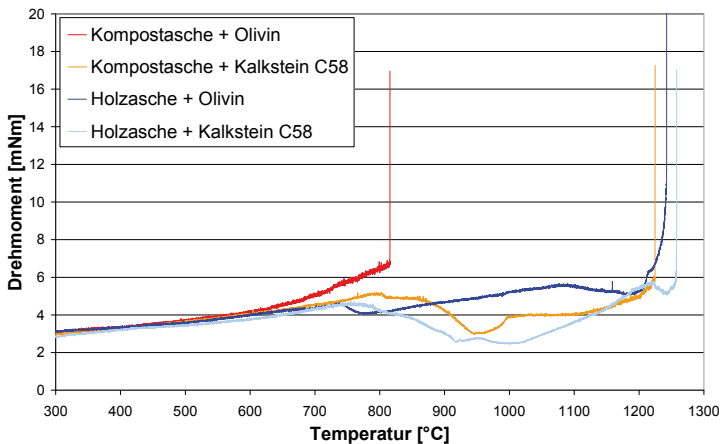


Abbildung 2: Drehmoment in Abhängigkeit der Temperatur für eine Mischung aus Kompost- bzw. Holzasche jeweils mit Olivin und Kalkstein.

Es ist zu erkennen, dass bei Holzasche in Kombination mit beiden untersuchten Bettmaterialien der Ascheerweichungspunkt oberhalb von 1200 °C liegt. Dies trifft auch auf die Ascheerweichungstemperatur der Mischung von Kompostasche und Kalkstein zu. Allerdings tritt in Kombination mit Olivin die Ascheerweichung von Kompostasche bereits bei Temperaturen von etwa 800 °C auf. Die Ascheerweichungstemperatur von Kompostasche liegt also in der Mischung mit Kalkstein etwa 400 °C höher als mit Olivin, d.h. die Verwendung von Kalkstein als Wirbelschichtbettmaterial führt im Vergleich zu Olivin beim Einsatz von mineralstoffreicher Biomasse (vgl. Werte für Kompost Tabelle. 2) zu einer deutlichen Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur. Zur Validierung dieses Effekts wur-

den weitere rheologische Untersuchungen mit Strohasche durchgeführt, da Stroh aufgrund seines hohen Ascheanteils ebenfalls als kritischer biogener Brennstoff bei der thermochemischen Umwandlung gesehen wird. Die Untersuchungen zeigten, dass sich die Ascheerweichungstemperatur bei Einsatz von kalksteinbasiertem Bettmaterial im Vergleich zu Olivin ebenfalls deutlich erhöhte. So lag die beobachtete Ascheerweichungstemperatur für die Asche eines Mischbrennstoffs aus 80 % Holz und 20 % Stroh im Fall von Olivin bei 860 °C. Bei der Untersuchung von reiner Strohasche setzte das Agglomerationsverhalten bereits bei 760 °C ein. Im Vergleich dazu konnte bei Verwendung von Kalkstein als Bettmaterial keine Ascheerweichung für Strohasche unterhalb von 1200 °C festgestellt werden (s. Tabelle 3).

Tabelle 3: Gemessene Abbruchtemperaturen für verschiedene Biomasseaschen in Kombination mit Olivin und Kalkstein

Bettmaterial	Asche aus Biomasse			
	Holz	Holz/Stroh 80/20	Kompost	Stroh
Olivin	>1.200 °C	860 °C	815 °C	760 °C
Kalkstein	>1.200 °C	>1.200 °C	>1.200 °C	>1.200 °C

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Verwendung von Olivin als Wirbelschicht-Bettmaterial bereits bei geringen Anteilen mineralstoffreicher Biomassen Agglomerationen im Temperaturbereich <900 °C auftreten können. Bei den rheologischen Untersuchungen in Kombination mit Kalkstein lag die Ascheerweichungstemperatur in allen Fällen oberhalb von 1200 °C, was auf den hohen CaO-Anteil des Kalksteins zurückzuführen ist. Auf Basis der erzielten Rheometerergebnisse konnten keine Agglomerationen im Versuchsbetrieb des IFK erwartet werden.

Experimentelle AER-Untersuchungen zur Brennstoff-Flexibilisierung am IFK

Die Untersuchungen zur Vergasbarkeit der ausgewählten Brennstoffe wurden unter AER-Bedingungen an einer 20 kW_{th}-stationären Wirbelschichtversuchsanlage in semi-Batch-Versuchen durchgeführt. Die Wirbelschichtversuchsanlage am IFK besteht aus einem 3,5 m hohen, elektrisch beheizten Vergaser mit einem Innendurchmesser von 11,4 cm, ausgeführt als stationäre Wirbelschicht (schematische Darstellung in [3]). Die Versuchsanlage ist mit Druck und Temperatursensoren ausgestattet, um den Versuchsbetrieb zu überwachen und zu steuern. Mittels einer Brennstoffdosiereinrichtung und einem Dampferzeuger werden Brennstoff und Dampf dem Vergaser zugeführt. Das wasserstoffreiche Produktgas des Vergasers wird nach dem Freeboard mittels zweier Zykloone und einem Kerzenfilter von Partikeln gereinigt und analysiert, bevor es einer Produktgasfackel zugeführt wird. Die Gehalte an CO, CO₂, CH₄, H₂ und O₂ werden während dem Versuch kontinuierlich gemessen. Neben den nicht-kondensierbaren Hauptkomponenten werden quasi-kontinuierlich die nicht-kondensierbaren Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) im Vergasungsgas mittels eines Mikrogaschromatographen (GC) erfasst. Die Bestimmung der Teergehalte im Produktgas erfolgt nasschemisch nach den Empfehlungen der europäischen Teer-Richtlinie [4]. Zur Messung des gesamten, bei der Vergasung entstehenden Produktgasvolumenstroms wird das Produktgas über einen Kondensator und einen Filter zu einer Gasmessuhr geleitet, bevor es anschließend zur Fackel strömt.

Die Vergasungsexperimente unterteilen sich in zwei Versuchsphasen. In Phase I wurden die Biomassen unter einheitlichen Semi-batch-Bedingungen vergast mit dem Ziel die Gaszusammensetzung und die Gasausbeute zu erfassen. Das dabei entstandene Bettmaterial-Koksgemisch wurde nach dem Versuch gesammelt und in Phase II weiteruntersucht. Dabei wurde das Bettmaterial-Koksgemisch kontinuierlich in der Wirbelschichtversuchsanlage verbrannt bzw. das Bettmaterial regeneriert. Das Ziel hierbei war etwaiges Aufschmelzen der Aschen zu beobachten und verschiedene Verbrennungstemperaturen und Luftzahlen zu untersuchen, um das Abbrennverhalten des Kokes zu beurteilen. Als Bettmaterial kam bei den Versuchen ein CaO-Bettmaterial mit einem Partikeldurchmesser von 300-600 μm und einem CaO-Gehalt von 96 Ma.-% zum Einsatz.

Während der Vergasungsexperimente in Versuchsphase 1 konnten folgende Beobachtungen gemacht werden: Alle Brennstoffe konnten in einem stabilen AER-Anlagenbetrieb bei ca. 655 °C vergast werden. Es gab aufgrund der Brennstoffvorbehandlung weder Probleme mit der Dosierung noch mit dem Fluidisierungsverhalten. Weiterhin konnte keine Ascheaufschmelzung oder Agglomeration im Vergaser beobachtet werden. Alle untersuchten Brennstoffe wiesen ein sehr ähnliches Ergebnis im Bereich der trockenen Produktgaszusammensetzung für die nichtkondensierbaren Gaskomponenten auf (vgl. Abbildung 3). Die Wasserstoffkonzentration lag im Bereich von 75-83 Vol.-%.

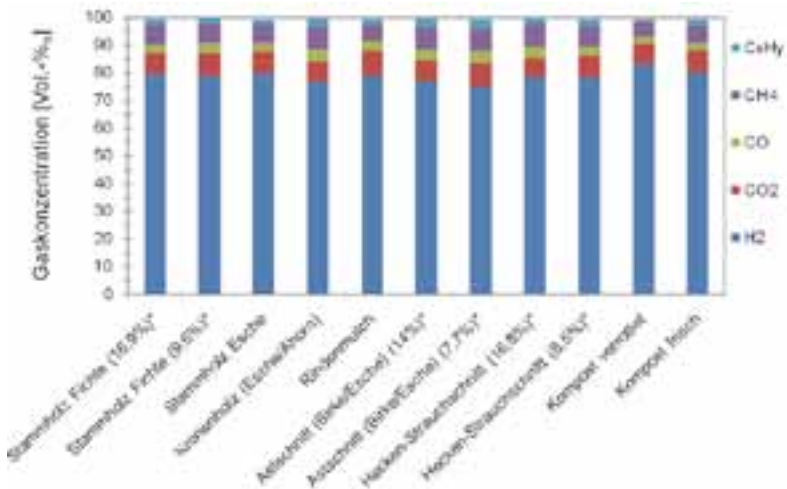


Abbildung 3: Produktgaszusammensetzung für die nichtkondensierbaren Gaskomponenten. (*Wassergehalt Versuchstag 1 / Versuchstag 2)

In Abbildung 4 sind neben den Ergebnissen der Produktgasheizwerte auch die Ergebnisse der Produktgasausbeute bezogen auf den wasser- und aschefreien Brennstoffeintrag sowie die Produktgasausbeute bezogen auf den Brennstoffeintrag im Rohzustand dargestellt. Die Produktgasausbeute bezogen auf den wasser- und aschefreien Brennstoffeintrag ist für alle untersuchten Brennstoffe in einem sehr engen Bereich und liegt im Mittel bei $0,79 \text{ m}^3_{\text{i.N.}}/\text{kg}_{\text{Br,waf}} \pm 5\%$. Einzig die erhöhte Produktgasausbeute des Stammholz-Esche-Versuchs zeichnet sich von den anderen Ergebnissen ab. Der Produktgasheizwert lag zwischen $12\text{-}14 \text{ MJ}/\text{m}^3_{\text{i.N.}}$.

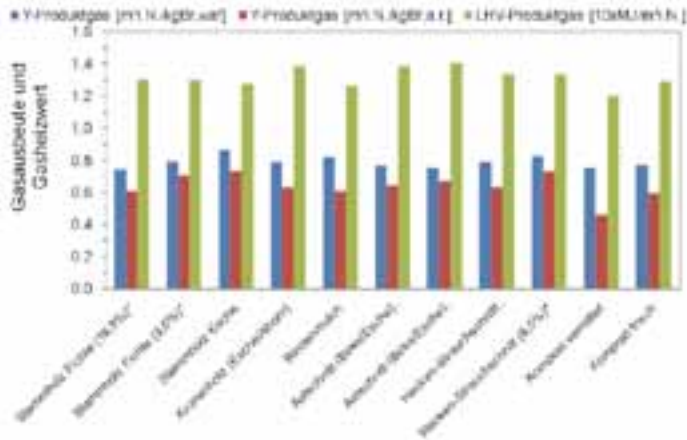


Abbildung 4: Produktgasausbeute und -gasheizwert (*Wassergehalt Versuchstag 1 / Versuchstag 2).

In Abbildung 5 sind die gravimetrischen, GCMS und maximalen Teerausbeuten dargestellt. Die Teerausbeuten liegen speziell für die gravimetrischen Teerkonzentrationen in einem sehr ähnlichen Bereich von $15,4 \text{ g/kg}_{\text{Br,waf}} \pm 4 \%$. Das niedrige Stammholz-Esche-Ergebnis für die Teerausbeute hebt sich jedoch gegenüber den restlichen Untersuchungen ab. Demgegenüber steht die auffällig hohe Teerausbeute bei der Vergasung von Astschnitt. Die GCMS-Teere liegen leicht unter den gravimetrischen Teeren bei $13,6 \text{ g/kg}_{\text{Br,waf}}$ mit einer Schwankung um den Mittelwert von ca. 9 %. Die GCMS-Teere setzen sich dabei zu ca. 70 % aus der Teerklasse 2 und 3 (heterozyklische- und karbozyklische Aromate mit einem Ring: Pyridin, Phenol und Toluol) zusammen, während die restlichen Teerbestandteile vorwiegend aus der Teerklasse 4 PAH (polyzyklische Aromate: Naphthalin, Phenanthren und Inden) stammten [5].

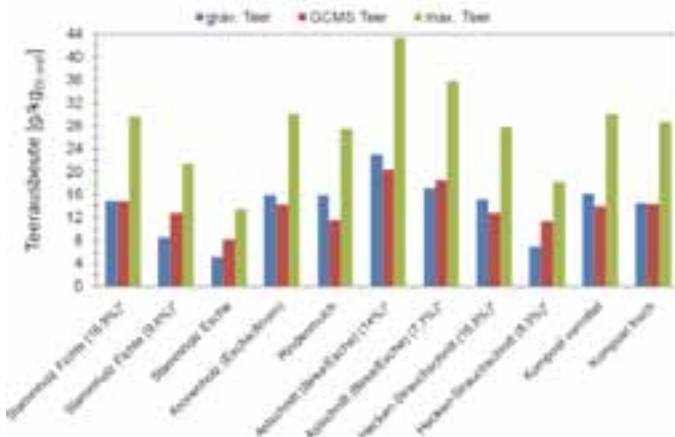


Abbildung 5: Teerausbeute (*Wassergehalt Versuchstag 1 / Versuchstag 2)

Innerhalb der getätigten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Brennstoffe mit einem höherem Cellulose- und Aschegehalt zu höheren H_2 -Konzentrationen und niedrigeren CO - und CH_4 -Konzentrationen sowie niedrigeren Teerausbeuten neigen. Eine Siebanalyse der Bettproben ergab nach der Verbrennung/Regeneration keine signifikante Veränderung der mittleren Partikelgröße für alle untersuchten Bettproben. Auch ein Ascheaufschmelzen bzw. eine Defluidisierung konnte während der Versuchsdurchführung, mit einer durchschnittlichen Versuchszeit von 30 min, nicht beobachtet werden.

Zusammenfassung und Fazit

Bei den rheologischen Vorversuche am ZSW wurden bei Olivin bereits in der Mischung mit geringen Anteilen mineralstoffreicher Biomassen Agglomerationen im Temperaturbereich $<900\text{ }^\circ\text{C}$ beobachtet, welche in einer Wirbelschicht zu Betriebsstörungen führen können. Bei den Untersuchungen in Verbindung mit Kalkstein als Wirbelschicht-Bettmaterial konnten Agglomerationen nur oberhalb $1.200\text{ }^\circ\text{C}$ beobachtet werden, was auf eine deutliche Erhöhung der Ascheerweichungstemperatur durch das beim AER-Prozess verwendete Bettmaterial schließen lässt. Die Ergebnisse der Rheometerversuche ließen somit keine Agglomerationen in den experimentellen Untersuchungen am IFK erwarten. Dies konnte bei den Untersuchungen in der 20 kW_{th} -Laborwirbelschichtanlage des IFK nachgewiesen werden. Gleichzeitig wurde für alle eingesetzten Biomassen eine hohe Produktgasqualität und –ausbeute beobachtet, wodurch der experimentelle Nachweis der Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomassen bei der AER-Biomassevergasung im Labormaßstab erbracht werden konnte.

Die Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomasse bei der AER-Biomassevergasung ermöglicht die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe wie SNG aus biogenen Reststoffen. Somit ist unabhängig vom Anbau von Nahrungsmitteln und der damit verbundenen Tank-Teller-Diskussion ein Beitrag zum Klimaschutz und der Energiewende möglich. Gleichzeitig können zusätzliche Biomassepotentiale zur Erzeugung von regenerativen Energieträgern erschlossen werden.

Danksagung

Die experimentellen Untersuchungen zur Brennstoff-Flexibilisierung wurden im Rahmen des Projekts „FuE-Plattform "BtG" – Energetische Nutzung biogener Reststoffe mit AER-Technologie“ vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (AZ: 4-4587.2-155) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (FKZ: 03KB011) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Abkürzungen	Bedeutung
GCMS Teer	Mit Gaschromatographie-Massenspektrometer bestimmter Teer
grav. Teer	Gravimetrisch bestimmter Teer
max. Teer	GCMS Teer + grav. Teer
LHV	Unterer Produktgasheizwert ($\text{MJ} / \text{m}^3_{\text{i.N.}}$)
Y-Produktgas	Produktgasausbeute ($\text{m}^3_{\text{i.N.}} / \text{kg}_{\text{Br,waf}}$)

Indizes	Bedeutung
a.r.	im Rohzustand
waf	wasser-und aschefrei
tr	trocken
th	thermisch
Br	Brennstoff
i.N.	im Normzustand

Literatur

- [1] Specht et al. (2011): Storing Renewable Energy in the Natural Gas Grid - Methane via Power-to-Gas (P2G): A Renewable Fuel for Mobility", Proceedings of the 6th Conference "Gas Powered Vehicles - The Real and Economical CO₂-Alternative", Stuttgart, Germany, October 2011.
- [2] Brellocks et al. (2009): Stiochiometry Adjustment of Biomass steam gasification in DFB Process by in situ CO₂ Absorption, Int. Conference on Poly-Generation Strategies, Vienna, Austria, September 2009.
- [3] Poboß, N.; Zieba, M.; Scheffknecht, G. (2010): Wasserstoffherzeugung aus Biomasse mittels einer adsorptionsunterstützten Reformierung in einer dual zirkulierenden Wirbelschichtanlage, ERDÖL ERDGAS KOHLE 126. Jg. 2010, Heft X.
- [4] Tar Guidline: CEN/BT/TF 143, 2004: Biomass Gasification - Tar and Particles in Product Gases - Sampling and Analysis.
- [5] Thersites the ECN tar dew point site. URL: <http://www.thersites.nl/classification.aspx> (Stand: 31.01.2012).

Meilenstein bei der elektrischen Effizienz - der TurboHPR

Markus Stemann

Adresse: h s energieanlagen gmbh
Am Lohmühlbach 21, 85356 Freising
E-Mail: markus.stemann@hsenergie.eu

Abstract

Die Vergasung eröffnet dem festen Brennstoff „Biomasse“ den Zugang zu einer effizienten Stromerzeugung durch den Einsatz von Kraftmaschinen mit hohen elektrischen Wirkungsgraden. Allerdings ist der endotherme Vergasungsprozess selbst mit Verlusten behaftet.

Der h s energieanlagen gmbh ist es durch eine prozesstechnische Integration des Vergasers mit der für die Stromerzeugung eingesetzten Gasturbine gelungen, den Vergasungswirkungsgrad auf nahezu 1 anzuheben, was bedeutet, dass der Gesamtwirkungsgrad der Anlage weitgehend dem einer mit Erdgas betriebenen entspricht.

Die Integration von Gasturbine und Vergaser besteht darin, dass die für eine allotherme Wasserdampfvergasung benötigte Wärme nicht mehr in einer separaten Festbrennstoffbrennkammer erzeugt und dem unter Druck betriebenen Vergasungsraum zugeführt wird, sondern der Brennkammer der für die Stromerzeugung eingesetzten Gasturbine entnommen wird. Hierzu wird ein Teilstrom an verdichteter Luft mit dem unter Druck erzeugten Produktgas verbrannt und damit die Wirbelschicht beheizt, in welcher der Vergasungsprozess stattfindet. Da diese Verbrennungsgase mit dem erzeugten Produktgas der Gasturbinen-Brennkammer zugeführt und in der Turbine entspannt werden, tragen sie zur Stromerzeugung bei. Dies bedeutet, dass der elektrische Wirkungsgrad dem der Gasturbine entspricht und somit dem einer Anlage, die mit Erdgas betrieben wird.

Da diese Wirkungsgradsteigerung durch eine Systemvereinfachung, d.h. durch den Wegfall von Komponenten erreicht wird, was die Anlagenkosten senkt, wird die Rentabilität zusätzlich zu der durch die Wirkungsgradsteigerung verbessert.

Am Beispiel einer derzeit in der Abwicklung befindlichen Anlage – einem TurboHPR T300 – auf der Basis von Holzhackgut mit einer elektrischen Leistung von 1.000 kW_{el} und einer Wärmeleistung von 1.500 kW_{th} zur Versorgung eines Nahwärmenetzes, wird der technische Aufbau der Anlage sowie die Wirtschaftlichkeit erläutert.

Ebenso wird kurz auf das Forschungsvorhaben zur Vergasung von Klärschlamm und Abtrennung von Wasserstoff aus dem Produktgas eingegangen.

Schlagwörter: Wirbelschicht, Wasserdampfvergaser, Effizienzsteigerung, Gasturbine, Heissgasreinigung, TurboHPR

Aufgabenstellung

Biomasse ist eine nachwachsende, also nachhaltig verfügbare Energiequelle; sie ist jedoch in der Menge, d.h. in der maximal realisierbaren Leistung begrenzt. Zu fordern ist daher eine möglichst effiziente Nutzung, z.B. in Kraft-Wärme-Kopplung mit möglichst hohem elektrischem Wirkungsgrad.

Betrachtet man vor diesem Hintergrund das Wirkungsgradpotential der verfügbaren Prozesse für die Stromerzeugung (Abbildung 1), so wird deutlich, dass sich mit gasförmigen Brennstoffen höhere Wirkungsgrade realisieren lassen, als dies mit Festbrennstoffen der Fall ist. Eine Vergasung eröffnet daher der Biomasse den Zugang zu einer effizienteren Stromerzeugung.

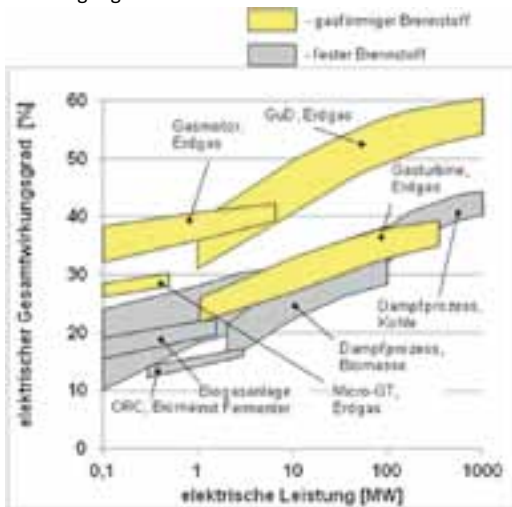


Abbildung 1: Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung.

Allerdings ist der Vergasungsprozess selbst durch die Bereitstellung der für die Vergasung erforderlichen Wärme mit Verlusten behaftet.

Die Forderung ist daher, den Vergasungsprozess möglichst verlustfrei zu gestalten.

Vergasungsverfahren und Schwachstellenanalyse

Das Konzept des Heatpipe-Reformers zur allothermen Vergasung von Biomasse wurde am Lehrstuhl für Thermische Kraftanlagen der TU München entwickelt und dann von „h s energieanlagen gmbh“ bis zur Marktreife gebracht. Es basiert auf folgenden Überlegungen:



erprobte Schlüsselkomponenten für den TurboHPR:

- Brennstoffeintrag gegen 5 bar Druck
- Produktgasfilter bei 400 °C
- allotherme Wasserdampfvergasung in einer Wirbelschicht
- Betrieb einer Gasturbine mit Produktgas
- Betriebsfälle (z.B. An- und Abfahren)
- Sicherheitskonzept



Abbildung 3: Pilot- und Demonstrationsanlage Heatpipe-Reformer.

Eine Schwachstellenanalyse hinsichtlich der bei einem solchen Konzept auftretenden Energieverluste führt zu folgenden Aussagen (Abbildung 4):

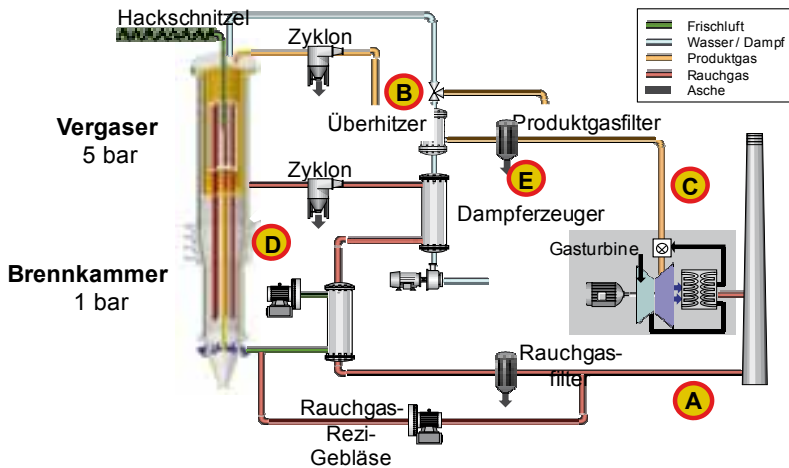


Abbildung 3: Schwachstellenanalyse Heatpipe-Reformer.

ten atmosphärisch betriebenen Brennkammer – zur Stromerzeugung bei. Durch diese verfahrenstechnische Kopplung des Vergasers mit der Gasturbine wird es möglich, den Vergaser mit einem Heißgaswirkungsgrad von näherungsweise „1“ zu betreiben. Damit weist der Gesamtprozess einen Wirkungsgrad auf, der dem einer mit Erdgas betriebenen Anlage weitgehend entspricht.

Dies lässt sich an einem Vergleich der Energieströme beim Heatpipe-Reformer und dem TurboHPR veranschaulichen (Abbildung 6).

Beim Heatpipe-Reformer wird die Biomasse zu ca. 70 % dem Vergaser direkt zugeführt, die restlichen 30 % der Brennkammer. Von diesem Anteil gelangen nur etwa 5 % über die Heatpipes in den Vergaser und tragen direkt zur Stromerzeugung bei. Dies bedeutet, dass nur 75 % der insgesamt der Anlage zugeführten Brennstoffenergie in der Gasturbine genutzt werden.

Beim TurboHPR dagegen wird die gesamte Biomasse dem Vergaser zugeführt. Ein Teil dieses Energieinhalts deckt den Wärmebedarf der endothermen Vergasungsreaktionen und erhöht die chemisch gebundene Energie des Synthesegases. Der hierfür nicht genutzte Energieanteil trägt, da die Reaktionen bei Vergaserdruck ablaufen, zur Stromerzeugung in der Gasturbine bei. Dies bedeutet, dass beim TurboHPR 97 % des Energieinhalts der Biomasse in der Gasturbine umgesetzt werden, während es beim Heatpipe-Reformer nur etwa 75 % waren.

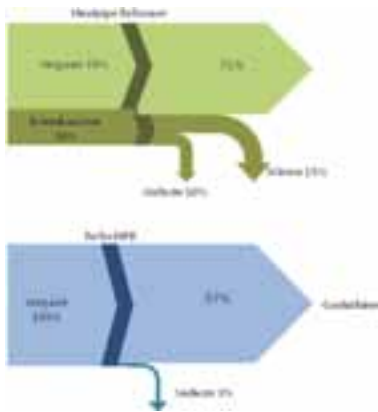


Abbildung 5: Energieflussdiagramm Heatpipe-Reformer vs. TurboHPR.

Beim TurboHPR entfällt somit nicht nur die Festbrennstofffeuerung, die Heatpipes und die zur Nutzung der Abwärme erforderlichen Apparate des BioHPR, sondern auch die dort entstehenden Verluste. Der elektrische Wirkungsgrad des BioHPR der Leistungsklasse 250 kW_{el} steigt hierdurch von 22 % beim TurboHPR auf 30 %.

Die mit dem TurboHPR-Konzept erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade sind in Abbildung 8 für den Einsatzstoff Holzhackgut in das bereits in Abbildung 1 gezeigte Wirkungsgraddiagramm eingetragen.

Die Vereinfachung des Vergasungsreaktors und der Wegfall der Heatpipes erlauben nun auch den Bau größerer Leistungseinheiten. Die zurzeit in Betracht

gezogenen Leistungsgrößen zeigt Tabelle 1. Der elektrische Wirkungsgrad wird dabei durch die zur Verfügung stehenden Gasturbinen bestimmt, wobei bevorzugt Rekuperationsgasturbinen wegen des höheren Wirkungsgrades und des niedrigen Brennkammerdrucks, der wiederum den Druck im Vergaser bestimmt, eingesetzt werden.

Tabelle 1: Leistungsgrößen TurboHPR

		T075	T300	GuD*
Brennstoffleistung	kW	825	3.300	2 x 7.000
Elektrische Leistung	kW	250	1.000	5.600
Thermische Leistung	kW	375	1.500	5.600
Elektr. Wirkungsgrad	----	30	30	40
Gesamtwirkungsgrad	----	75	75	80

*in Planung

Zu bemerken ist, dass bei Gasturbinen – anders als bei einem Dampfprozess – der elektrische Wirkungsgrad nicht von einer Nutzung der Abwärme beeinflusst wird. Dadurch ist es bei größeren Leistungseinheiten möglich, das Wirkungsgradpotential durch einen Nachschaltprozess, z.B. als gekoppelten Gas- und Dampfturbinenprozess (GuD), deutlich zu verbessern. Wirkungsgrade über 40 % sind dann realisierbar (Abbildung 8).

Darüber hinaus erlaubt die Erzeugung von Überschussgas für weitere Gasturbinen oder auch für einen Brenner zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme eine Anpassung an den kunden-spezifischen Bedarf (Abbildung 7).

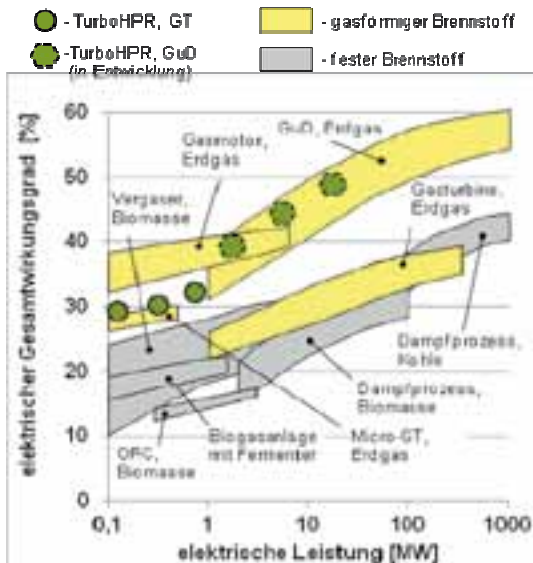


Abbildung 6: Wirkungsgrade.

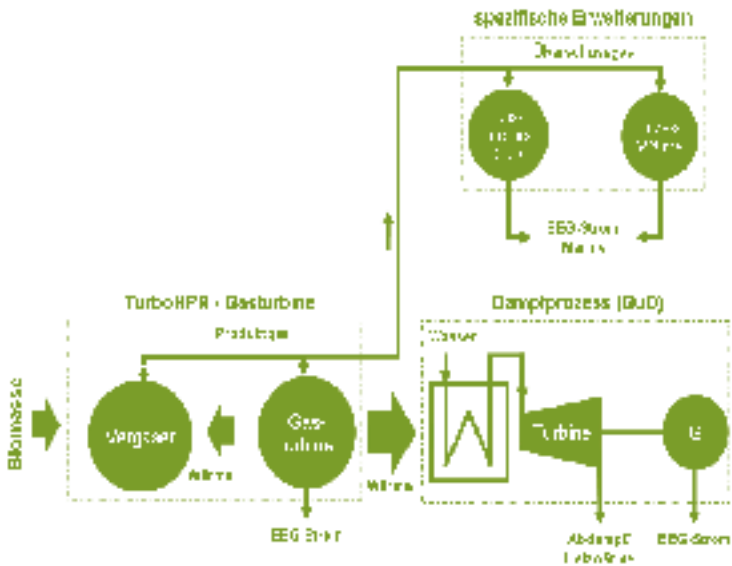


Abbildung 7: Variables Systemdesign.

Ausführungsbeispiel: TurboHPR T300

Im nachfolgenden Beispiel sollen für ein Nahwärmenetz 75.000 MWh/a bei einem maximalen Leistungsbedarf von 1.500 kW_{th} effizient und wirtschaftlich in Kraft-Wärme-Kopplung aus Holzhackgut bereitgestellt werden.

Dieser Bedarf kann mit einem TurboHPR T300 gedeckt werden (Daten siehe Tabelle 1).

Den Aufbau der Anlage und die Hauptabmessungen zeigt Abbildung 9. Bei dieser Leistungsgröße besteht der TurboHPR aus einem Vergaser und einem Kerzenfilter, in dem das Gas bei 400 °C von Asche- und Restkohlenstoffpartikel abgereinigt wird. Danach wird das Gas auf vier Gasturbinen verteilt, die zusammen eine Leistung von 1.000 kW_{el} abgeben. Jeder Gasturbine ist ein Fernwärmetauscher zur Wärmeauskopplung für das Nahwärmenetz nachgeschaltet. Nur eine der Gasturbinen ist verfahrenstechnisch so mit dem Vergaser gekoppelt, dass rezirkuliertes Produktgas mit einem Teilstrom an verdichteter Luft reagiert und die für den endothermen Vergasungsprozess erforderliche Wärme bereitstellt. (Abbildung 9 und Abbildung 10)

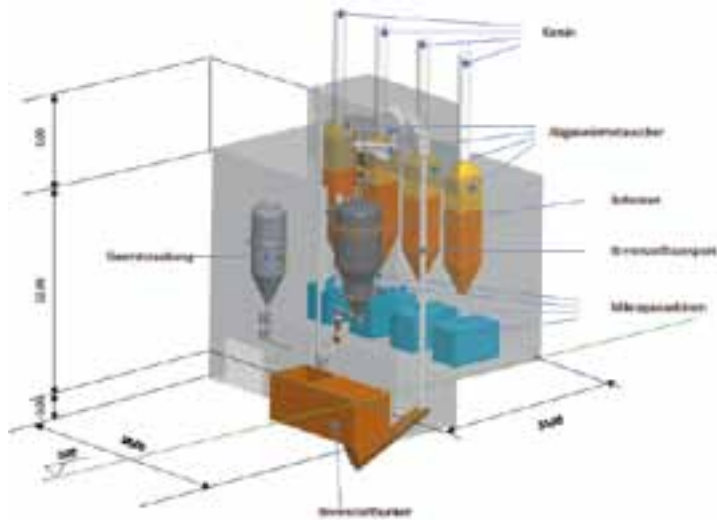


Abbildung 8: Aufbau und Abmessungen (1 MWel).

Aufgrund des hohen elektrischen Wirkungsgrades trägt die Stromerzeugung den wesentlichen Beitrag zu einer kurzen Amortisationszeit bei. Die für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067 herangezogenen Daten für Kapital, Verbrauch und Betrieb sind für einen Standort in Deutschland in Tabelle 2 zusammengestellt.



Abbildung 9: Anlage "Holzenergie Sarnthein" (Fotomontage).

Tabelle 2: Daten zur Wirtschaftlichkeit

Kosten der Anlage	5.0	Mio €	
Eigenkapitalquote	20	%	
Elektr. Leistung	1.000	kW	7.500 h
Therm. Leistung	1.500	kW	5.000 h
Brennstoff: Hackschnitzelkosten	70	€/t	G 50, W 35
Vergütung:			
- Strom	17,6	ct/kWh	EEG EK 1
- Wärme	5,0	ct/kWh	
Kosten:			
- Kapital	518.000	€/a	
- Verbrauch	561.000	€/a	
- Betrieb	240.000	€/a	
- Sonstige	55.000	€/a	
Gesamt	1.374.000	€/a	
Einnahmen:			
- Strom	1.320.000	€/a	
- Wärme	375.000	€/a	
Gesamt	1.695.000		
Kennzahlen:			
- Überschuss	321.000	€/a	
- Rendite	6,45	%	
- Break-Even-Point	6,9	a	
- Eigenkapital, Amortisation	3,1	a	

Die Berechnungen ergeben bei einer Gesamtinvestition von 5.000.000 € und Brennstoffkosten von 70 €/t für das Holzhackgut sowie einer Vergütung von 17,6 ct/kWh (EEG EK 1) für den Strom, einen Jahresüberschuss von 321.000 €/a und damit eine Amortisationszeit von 6,9 Jahren.

Interessant ist ein Vergleich der Gestehungspreise für die benötigte Wärme, erzeugt mit einer reinen Heizanlage mit den Brennstoffen Heizöl, Holzhackgut und einer KWK-Anlage auf Basis des TurboHPR. Zur Bestimmung des Wärmepreises beim reinen Heizwerk werden alle anfallenden Kosten während der Betriebszeit von 5.000 h auf die erzeugte Wärmemenge umgelegt; beim TurboHPR werden von den Gesamtkosten für die Betriebszeit von 7.500 h die Stromerlöse abgezogen und dann der Wärmepreis (Nutzungsdauer 5.000 h) berechnet.

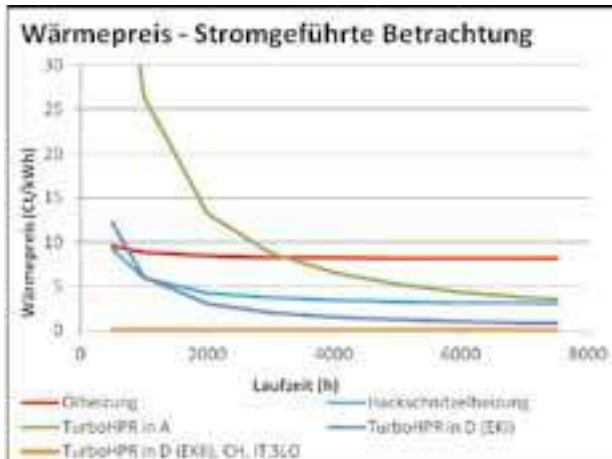


Abbildung 10: Vergleich mit alternativen Systemen.

Das Ergebnis dieses Vergleichs ist für die Länder Deutschland, Italien, Schweiz und Slowenien in Abbildung 11 dargestellt. Bei der Ölheizung verändert sich wegen der relativ geringen Investitionskosten der Gestehungspreis für die Wärme in Höhe von 8,5 ct/kWh kaum mit der Betriebszeit. Die Heizanlage mit Hackgut ist dazu im Vergleich stets günstiger. Der Wärmepreis sinkt bei einer Betriebszeit von 5.000 h von 8,5 ct/kWh bei Öl auf 3 Ct/kWh bei Holz.

Dagegen ändert sich der Wärmepreis beim TurboHPR auf Grund der im Vergleich hohen Investitionskosten stark mit der Betriebsdauer; trotzdem ist er in Deutschland bei Einsatz von Holz der Brennstoffqualität EK 1 (mit geringerer EEG-Vergütung) bereits nach 800 h günstiger als die Ölheizung, nach 1.000 h günstiger als die Hackschnitzelheizung. Bei Verwendung von Holz der Klasse EK 2 fällt die Wärme stets „kostenlos“ an, da die gesamten anfallenden Kosten bereits über die Stromerzeugung gedeckt werden.

Marktentwicklung

Aufgrund des einfachen Aufbaus der Vergasungseinheit, verbunden mit der Möglichkeit mit Hilfe der Wirbelschichttechnologie eine große Bandbreite an Brennstoffen einzusetzen, hat der TurboHPR mit seinem hohen elektrischen Wirkungsgrad das Potential, in weitere Marktsegmente einzudringen.

In Abbildung 12 sind die Intentionen zur Marktentwicklung hinsichtlich der Erweiterung der Brennstoffpalette und der Leistungsgröße dargestellt. Der derzeitige Bedarf resultiert aus der Nachfrage nach CO₂-frei erzeugter Heizwärme und aus dem Ersatz von reinen Heizwerken durch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

Danksagung

Die Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms spricht allen Beteiligten einen herzlichen Dank für das Gelingen der Konferenz aus!

Weitere Informationen: <http://www.energetische-biomassenutzung.de>

Hinweis zum Druck:

Unter Umständen sind einige Grafiken eingeschränkt lesbar.

Wir bitten bei Interesse, mit den Autoren in Kontakt zu treten.



www.energetische-biomassenutzung.de

ISSN: 2192-1806

Gefördert vom



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Ein Förderprogramm der



DIE BMU
KLIMASCHUTZ-
INITIATIVE

Koordiniert vom



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Wissenschaftlich
begleitet vom

