

# Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 der BFE-Programmleiterin

## Forschungsprogramm Biomasse & Holzenergie

Sandra Hermle

[sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)



### Laboranlage zur katalytischen hydrothermalen Vergasung

Am Paul Scherrer Institut in Villigen wird die katalytische hydrothermale Vergasung von Biomasse in einer kontinuierlichen Laboranlage mit einem Durchsatz von 1 kg/h untersucht. Typische Betriebsbedingungen sind 400 °C und 30 MPa.

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Biomasse bietet durch die Vielfalt an einsetzbaren Substraten (Holz, Gülle, Mist, organische Abfälle etc.) für die Energiegewinnung eine breite Palette an Nutzungsmöglichkeiten. Die Schwerpunkte der Forschung sind dabei klar definiert:

- Systemoptimierung und -integration
- Qualitätssicherung
- neue Verfahren und Technologien.

Im Bereich Holzenergie wurden im Jahr 2008 die Konversionstechnologien Verbrennung und Vergasung gefördert. Bei der Verbrennung galt es **Feinstaubemissionen zu reduzieren**, den **Jahresnutzungsgrad zu erhöhen** und für **Qualität sichernde Massnahmen** wie z.B. für Typenprüfungen neue Messverfahren zu entwickeln. Neue Technologien sollten dabei ebenso gefördert wie bereits bestehende optimiert werden. Die Reduktion von Emissionen kann sowohl mittels Primärmaßnahmen – sprich Verbesserung der Verbrennungstechnik – als auch mit

Hilfe von Sekundärmaßnahmen – dem Einsatz von Partikelabscheidern – gelöst werden. Bei der Vergasungsforschung stand die **Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades**, die **Rohgasreinigung** und die **Diagnostik** während des Vergasungsprozesses und bei der Gasaufbereitung im Vordergrund. Die **Entwicklung von Sicherheitsrichtlinien** bei der Anlagenkonstruktion waren genauso wichtig wie die **Förderungen von neuen Vergasungstechnologien** wie z.B. die Vergasung von feuchter Biomasse.

Im Bereich der übrigen Biomasse lag das Hauptaugenmerk auf der anaeroben Vergärung. Schwerpunkte waren bei dieser Technologie die **Verbesserung des biologischen Wirkungsgrades**, die **Optimierung der Wärmenutzung von Biogasanlagen**, die **Ermittlung von Emissionen** (Methan, Ammoniak, Lachgas) bei der Vergärung und Gasaufbereitung, **Schadstoffe in Kompost und Gärgut**, **Anaerobtechniken** zur Behandlung von Abfällen und kommunalen Abwässern.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

### Verbrennung

Bei der Verbrennungsforschung stand die ganze Prozesskette von der Holzgewinnung über die Verarbeitung bis zur Nutzung im Fokus. Holz als nachwachsender einheimischer Brennstoff erlebte in den letzten Jahren eine Renaissance und gerade Hackschnitzel und Pellets sind aufgrund von Komfortansprüchen sehr gefragt. Pellets lassen sich nicht nur aus Sägemehl herstellen, sondern auch aus Waldfrischholz. Es besteht ein grosses Interesse daran, den Wassergehalt des zu verarbeitenden Holzes auf natürlichem Weg möglichst stark zu reduzieren, damit der Brennwert des Holzes ansteigt. Im Projekt *Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald* [1] wurden eine Reihe von Lagerungsexperimenten durchgeführt, bei denen die Art der Lagerung, der Ort der Lagerung und der Schlagzeitpunkt variiert wurden. Ziel des Projektes war die Ermittlung der optimalen Lagerungsdauer und Lagerungsmethodik für frisch geschlagenes Holz im Wald und deren wirtschaftliche Folgen für die Pelletierung. Es zeigte sich, dass die ideale Erntezeit für Fichten 3–5 Monate beträgt, während die Buche nach 8–9 Monaten einen durchschnittlichen Wassergehalt von <35 % erreicht (Auslagerungsbeginn im Frühjahr). Grundsätzlich gilt, dass je dünner und kürzer die Rundhölzer sind, umso schneller trocknen sie. Auch eine Entrindung und eine trockene Unter-

lage wirken sich positiv auf die Trocknung aus. Eine Abdeckung der Polter lohnt sich erst 4–8 Monate nach der Poltererstellung, denn mit der Abdeckung kann auch langfristig ein Wiederanstieg des Wassergehaltes verhindert werden. Der Anfangswassergehalt der Stämme zeigte keine Korrelation mit dem Schlagzeitpunkt.

Bei der Nutzung der Holzenergie sind Pelletheizungen auf dem Vormarsch (Anzahl Pelletheizungen in der Schweiz 1990: 0; 2007: 12'690), jedoch sind die zahlreich vorhandenen Stückholzheizungen nicht zu vernachlässigen (Anzahl Stückholzheizungen in der Schweiz 1990: 689'184; 2007: 661'350). Ein zentrales Thema bei der Verbrennung ist die Feinstaubproblematik (siehe auch



Figur 1: Filter nach Beprobung einer handbeschiedten Holzheizung. (HSLU)

Schwerpunkte des Forschungsprogramms Biomasse [2]).

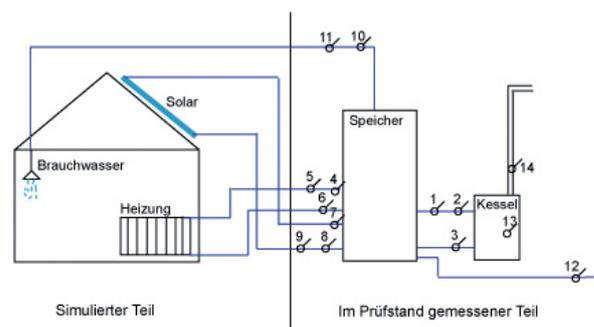
Sowohl bei Pellet-, als auch bei Stückholzheizungen und Holzöfen erweist sich besonders die Anfeuerungsphase als kritisch bezüglich Partikelemissionen. Das Projekt *Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW* [3] untersucht den Einfluss der Betriebsweise von Holzfeuerungen auf die Feinstaubemissionen (Figur 1). Ziel ist es, aus den Untersuchungen Konsequenzen für einen optimalen Betrieb sowie für Kontroll- und Vollzugsverfahren abzuleiten. Im Jahr 2008 wurden mehrere Holzöfen (handbeschickte Öfen und Pelletöfen) im Bioenergielabor der Hochschule für Technik und Architektur Luzern (HSLU) in Horw gemessen, wobei nebst der konventionellen gravimetrischen Staubmessung im Abgas auch Probenahmen der Kondensate sowie Bestimmungen der Anzahlkonzentrationen und Korngrössenspektren erfolgten. In diesem Projekt zeigt sich, dass die Anfeuerungsphase überproportional zu den Gesamtpartikelemissionen beiträgt, diese allerdings in den heutigen Typenprüfungen nicht eingeschlossen wird. Bei manuell betriebenen Holzöfen hängen die Partikelemissionen sehr stark von der Betriebsweise ab. Es konnte gezeigt werden, dass unter typischen Bedingungen hohe Konzentrationen von organisch kondensierbaren Verbindungen emittiert werden, welche mit den heutigen Messmethoden zur Typenprüfung nicht oder nur teilweise erfasst werden, aber durchaus gesundheitsrelevant sind. Ein Vergleich zwischen Emissionsverhalten mit Naturzug und mit konstantem Kaminzug (gemäss Bedingungen für die Typenprüfung) zeigte höhere Partikelemissionen in der Startphase beim Naturzug, jedoch gleiche Emissionsmengen in der stabilen Brandphase. Im Jahr 2009 liegt der Fokus auf Stückholzkesseln und Pelletfeuerungen. Abschliessend erfolgt eine zusammenfassende Auswertung mit der Ableitung von Empfehlungen und Schlussfolgerungen.

Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen steht das Projekt *Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase* [4]. Emissionsmessungen wurden sowohl am Ökozentrum Langenbruck, als auch an der HSLU in Horw an verschiedenen Holzfeuerungsstechnologien durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist mittels online Aerosolanalytik die Emissionen mit der in instationären Verbrennungsphasen notwendigen Zeitauflösung zu messen, um gezielt technische Verbesserungen an Feuerungen vorzunehmen. Es konnte gezeigt werden, dass die gravimetrischen Standard-Messungen (offline) der Partikelmasse von Holzfeuerungs-emissionen mit auf 150 °C erwärmten Filtern mit den online Messungen korrelieren, welche nach Verdünnung bei 150 °C gemessen wurde. Die online-Messungen zeigten insbesondere auf,

dass die Emissionsmenge bei Standard-Messungen stark davon abhängt, wann genau die Messungen begonnen werden. Wichtig ist auch die Tatsache, dass die Photochemie durch die Bildung sekundärer organischer Partikelmasse zu einer Verdoppelung, häufig sogar Verdreifachung der partikulären organischen Masse führt. Das bedeutet, dass nicht nur durch die direkten Emissionen, sondern auch durch die Bildung in der Atmosphäre zusätzlich viel Partikelmasse gebildet werden kann. Für 2009 sind weitere Messungen geplant.

Das Projekt *Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel* [5] beschäftigt sich mit der Konstruktion eines Prototyps. Ziel des Projektes ist die Reduktion von CO und Feinstaub in der Startphase bei Stückholzkessel. Das Ziel soll mit einer neuen Geometrie des Rostes, der Anpassung von Primär- und Sekundärluftzufuhr sowie einer einfachen Bedienungsprozedur erreicht werden. Geprüft wird auch die automatische Zündung des Brennstoffes. Im Laufe der Testmessungen an einem modifizierten Kessel hat sich gezeigt, dass die Form des Rostes eine zentrale Bedeutung für eine optimale Startphase hat. Die Rostform muss eine gute Luftverteilung sowie das sichere Ausbreiten des Feuers vom Zündzeitpunkt auf die ganze Rostfläche gewährleisten. Um den Einfluss diverser Parameter (Regel-Parameter, Anfeuerprozedur, Stückigkeit des Holzes) auf die Güte der Startphase zu ermitteln, sind im Jahr 2009 weitere Optimierungstests der Firma Salerno Engler GmbH zusammen mit der Lopper AG vorgesehen. In einem nächsten Schritt folgen dann Feldmessungen, um die Tauglichkeit der gewählten Lösung zu prüfen.

Ein zweiter wichtiger Forschungsbereich im Themenfeld Holzenergie ist neben den Emissionen die Erhöhung des Jahresnutzungsgrades mittels Systemoptimierungen. Am Institut für Solartechnik an der Hochschule für Technik in Rapperswil (SPF) läuft zurzeit das Projekt *PelletSolar-2 Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend*



Figur 2: Messstellenschema des Projektes PelletSolar-2. (SPF)

auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand [6].

Das Projekt hat die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren, zum Ziel (Figur 2). Im Vorgängerprojekt *PelletSolar-1* [7] konnte am Beispiel eines ausgewählten Pellet-Solar-Systems das Potenzial zur energetischen und der damit einhergehenden emissionstechnischen Optimierung von Pelletsystemen aufgezeigt werden. Der energetisch optimierte Betrieb wurde über eine verbesserte Regelungsstrategie und hydraulische Einbindung erzielt. Insbesondere liess sich die Frequenz von Start-Stop-Zyklen durch eine optimierte Betriebsführung stark reduzieren. Im Rahmen des Folgeprojekt *PelletSolar-2* wird nun die Allgemeingültigkeit dieser Resultate anhand von zwei weiteren Systemen geprüft. Neben der energetischen Optimierung umfasst *PelletSolar-2* auch die Bewertung von solarkombinierten Pelletsystemen aus emissionstechnischer Sicht. Hierzu werden die Emissionsfaktoren in Abhängigkeit des Betriebszustandes im Jahr 2009 ermittelt werden (HSLU; Projekt *Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen*). Zur Berechnung von Jahresemissionsfrachten werden die gemessenen Emissionsfaktoren ins Simulationsmodell integriert (SPF). Ziel dieses Projektes ist es, das Systemprüfverfahren für Pelletsysteme soweit zu entwickeln, dass Anbieter von Pelletsystemen allgemein die Möglichkeit haben, ihr System am SPF praxisnah testen zu lassen. Zurzeit werden die Daten des ersten gemessenen Kombisystems ausgewertet. Das zweite System soll im März 2009 gemessen werden. Im Zusammenhang mit den Arbeiten an *PelletSolar-2* konnte eine Zusammenarbeit mit dem österreichischen Forschungsinstitut ABC (Austrian Bioenergy Center) in die Wege geleitet werden, um gemeinsam eine neue Methode für das Prüfverfahren von Biomasse-Kleinfeuerungen zu entwickeln. Die neue Methode soll Anreize schaffen, die Qualität und Effizienz der geprüften Produkte zu verbessern (Projekt *SimPel: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Jahresnutzungsgraden von Biomasse-Kleinfeuerungen*).

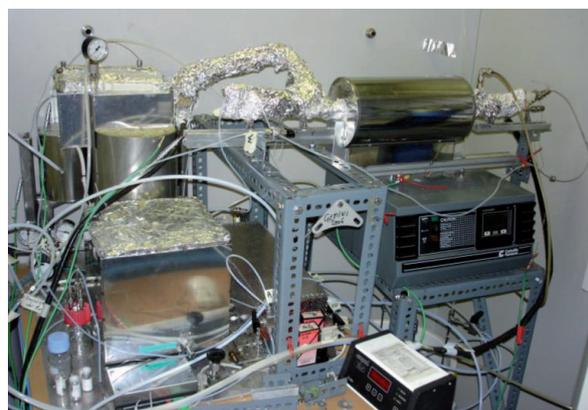
### Holzenergiesymposium 2008

Eine ideale Plattform, um sich über die neuesten Forschungsthemen auszutauschen ist das alljährlich stattfindende Holzenergiesymposium [8]. Dieses Jahr feierte dieses Symposium seine zehnjährige Auflage mit den Themenschwerpunkten Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Im ersten Teil wurden die ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen der Holzenergie diskutiert. Ausgehend von einer Übersicht zur Energiepolitik des Bundes wurden die Förderinst-

umente der Stiftung Klimarappen vorgestellt und von Prof. Dr. E. Jochem als Experten für Energieökonomie die Potenziale der Biomasse aufgezeigt. Im zweiten Teil wurden neueste Anwendungen zur Wärme- und Stromerzeugung aus Holz beschrieben. Nebst dem Holzkraftwerk Basel wurde die in Stans in Betrieb stehende Anlage mit Festbettvergasung erläutert. Im Weiteren wurden der Einsatz einer Heissluftturbine, die thermoelektrische Stromerzeugung in Pelletfeuerungen sowie die Möglichkeiten zur Strömungsoptimierung von Feuerräumen vorgestellt. Der dritte Teil war dem Thema Feinstaub und Luftreinhaltung gewidmet. Aufgabe der Technik ist es, die Feinstäube zu reduzieren. Allerdings stellt sich vorab die Frage, wie verschiedene Feinstäube auf unsere Gesundheit wirken, um daraus abzuleiten, welche Eigenschaften gemessen und welche Grenzwerte umgesetzt werden sollen. Diese Frage behandelte Frau Dr. R. Rapp, die sich als Fachärztin intensiv mit den Gesundheitswirkungen von Feinstaub befasst. Danach wurden neue Entwicklungen zur Feinstaubabscheidung vorgestellt und diskutiert, wie die Luftreinhaltevorschriften für solche Anlagen kontrolliert werden können.

### Vergasung

Die Rohgasreinigung stellt bei der Vergasungstechnologie einen wichtigen Prozessschritt dar. Aufgrund physikalischer Einschränkungen und der Tatsache, dass Gleichgewichtszustände der chemischen Gleichgewichtsreaktionen meist nicht erreicht werden, können auch bei höheren Vergasungstemperaturen und längeren Gasverweilzeiten im Reaktor nicht alle Produkte der pyrolytischen Zersetzung in  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und  $\text{H}_2$  konvertiert werden. Deshalb finden sich im Rohgas unterschiedliche Mengen verschiedener höher siedender Kohlenwasserstoffverbindungen. Je nach Vergasertyp, Vergasungsbedingungen und Art des eingesetzten Biobrennstoffs enthält das Rohgas zusätzlich noch unterschiedliche



Figur 3: Anlage für Experimente mit CPO-Katalysatoren im Mikro-Festbett. (PSI)

Mengen an Grob- und Feinpartikeln (d.h. Staub, Asche, Bettmaterial), Alkalien, Schwefel-, Halogen- und Stickstoffverbindungen. Um Erosionen, Korrosionen oder Ablagerungen in nachgelagerten Anlagenteilen und emissionsseitige Umweltbelastungen zu vermeiden, muss das Rohgas gereinigt werden.

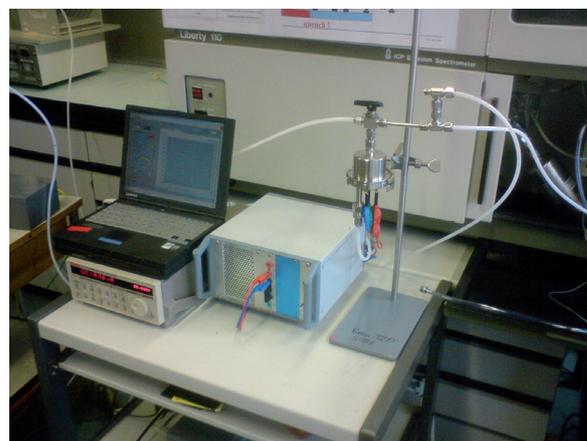
Mittels Feldmessungen an Versuchsanlagen und systematischen Experimenten in Mikroreaktoren werden zunächst die Anforderungen an die Reinigungsstufen überprüft. Hierzu ist der Aufbau einer optimalen Analytik zur quantitativen und qualitativen Bestimmung von Schwefelspezies im ppm-Bereich notwendig. Danach sollen mögliche Entschwefelungskatalysatoren und Absorbermaterialien getestet und die Betriebsparameter für das meist versprechende Konzept optimiert werden. Bis dato wurde der Gas-Chromatograph mit Schwefelluminiszenz-Detektor (GC/SCD) angeschafft und die Methoden weiter entwickelt. In einem nächsten Schritt wird die Methodenentwicklung abgeschlossen werden, um dann die Feldmessungen durchzuführen. Parallel dazu wurde mittels systematischer Experimente mit CPO-Katalysatoren (CPO: catalytic partial oxidation) in Mikroreaktoren die Aktivität des Katalysators bestimmt (Figur 3). Ebenfalls fanden Screening- Experimente mit HDS-Katalysatoren (HDS: Hydrodesulphurierung) und Hochtemperatur-Nickelkatalysatoren statt. Im nächsten Jahr sollen weitere Katalysatoren erprobt und die besten Kandidaten bestimmt werden.

Nicht nur holzige Biomasse ist für die Vergasungstechnologie geeignet, auch «nasse» Biomasse kann in ein Produktgas umgewandelt werden. Die katalytische hydrothermale Vergasung erlaubt die vollständige Umwandlung speziell von nasser Biomasse in Methan mit einem hohen Wirkungsgrad unter Rückgewinnung der Nährsalze. Dieses vom PSI entwickelte Verfahren wird im Projekt *Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse* [10] im Rahmen der Förderung neuer Vergasungstechnologien (gemäss Forschungsprogrammschwerpunkt s.o.) weiter erprobt. Ein Hindernis für die Umsetzung sind chemische Reaktionen von Salzen mit dem organischen Anteil der Biomasse, was zur Koksbildung und vorzeitiger, unerwünschter Gasbildung führen kann. Dadurch wird die Abscheidung der Salze erschwert und Anlagenteile können verstopfen. Ziel des Projektes ist einerseits die Untersuchung der chemisch-physikalischen Grundlagen dieser Reaktionen und andererseits die Erarbeitung chemisch-verfahrenstechnischer Massnahmen, um die Koksbildung zu vermeiden. Anhand der Umsetzung verschiedener organischer Modellsubstanzen mit unterschiedlichen Salzen soll

untersucht werden, welche chemischen Vorgänge bei der Verflüssigung von Biomasse und der anschliessenden Salzabscheidung ablaufen. 2008 wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Neben der Aufnahme von Temperaturprofilen im Erhitzer, Salzabscheider und Reaktor unter unterschiedlichen Bedingungen wurden Vergasungs- und Salzabscheidungsversuche mit wässrigen Glycerin- und Glycerin-Kaliumphosphatlösungen untersucht.

Als Katalysator wurde Ruthenium auf einem Kohlenstoffträger verwendet. Aus den Versuchen resultierte, dass die technische Konstruktion des Salzabscheiders noch nicht optimal ist, da die eingestellte Solltemperatur erst am Ende der Heizstrecke erreicht wird. Dieser Mangel kann aber teilweise durch eine Erhöhung der Erhitzer Temperatur kompensiert werden (Nachteil: Problem der Koksbildung). Wird statt Wasser Glycerin oder ein Glycerin-Salz-Feed eingesetzt, so verschieben sich die Temperaturprofilkurven des Salzabscheiders zu höheren Temperaturen. Auch die Temperaturprofile des Reaktors werden durch eine Umstellung des Feeds stark beeinflusst. Die Temperatur des Salzabscheiders beeinflusst die Reaktortemperatur, jedoch nicht anders herum. Die Vergasung einer Glycerinlösung ohne Salz konnte relativ problemlos in einem breit gefächerten Parameterspektrum realisiert werden. Bei der Zugabe von Kaliumphosphat kommt es bereits im Salzabscheider zu einer verstärkten Umsetzung von Glycerin unter Gasbildung; gleichzeitig geht aber die Bildung von teerartigen Substanzen im Vergleich zur Vergasung ohne Salz zurück. Nachteilig war die Deaktivierung des Katalysators nach ca. 80 Stunden Standzeit. Im Jahre 2009 wird der Fokus auf der systematischen Untersuchung der Reaktionen von biomasserelevanten Salzen mit organischen Molekülen im Hinblick auf die Koksbildung liegen.

Biomassen enthalten Spurenstoffe wie Alkalien, Schwermetalle, Schwefel, Halogene etc. Bei der



Figur 4: Versuchsanlage Ionisationsdetektor. (PSI)

Umwandlung von Biomasse zu Strom oder Syngas können die in Spuren vorhandenen Alkalien Anlageteile schädigen (Turbinen, Katalysatoren, Wärmetauscher, Brennstoffzellen) oder Prozessschritte verunmöglichen. Ziel des Projektes *Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online Messung von Alkalien in Prozessgasen* [11] ist die Entwicklung und Anwendung eines feldtauglichen Alkalidetektors zur kontinuierlichen Messung von Alkalien (Natrium, Kalium) in Prozessgasen (Figur 4).

In diesem Jahr wurden sowohl Messungen des Alkalidetektors gekoppelt mit einem Thermo gravimeter durchgeführt, als auch eine Testmessung mit einem verdünnten Produktgas des Holzvergasers am Paul Scherrer Institut (PSI). Bei den Versuchen zeigte sich, dass das Messsignal des bestehenden Detektors durch folgende Parameter beeinflusst wird: Grösse der Partikel, Geschwindigkeit des Gasflusses, Gaszusammensetzung. Auch traten während den Feldmessungen wiederholt Probleme durch Ablagerungen im Detektor auf, welche zu Kriechströmen führen können und ein künstliches Signal ergeben. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein neuer Detektor entworfen und gebaut, bei dem z.B. die Gasstromführung mit weniger Turbulenzen im Messbereich verbunden ist. Des Weiteren wurde ein gleichgerichteter Gasstrom mit der Flugbahn der Ionen realisiert, die Abdeckung des Strömungsquerschnittes durch das Filament wurde optimiert, die Distanz zwischen Filament und Detektor wurde variabel gestaltet und es wurde eine Heizung eingebaut, um Ablagerungen zu minimieren. Die letzten Schritte zur Vervollständigung des neuen Designs stehen in folgenden Bereichen an: die Reaktionszeit der Temperaturregelung des Filaments soll verkürzt werden, wodurch eine höhere Lebensdauer des Filaments zu erwarten ist. Weiter soll ein Konzept für die geplanten Koaxialanschlüsse ausgearbeitet und umgesetzt werden, um Fremdströme von der Messung auszuschliessen. Im Weiteren soll eine feldtaugliche Kalibrierungsmöglichkeit entwickelt werden. Parallel dazu soll auch die Beeinflussung des Signals durch Wasserstoff, Sauerstoff, Methan und Wasser untersucht werden.

### Anaerobe Vergärung

Obwohl seit über einem Jahrzehnt in der Schweiz feste biogene Kommunalabfälle vergoren werden, wurde noch nie der Wassergehalt und der Gehalt an organischer Substanz der Ausgangsmaterialien systematisch erfasst. Dies ist genau das Ziel des Projektes *Bestimmung der TS- (Trockensubstanzgehalt) und OS- (Gehalt an organischer Substanz) Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung* [12]. Die Untersuchungen sollen statistisch klar abgegrenzte

Bereiche für verschiedene Materialien wie Grün- gut, Haushaltsabfälle und Speisereste aus der Gastronomie liefern, wobei auch weitere Einflussfaktoren wie z.B. Wetterlagen berücksichtigt werden. Die Daten sollen Planungsgrundlagen liefern und unter anderem auch Klarheit verschaffen, mit welchen Werten im Fall der Erstellung von Ökobilanzen gerechnet werden kann. Mit dieser Studie konnte gezeigt werden, dass der TS-Gehalt stark von der Lage und dem Einzugsgebiet der Biogasanlage abhängt. In Städten und deren Agglomerationsgemeinden mit entsprechend viel Gewerbe- und Gastrobetrieben und verdichtetem Bauen in der Innenstadt, was zu einem kleineren Anteil des Gartenabbaus führt, liegt der TS-Gehalt des Eingangsmaterials bei nur rund 26–27 %. In Mittellandgemeinden mit ansässigen Gewerbe- und Gastrobetrieben kann mit einem mittleren TS-Gehalt von etwa 30–31 % gerechnet werden. Wenn aus dem Einzugsgebiet vorwiegend Küchen- und Gartenabfälle mit wenig Gastro- und Gewerbeabfälle angeliefert werden, erhöht sich der mittlere TS-Gehalt auf rund 33–34 %. Bei intensiv geförderter Einsammlung ohne Entsorgungsgebühr, ohne Gewerbe- und Gastroabfälle und grossem Anteil an Gartenbesitzern kann der mittlere TS-Gehalt des Inputmaterials auf rund 38 % ansteigen. Generell können die Eingangswerte innerhalb von Tagen und auch je nach Jahreszeit sehr stark schwanken. Während der Vegetationsperiode sind die TS-Eingangswerte im Durchschnitt um 5 % tiefer. Nasse Witterung scheint keinen sehr grossen Einfluss auf den TS-Gehalt zu haben. Bezüglich der Fragestellung des OS-Gehaltes liegt dieser bei Proben mit relativ viel Haushalts- und Gewerbeabfällen im Verhältnis zum Gartenabraum durchschnittlich bei rund 77 % der TS. Reine Gewerbe- und Gastroabfälle können aber ohne weiteres OS-Gehalte von über 90 % aufweisen. Der Kohlenstoffgehalt des Ausgangsmaterials liegt bei rund 40 % der TS.

Die im kommunalen Abwasser gespeicherte chemische Energie und die enthaltenen Rohstoffe wie Stickstoff und Phosphor werden derzeit in der Schweiz nur in geringem Masse genutzt. Im Rahmen der zukünftigen Planung und Erneuerung bestehender Anlagen soll eine weitaus bessere Effizienz erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen partiell neue Verfahren und Techniken sowie eine veränderte Biologie zum Einsatz kommen. In der Schweiz beruht die kommunale Abwasserreinigung meist auf der Belebtschlamm-Technologie. Der Energieaufwand der herkömmlichen Reinigung ist hoch, obwohl das Abwasser reichlich Energie in Form von organischem Kohlenstoff enthält, die nur teilweise genutzt wird. Ziel der Studie *Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz* [13] ist es, in Bezug auf

kommende Infrastruktur-Erneuerungen innovative und nachhaltige Ansätze zu evaluieren, diese in die künftige Anlagenplanung zu integrieren und dadurch eine optimierte energetische und stoffliche Bilanz zu erreichen. Besondere Aufmerksamkeit soll auf die anaerobe Behandlung, bzw. auf die Kombination von anaeroben und aeroben Verfahren und neuartigen Filtrationstechniken im Bereich der kommunalen Abwässer gelegt werden. Die wichtigsten Beurteilungskriterien dieser Studie sind ökologische und ökonomische Vorteile der Abwasserreinigung, die sich aus Energieeinsparung/Energieproduktion und einem besseren Recycling von Nährstoffen ergeben. Im Folgenden werden verschiedene technische Konzepte der Abwasserreinigung mit kombinierter Biogasproduktion evaluiert: 1. Verfahrenskombinationen mit Biogas-produzierendem Anaerobreaktor im Abwasser-Nebenstrom; 2. Verfahrenskombination mit Biogas-produzierendem Anaerobreaktor im Hauptabwasserstrom (sowie klassischer Schlammbehandlung). Die Vorteile der Variante 1, Vergärung im Nebenstrom, sind ein absolut pathogenfreier Abfluss und die Möglichkeit, im relativ kleinen anaeroben Reaktorvolumen thermophile Bedingungen zu erzeugen, was die Biogasausbeute und die Gasqualität fördert. Nachteile sind zu erwartende Probleme im Bereich der Abwasser-Membranfiltration wie «Fouling» und Biofilmbildung. Durch die zweistufige anaerobe Vergärung der Variante 2 ist ebenfalls eine gute Biogasausbeute zu erwarten. Ferner wird das Potenzial des Membranfouling-Problems aufgrund der anderen Beschaffenheit des



Figur 5: Bogensieb, ein Element des Membran-Bioreaktors. (Agrenum, Meritec)

zu filtrierenden Mediums hier nicht so hoch eingeschätzt. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass recht hohe Wassermengen durch den anaeroben Membranreaktor gepumpt werden müssen, wodurch die Membranflächen auf eine hohe hydraulische Belastung ausgelegt werden müssen, was die Kosten erhöht. Es gilt festzuhalten, dass für eine zukünftige, zeitgemäße Abwasserreinigung erhebliche Umstellungen und Investitionen notwendig sind. Es werden besonders Membrantechnologien in Betracht gezogen, die wesentliche Vorteile mit sich bringen, jedoch auch intensiveren Unterhalt beanspruchen. Es besteht noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der anaeroben Biologien sowie des Zusammenwirkens der verschiedenen Systemkomponenten.

Ebenfalls mit Membrantechnologien beschäftigt sich das Projekt *Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bioreaktor (MBR)* [14]. Bei konventionellen Biogasanlagen wird bei jeder Beschickung des Reaktors ein Teil der aktiven Bakterienmasse, als auch nicht vollständig vergorene Biomasse ausgeschwemmt. Das MBR-Verfahren verspricht gegenüber dem heute üblichen Rührkesselsystem den Rückhalt der aktiven Biomasse im Fermenter, die Trennung von hydraulischer Aufenthaltszeit und Schlammaufenthaltsdauer, die Entkeimung des Auslaufs aus dem Fermenter und die Möglichkeit eines schnelleren und vollständigeren Abbaus der organischen Substanz und damit eine höhere Effizienz der Vergärung (Figur 5). Des Weiteren besteht die Möglichkeit der gezielten stofflichen Weiterbehandlung. Die Kombination der energetischen und stofflichen Behandlung mit dem MBR und zusätzlicher Aufbereitung mittels Umkehrosmose lässt zusätzliche Vorteile, wie erheblich kleinere Lagervolumen und deutlich geringere Transport- und Ausbringkosten sowie hygienisch einwandfreie Düngerfraktionen erwarten.

Aufbereitete Düngerfraktionen lassen sich mit der Ammoniakstrippung zu einem Handelsdünger weiterbehandeln, wodurch auch die Abwärme genutzt wird. Im Projekt soll die Leistungsfähigkeit des MBR-Verfahrens (Raumbelastung, Gasausbeute, Gasqualität, hydraulische Verweildauer, Schlammaufenthaltsdauer etc.) genauer definiert und mit der konventionellen Vergärung verglichen werden. Die Wirtschaftlichkeit und die Implementierung des Systems sind weitere wichtige Punkte.

Ein wichtiger Punkt bei der Planung und der Konstruktion von landwirtschaftlichen Biogasanlagen stellt die Abwärmenutzung dar. Neben der benötigten Wärme zum Heizen des Fermenters der Vergärungsanlage (ca. 30 % der Bruttowärmeproduktion) sowie für die Warmwasseraufbereitung und das Heizen der Räume auf dem Hof, bleibt

meist ein grosser ungenutzter Wärmeanteil übrig. Ziel des Projektes *Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* [15] ist die Erstellung eines Instrumentariums, welches einem Biogasanlagenbetreiber bzw. -abwärmenutzer eine systematische Evaluation der optimalen Abwärmenutzung ermöglichen soll. Neben den Gestehungskosten, welche in einem wirtschaftlichen Bereich liegen müssen, ist dem Bewertungskriterium «Nutzungsgrad der Nettowärmeproduktion» sehr hohe Priorität beizumessen. In dieser Studie wurden 15 Abwärmenutzungsvarianten ausgewählt und mittels qualitativer und quantitativer Kriterien bewertet. Die Untersuchungen der Varianten hat gezeigt, dass höchste Nutzungsgrade erzielt werden können, wenn z.B. Winterbedarfsprofile mit Sommerbedarfsprofilen kombiniert werden können; konstante Bedarfsprofile mit einer Leistungskalierung von 100 % erschlossen werden können (vollständige Nutzung zur Verstromung mittels ORC-Prozess); konstante Bedarfsprofile als Sockellast mit weiteren Profilen kombiniert werden können etc. Es zeigte sich, dass der Trade-off zwischen den verschiedenen Kriterien ja nach Abwärmenutzungsvarianten sehr unterschiedlich sein kann.

Der Nährstoffkreislauf, insbesondere das Element Stickstoff, ist in Bezug zu Biogasanlagen ein komplexes Thema, welchem im Projekt *Etat de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne* [16] Rechnung getragen wird. Substrate für Biogasanlagen wie Abwässer und Gülle enthalten neben kohlenstoffhaltigen Verbindungen auch stickstoffhaltige, welche in Ammoniak umgewandelt werden können. Ammoniak ist eine lösliche Stickstoffverbindung, die sich durch die Ausbringung des Gärrests als Dünger verflüchtigt und zum sauren Regen beiträgt. Wird Wasser mit Nitrat- oder organischen Stickstoffen mit dem Sickerwasser aus der Bodenlösung ausgewaschen und gelangt auf diesem Wege in die Oberflächengewässer, resultiert daraus eine Überdüngung (Eutrophierung). Sollte die Behandlung von Stickstoff in Biogasanlagen in Zukunft bindend werden, so stellt sich die Frage, ob die mittleren und kleineren landwirtschaftlichen Biogasanlagen noch rentabel bewirtschaftet werden können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Stickstoff zu behandeln. Allerdings sind diese Techniken bisher nie für die mittleren bis kleinen landwirtschaftlichen Anlagen in Betracht gezogen worden. Diese Studie soll die verschiedenen zur Verfügung stehenden Techniken zur Elimination, Aufkonzentrierung oder Umwandlung von Stickstoff auf ihre Anwendbarkeit in landwirtschaftlichen Biogasanlagen von kleiner bis mittlerer Grösse (50–150 kW<sub>el</sub>) unter-



Figur 6: Die vier CO<sub>2</sub>-Adsorber der Faulgasaufbereitungsanlage bei der Ara Luzern.

suchen. Die Studie ist in vier Arbeitsschritte unterteilt. Zuerst soll ein Überblick über die rechtliche und politische Situation in der EU und der Schweiz im Hinblick auf die Stickstoffproblematik im Landwirtschaftssektor gegeben werden. In einem zweiten Schritt wird ein Überblick über alle vorhandenen oder sich in der Entwicklung befindenden Techniken zur Stickstoffbehandlung erstellt. Dieser Arbeitsschritt wurde 2008 begonnen und nun fortgeführt. Anschliessend wird für kleine bis mittlere landwirtschaftliche Biogasanlagen die passendste Technik ermittelt und zwar für jede Behandlungsform (Elimination, Transformation, Konzentration). Es wird eine technische und ökonomische Analyse der wichtigsten Parameter erstellt werden, und von den bereits bestehenden Techniken wird eine Beschreibung der Vor- und Nachteile gegeben. Der vierte Schritt beschreibt dann die möglichen Einschränkungen für kleinere und mittlere landwirtschaftliche Biogasanlagen, die sich aus den untersuchten Techniken und/oder den politischen Rahmenbedingungen ergeben. Des Weiteren sollen in diesem letzten Arbeitsschritt Empfehlungen für die Forschung gegeben werden.

Die Aufbereitung von Biogas zu Erdgasqualität und die Einspeisung von aufbereitetem Methan in bestehende Verteilernetze haben sich in letzter Zeit stark verbreitet. Die Prozesskette der Aufbereitung steht teilweise unter dem Verdacht, prozess- und betriebsbedingt Methan (ein bedeutendes Klimagas) in die Atmosphäre frei zu setzen (Methanschluß, Restmethan). Übersteigen diese Methanverluste ein kritisches Mass, so ist die Klimaneutralität der gesamten Biogasprozesskette in Frage gestellt. Die Studie *Methanverluste bei der Biogasaufbereitung* [17] vermass die Methanfrachten der Druckwechseladsorptionsanlage (PSA) (Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW) der ARA Region Luzern (GALU) und bilanziert die Methanverluste im Bilanzzeitraum 2007 (Figur 6).



Figur 7: Versuchsanlage des Brenners im Labor. (Ökozentrum Langenbruck)

Es konnte gezeigt werden, dass von der 2007 insgesamt aufbereiteten Methanfracht 2,6 % als Methanverlust anfallen. Von dieser Menge fallen 88 % während der normalen Produktionsphase der PSA-Anlage an. Auf Anfahr- und Ausfahrprozesse sind 2 % resp. 10 % des Methanverlustes zurück zu führen. Diese könnten durch Rückführung in den Gasspeicher komplett eliminiert werden, jedoch würde dies erhebliche monetäre Belastungen bedeuten.

Im Vergleich zu den jährlichen Stromkosten der PSA-Anlage von CHF 18'000. – bedingt der Methanverlust eine Gewinneinbusse von CHF 4'200.–. Setzt man für das schweizweit pro Jahr aufbereitete Biogas einen durchschnittlichen Schlupf von 2,6 % an, so errechnet sich eine Gesamtemission alleine durch die Aufbereitung von 26 t. Wäre man dazu in der Lage, sämtliches in der Schweiz produzierte Biogas aufzubereiten, und verursacht dabei im Schnitt ebenfalls 2,6 % Methanverlust, würde das eine jährliche Emission durch die Gasreinigung von 1'300 t Methan bedeuten. Dies sind weniger als 0,5 % der emittierten Methan-Gesamtmenge der Schweiz. Dennoch ist diese Menge nicht vernachlässigbar, und es gilt im Weiteren zu untersuchen, wo und wieviel Methan entlang der ganzen Produktionskette entweicht.

Der im obigen Projekt untersuchte Methanschluß kann mittels der innovativen Flox-Technologie

energetisch genutzt werden. Erdgasbefeuerte Flox-Brenner begannen vor ca. 15 Jahren die konventionellen Gasbrenner in Hochtemperaturprozessen der Metallindustrie zu verdrängen, denn die konventionelle Technik hatte entweder mit niedrigen Wirkungsgraden oder hohen Stickoxid-Emissionen zu kämpfen. In den vergangenen drei Jahren wurde im Rahmen des EU-Forschungsprojektes Bio-Pro das Potenzial der Flox-Technologie zur Verbrennung von extrem niederkalorischen Gasen (Schwachgas) entdeckt. Die am Ökozentrum Langenbruck entwickelte Flox-Combustor-Technologie für die Schwachgasverbrennung ist bereits auf einer Altdeponie im Tessin im Einsatz. Der im Tessin installierte Flox-Brenner hat die Aufgabe, Methan zu  $\text{CO}_2$  zu verbrennen, und so die treibhausrelevanten Emissionen zu reduzieren. Die Verbrennungswärme aus der reinen Schwachgasverbrennung kann noch nicht genutzt werden. Ziel des Projektes *Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2,5 MJ/m<sup>3</sup> – Entwicklung eines bivalent Kessels für Schwachgase und Biogas* [18] ist die Entwicklung eines Nullserientauglichen Schwachgaskessels zur energetischen Nutzung von Schwachgasen (Gemisch von 5 %  $\text{CH}_4$  und 95 %  $\text{CO}_2$ ). Gleichzeitig soll der Betrieb mit Erdgas möglich sein, um bei Ausfall der Schwachgaszufuhr die Energieversorgung der angeschlossenen Verbraucher zu sichern und die Funktion der Lastspitzen-Abdeckung zu erfüllen. Bis dato wurde in vier Iterationsschritten ein Brenner entwickelt, welcher sowohl die Luft, als auch den Brennstoff mit der Abgaswärme vorwärmt (Figur 7). Der Startbrenner konnte ebenfalls integriert werden. Da das Schwachgas als künstliches Gemisch aus  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Flaschenbündeln hergestellt wird, besteht eine Volumenstromlimitierung, die wiederum die Leistung des Brenners auf ca. 4 kW beschränkt.

Zusammen mit dem anscheinend nicht ausreichenden Wirkungsgrad des Rekuperators konnten die Projektziele knapp nicht erreicht werden: Im Bereich des anvisierten Gasgemisches war die Verbrennung thermisch nicht mehr stabil. Theoretisch kann ein Gemisch aus 5 %  $\text{CH}_4$  und 95 %  $\text{CO}_2$  eine adiabate Temperaturerhöhung von 500 K erzeugen. 500 K entspricht aber beim vorliegenden Brenner gerade auch dem Temperaturgefälle zwischen Rekuperator-Innen- und -Aussenseite. Zusammen mit den Abstrahlungsverlusten konnte deshalb kein thermisch stabiler Zustand erreicht werden. Es zeigte sich auch, dass mindestens 1070 °C nötig sind, um bei einem so oxidationsunwilligen Gasgemisch eine vollständige Verbrennung zu erzeugen. Im Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass es kein Methanschluß beim Brenner selbst gibt, d.h. es entstehen weniger als



Figur 8: Gasbus von Bernmobil.

1 mg/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> bei CO-Emissionen gemäss dem Projektziel (100 mg/m<sup>3</sup> bei 3 % O<sub>2</sub>).

Die Projektziele werden mit einem hitzebeständigeren Brenner mit höherer Rekuperator-Effizienz als gut erreichbar eingestuft. 2009 soll ein einfacher Brenner gebaut werden, der in der Brennkammer 1200 °C dauerhaft aushält und eine Temperaturdifferenz von höchstens 400 K zum Betrieb benötigt. 400 K entspricht der adiabaten Erwärmung von 3 % CH<sub>4</sub> und 97 % CO<sub>2</sub> zusammen mit der nötigen Luftmenge.

Mit dem Projekt *Einführung von Gasbussen bei Bernmobil* [19] wurde ein Erfahrungsbericht erstellt, welcher im Sinne einer Erfolgskontrolle aufzeigt, wie weit das Ziel einer ökologischen Mobilität erreicht wurde. Dazu gehören neben den technischen, betrieblichen und finanziellen Aspekten auch die Auswirkungen auf die Umwelt (Luftqualität und Treibhausgase) und die Akzeptanz der neuen Technologie bei der Öffentlichkeit. Um ein umfassendes Bild der Einführung von Gasbussen in einem öffentlichen Verkehrsbetrieb zu erstellen, wurden 6 Aspekte im Einzelnen betrachtet: Erfahrungen mit der Gas-Technologie, Energieverbrauch, Emissionen und Lufthygiene, betriebliche Umstellungen, finanzielle Aspekte und Akzeptanz der Gasbusse (Figur 8). Es zeigte sich, dass das grösste Risiko während der Einführungsphase der Gasbusse bei Bernmobil der Betrieb der Gasbetankungsanlage war. Der Bau stellte sich als ein komplexes Projekt heraus, welches einer ausführlichen Projektführung bedarf. Ebenso ist eine gewisse Redundanz an Betankungsmöglichkeiten für die Aufrechterhaltung des Busbetriebs absolut notwendig. Für 45 Gasbusse standen 53 Langsambetankungsplätze und 2 Schnellbetankungsplätze im Busdepot zur Verfügung. Als nachteilig im Hinblick auf zusätzliche Sicherheitsmassnahmen erwies sich die Errichtung der CNG-Betankungsanlage (CNG: compressed natural gaz) in einem Wohngebiet. Erfreulich ist

die Tatsache, dass lediglich rund 15 % der Störfälle bei den neuen Gasbussen auf die Gas-Antriebstechnik zurückzuführen war. Bezüglich des Verbrauchs liegt der mittlere Energieverbrauch der Gasbusse von Bernmobil rund 30 bis 35 % über dem der Dieselsebusse.

In der ARA Bern kann genügend Biogas für den gesamten CNG-Busbetrieb aus organischem Substrat hergestellt werden. Durch den Betrieb der Busse mit Biogas entfallen die CO<sub>2</sub>-Emissionen während der Fahrt der Busse. Dadurch kann der jährliche CO<sub>2</sub>-Ausstoss um zirka 2000 Tonnen gesenkt werden. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen der Gasbusse belaufen sich auf gut 10 % der NO<sub>x</sub>-Emissionen der Dieselsebusse (Euro 3). Zudem stossen die Gasbusse nur etwa 4 % der Partikel-Emissionen der Dieselsebusse aus. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass neue EURO-5-Dieselsebusse ebenfalls deutlich weniger NO<sub>x</sub>- und Partikelemissionen produzieren, als EURO-3-Dieselsebusse. Während die CO-Emissionen der beiden Busse in etwa gleich hoch sind, stösst der CNG-Bus rund 15-mal mehr Kohlenwasserstoffe aus als der Dieselsebus. Es kann angenommen werden, dass die HC-Emissionen des CNG-Buses zu einem grossen Teil aus Methan bestehen, da CH<sub>4</sub>-Emissionen von Gasbussen häufig über 1 g/km liegen. Abschliessend gilt es festzuhalten, dass die Akzeptanz der neuen Gasbusse sowohl innerbetrieblich, als auch bei den Fahrgästen sehr gross ist und besonders der ökologische Vorteil der Gasbusse geschätzt wird.

Allein an den bisher genannten Projekten sieht man das grosse Interesse am Thema Biomasse in Forschungskreisen. An Informationen zum Thema mangelt es nicht: Forschung, Wirtschaft, Lehre und öffentliche Ämter gewinnen laufend neue Erkenntnisse, welche sie in Form von offiziellen Dokumenten oder Studien publizieren. Für Anwender, Entscheidungsträger und Interessierte besteht die Herausforderung darin, die gewünschten Informationen zu finden. Es fehlt allerdings eine zentrale Stelle mit einem Gesamtüberblick über die energetische und stoffliche Nutzung von Biomasse. Deshalb hat sich das Bundesamt für Umwelt (BAFU) zusammen mit dem Bundesamt für Energie (BFE) und dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) entschlossen, diese Lücke im Wissensmanagement zu schliessen und eine zentrale Anlaufstelle zu kreieren, über die wichtige Dokumente und Studien zum Thema Biomasse verfügbar sind. Dies soll in Form einer Internet-basierten *Infothek Biomasse* [20] realisiert werden. Die Infothek Biomasse umfasst die unterschiedlichen Biomasse-Rohstoffe, die unterschiedlichen Verarbeitungswege und Technologien sowie die unterschiedlichen Nutzungsvarianten (Nahrungs- und Futtermittel, stoffliche

Nutzung, Vergärung, Kompostierung, Verbrennung usw.). Um dem Anspruch der Aktualität gerecht werden zu können, werden in erster Linie Dokumente ab dem Jahr 2008 in der Datenbank erfasst. Wichtige Grundlagendokumente aus früheren Jahren werden identifiziert und ebenfalls aufgenommen. Als Grundlagendokumente werden Publikationen aufgenommen, welche seit dem Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung Gültigkeit haben und häufig von Experten und Wissenschaftlern als Referenzen genannt werden. Die räumliche Systemgrenze entspricht der Landesgrenze der Schweiz sowie dem deutschsprachigen Raum in Europa (Deutschland, Österreich). Ebenfalls berücksichtigt wird eine Auswahl internationaler Publikationen. Um den Bezug zur Schweiz sicher zu stellen, werden nur Dokumente jener internationaler Organisationen in die Datenbank aufgenommen, in deren Gremien die Schweiz Einsitz hat. Die inhaltliche Systemgrenze soll analog der vom BAFU erarbeiteten Systemgrenze des Projekts *Biogene Güterflüsse Schweiz* [21] gezogen werden. Die Themenbereiche werden auf die drei Sektoren Produktion, Verarbeitung sowie Nutzung und Entsorgung aufgeteilt. Ein zentraler Punkt der Datenbank Infothek Biomasse ist die kontinuierliche Aktualisierung. Vorgeschlagen wird eine Kombination aus Hol- und Bring-Prinzip für die aktuellsten Publikationen. Ämter und Institutionen, die ein Interesse daran haben, dass ihre Studien in einer öffentlich zugänglichen und von der Zielgruppe (Vertreter von Behörden, Verbänden, Fachstellen) regelmässig genutzten Datenbank zentral gesammelt und aufbereitet werden, sollten ihre Dokumente dem Editor aktiv zur Verfügung stellen (Bring-Prinzip). Funktioniert das Bring-Prinzip bei einer Publikationsquelle nicht (z.B. weil es vergessen geht), sollte der Editor diese darauf aufmerksam machen und die neuesten Dokumente verlangen (Hol-Prinzip). Ein vierteljährliches Screening aller Quellen wird als sinnvoll erachtet, da somit einerseits der Arbeitsaufwand des Editors angemessen, wie auch die Aktualität der Dokumente gewährleistet ist.

Neben der Aufarbeitung der Literatur zum Thema Biomasse spielen auch Untersuchungen zu Chancen und Risiken neuer Technologien eine Rolle. Das Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung hat eine Studie zum Thema *Treibstoffe aus Biomasse – zweite Generation* [22] initiiert, welche

das BFE finanziell aber auch inhaltlich (Einsitz in Begleitgruppe) mitträgt. Die zweite Generation Biotreibstoffe soll eine bessere Energie- und Umweltbilanz aufweisen: Als Ausgangsmaterialien sollen Holz, Stroh und Pflanzenabfälle dienen, d.h. es wird nicht Zucker oder Stärke, sondern Zellulose zu Treibstoff verarbeitet. Im Hinblick auf kommerzielle Anwendungen gibt es dabei aber noch grossen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die bereits reichlich vorhandenen Fachartikel und Studien, die zu den Biotreibstoffen generell veröffentlicht wurden, sollen als Einstieg in die Thematik systematisch ausgewertet werden. Als Schwerpunkt der interdisziplinären Studie sollen dann die Zukunftsperspektiven (Chancen und Risiken) von Biotreibstoffen der zweiten Generation abgeschätzt werden. Diese werden jetzt als zweckmässige Lösung dargestellt – es gibt dabei aber Unsicherheiten, da sich noch mehrere Produktionsmethoden in Entwicklung befinden und unklar ist, welche davon schliesslich für die Herstellung in grossem Massstab am besten geeignet sind. Eine vertiefte Abklärung unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse ist deshalb erforderlich, damit diese Technologien umfassend beurteilt werden können. Dabei sind neben Fragen der Energieeffizienz und der Umweltbilanz auch wirtschaftliche und soziale Aspekte zu erörtern und Potenziale für künftige Entwicklungen sollen aufgezeigt werden. Anhand eines Kriterienkatalogs soll dargelegt werden, welche Kriterien zu erfüllen sind, damit ein Biotreibstoff überhaupt einen positiven Beitrag zu einer nachhaltigeren Mobilität leisten kann. Die Analyse unterschiedlicher Nutzungsformen von Biomasse soll zeigen, wie die Produktion von Treibstoffen zu beurteilen ist im Vergleich zu anderen Anwendungen von Biomasse, z.B. zur Erzeugung von Strom und Wärme. Im Rahmen des Projekts sollen auch die Akteure und Beweggründe identifiziert werden, die hinter der Förderung von Biotreibstoffen stehen. Dabei wird die Bedeutung der Mobilität in unserer Gesellschaft diskutiert, sowohl im Zusammenhang mit den individuellen Bedürfnissen als auch mit wirtschaftlichen Interessen. Abschliessend werden, beruhend auf einer breit abgestützten Gesamtbewertung, Empfehlungen formuliert, die sich an Entscheidungstragende, insbesondere an Politiker/innen, richten.

## Nationale Zusammenarbeit

Die meisten der 2008 durchgeführten und laufenden Projekte basieren auf der Zusammenarbeit verschiedener Hochschulen und Fachhochschulen mit der Industrie. Es gilt das Fachwissen verschiedener Expertengruppen innerhalb der

Schweiz zu bündeln, um so Synergien zu nutzen und nicht zuletzt auch Projekte zum Erfolg zu führen. Die nationale Zusammenarbeit wird auch durch den fachlichen Austausch, wie z.B. an national organisierten Symposien gefördert. Da das

BFE die Forschungsprojekte nur subsidiär fördert, sind die Gesuchsteller angehalten, weitere Mittel zur Finanzierung zu finden. Sehr marktnahe Projekte, von denen 2008 auch einige im Bereich Biomasse umgesetzt wurden, können zusätzlich bei der KTI, der Förderagentur für Technologie und Innovation, eingereicht werden. Bei Fragestellungen bezüglich Optimierung und Weiterentwicklung eines Produktes ist meist die Industrie als Partner gefragt. Ein weiteres wichtiges Ele-

ment der Zusammenarbeit ist die Initiierung von Projekten, die ämterübergreifende Themen bearbeiten. Hier arbeitet das BFE z.B. mit dem BAFU und dem BLW zusammen.

Die nationale Zusammenarbeit ist ein wichtiges Instrument für einen effizienten Technologietransfer von der Forschung in die Wirtschaft. All diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung der Programms.

## Internationale Zusammenarbeit

Das BFE ist Mitglied beim *Technology Agreement Bioenergy* der IEA (International Energy Agency) [25], welches aus 13 Tasks (Annexes) besteht. Die Schweiz arbeitet in 3 Tasks aktiv mit.

### Schweizer Mitarbeit in Task 32 «Biomass Combustion and Co-Firing»

In diesem Task arbeiten 10 Mitgliedsländer und die Europäischen Kommission zusammen. Ziel dieses Tasks ist die Verbreitung der Verbrennungstechnologie für Biomasse und Co-Feuerung zur Produktion von Wärme und Strom. Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt in der breiten Markteinführung der Biomasse-Verbrennungstechnologie und der Optimierung der Technologie. Technisch relevante Ziele sind eine höhere Brennstoffflexibilität, eine verbesserte Prozessführung und Sensorenentwicklung, Mechanismen der Korrosion und Ablagerungsbildung, Bildung und Emission von Partikeln, die Verbesserung vorhandener Systeme und die Entwicklung neuer Konzepte.

Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Biomasse, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung schweizerischer Forschungsergebnisse, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz sowie die Weitergabe der Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz.

Für die künftige Ausrichtung des Tasks 32 wurde festgelegt, dass die bisherigen Schwerpunkte beibehalten werden. Dazu wird eine Liste der Prioritäten nachgeführt, die von allen Ländern ausgewählt werden und ein Ranking von 18 Themen aus 8 Kategorien umfasst. Aus der Schweiz wurde ein besonderes Interesse an den 5 Kategorien «Small scale biomass», «Industrial scale biomass» und «Simulation», «Emissions» und «Policy issues» angemeldet. Im Vergleich zu den bisherigen Aktivitäten wird herausgestrichen, dass der Einbezug der Industrie zu verstärken ist.

Unter Mitwirkung der Schweiz wurde im Rahmen der Mitgliedschaft in diesem Task die zweite

Auflage des IEA-Handbuchs «The Handbook on Biomass Combustion and Co-firing» herausgegeben. Gleichzeitig wurde die erste Auflage auf Chinesisch übersetzt.

Das IEA-Projekt «Partikel» wurde unter Schweizer Leitung (HSLU) in Zusammenarbeit mit SP Sweden (Technical Research Institute of Sweden) durchgeführt. Die Erhebung von Emissionsfaktoren im Bereich Feinstaub hat einerseits aufgezeigt, dass die Feinstaubemissionen von handbeschickten Holzheizungen eine grosse Bandbreite aufweisen. Andererseits wurden den IEA-Mitgliedsstaaten bewusst, dass unterschiedliche Messbedingungen zu Emissionsfaktoren führen, die untereinander nicht direkt verglichen werden können. So wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung der Kondensate im Abgas von handbeschickten Holzöfen zu einer 2- bis 20-fach höheren Feinstaubmasse führen kann im Vergleich zum im heissen Abgas ermittelten Feststoff.

Vom Task 32 wurde am 20. Oktober 2008 in Amsterdam ein Experten-Workshop über Anwendungen der Biomasse-Verbrennung in Kleinanlagen organisiert. Interessant für die Schweiz ist vor allem die Aussicht auf strengere Grenzwerte für Wirkungsgrade und Emissionen in der EU, obwohl deren Einführung noch unsicher ist. Damit verbunden stellt sich die Frage der Messmethodik insbesondere auch für den Feinstaub, zu welcher allein in der EU drei verschiedene Methoden zur Diskussion stehen, ohne dass bis dato ein Konsens in Sicht ist.

Bei der «16th EU Biomass Conference» war die Schweiz (HSLU) im Scientific Committee vertreten. Gegenüber den letzten EU-Konferenzen hat sich die Bedeutung der Biotreibstoffe wieder relativiert, während Verbrennung für Wärme und Vergasung für Strom wieder wichtiger geworden sind. Bei der Stossrichtung zum Transport mit erneuerbarer Energie gab es als Novum die Aussage wichtiger Exponenten, dass der künftige Individualverkehr über Elektrofahrzeuge erfolgen werde, und nicht wie in den letzten Jahren vermehrt

geäussert, über Fahrzeuge, die mit Biotreibstoffen betrieben werden. Im Weiteren wurde nun auch an dieser Konferenz als wesentliches Argument bestätigt, dass die Flächeneffizienz der Biotreibstoffe viel geringer ist als diejenige der Solarenergie, und dass landwirtschaftliche Flächen vorab zur Nahrungsproduktion zu nutzen sind. Zur ökologischen Beurteilung von biogenen Energieträgern wurden zwei Faktoren deutlich. Zwar sind Bewertungen der Umwandlungsverfahren verfügbar, die Gesamtbeurteilung wird aber oft durch die indirekten Effekte der Landumnutzung dominiert. Zudem kann die Gesamtbewertung bei vielen nachwachsenden Energieträgern durch  $N_2O$  und  $CH_4$  dominiert werden, deren Emissionen mit riesigen Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Schweiz wird 2009 in internationalen Gremien ein fortgesetzter Erfahrungsaustausch mit den anderen IEA-Mitgliedsländern angestrebt mit dem Schwerpunkt der Feinstaubemissionen sowie der Festlegung künftiger Normen und Grenzwerte. Als Folge der Zunahme der Holzenergienutzung und insbesondere des vermehrten Einsatzes von Feinstaubabscheidern besteht in Zukunft ein Bedarf an der Etablierung geordneter Nutzungs- und Entsorgungswege für die verschiedenen Aschesortimente. Diesbezüglich wird ebenfalls ein wertvoller Informationsaustausch mit der IEA angestrebt. Daneben besteht ein ungebrochenes Interesse an den Techniken zur Stromerzeugung und Wärmekraftkopplung aus Holz. Schliesslich ist der Erfahrungsaustausch über Förderinstrumente und marktwirtschaftliche Steuerungsinstrumente von zunehmendem Interesse.

### **Schweizer Mitarbeit in Task 33 «Thermal Gasification of Biomass»**

Der zweite IEA Task im Technology Agreement Bioenergy, in dem die Schweiz mitarbeitet, ist Task 33 Thermal Gasification of Biomass. Dieser Task hat sich den Informationsaustausch zum Thema Biomassevergasung in der Forschung, Entwicklung und Anwendung zum Ziel gemacht. Gleichzeitig ist man bestrebt die Bioenergieindustrie mit einzubinden und die Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedsländern zu fördern. Das übergeordnete Ziel ist die Kommerzialisierung von effizienten, ökonomischen und umweltfreundlichen Biomasse-Vergasungsprozessen voranzutreiben, um Elektrizität, Wärme, Dampf und Synthesegas zu erzeugen. 10 Mitgliedsländer und die Europäische Kommission beteiligen sich an diesem Task. Die Mitarbeit der Schweiz hat folgende Ziele: Präsentation der in der Schweiz durchgeführten Arbeiten im Bereich Biomassevergasung; Kenntnis über den Stand der Aktivitäten in den Mitgliedstaaten erwerben; Weitergabe der Informationen an die Interessenten in der Schweiz; Einbringen

der Interessen der Schweiz in die Zielsetzung und Aufgabenstellung von Task 33; Mitwirkung beim Erarbeiten eines Statusreports über die Biomassevergasung.

Im Bereich Biomassevergasung war die Schweiz auch im von der EU mitfinanzierten Netzwerk «ThermalNet» aktiv. Es besteht aus den «Unter-Netzwerken» PyNe (Pyrolyse), GasNet (Biomassevergasung) und CombNet (Biomasseverbrennung). ThermalNet mit den drei Unternetzwerken ist unterteilt in Arbeitspakete, den sogenannten «Work packages». Die einzelnen «Work packages» enthalten mehrere Tasks, welche von einem Task Leader geleitet werden. Die Schweiz hat bezüglich dieses Programms kein Abkommen mit der EU. Schweizer können daher im ThermalNet nicht als Partner auftreten, sondern nur den Status eines Subcontractor oder Experten erhalten. Die Schweiz ist als Co-Taskleader mit Schwerpunkt Vergasung im Task «Environment, Health, Safety» tätig. Risiken von Holzvergäsern bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Ökologie sind für alle Akteure der Holzvergasung ein wichtiges Thema. Nach längeren Vorarbeiten im Rahmen von Task 33 und ThermalNet wurde 2006 von der Europäischen Kommission im Programmbebereich «Intelligent Energy Europe» (IEE) das Projekt «Gasification Guideline» bewilligt. In diesem Projekt soll eine Leitlinie für Vergasungsanlagen bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Ökologie ausgearbeitet werden. Da die Schweiz nicht am Programm IEE beteiligt ist, ist sie in diesem Projekt nur als Subcontractor involviert.

Generell ist die Situation der Biomassevergasung so, dass im Bereich der Festbettvergasung überall in Europa im Jahr 2008 weitere kommerzielle Anlagen in Betrieb genommen wurden (zwei davon in der Schweiz). Noch immer ist aber offen, ob diese Anlagen kommerziell erfolgreich sein werden. Langjährige, gesicherte Daten sind immer noch rar. Bei kleinen Festbettvergäsern für WKK-Anlagen liegen zahlreiche Betriebserfahrungen vor (mehrere Anlagen mit 5'000–50'000 Betriebsstunden); mehrere Anlagen wurden jedoch auch wieder stillgelegt. Alle Vergasertypen werden in Richtung Marktreife entwickelt. Die Verfügbarkeit ist jedoch immer noch zu tief (<75 %) und die Investitionskosten zu hoch (6'000–12'000 CHF/kW<sub>el</sub>). Ebenfalls sind die Produktionskosten für Strom noch immer zu hoch (<30 Rp./kWh). Im Bereich der Wirbelschichtvergasung für WKK liegen ebenfalls zahlreiche Betriebserfahrungen vor (mehrere Anlagen mit 20'000–60'000 Betriebsstunden). Mehrere Anlagen sind in Konstruktion. Die spezifischen Investitionskosten belaufen sich auf 4'000–8'000 CHF/kW<sub>el</sub> und die Produktionskosten für Strom liegen zwischen 15 bis 20 Rp./kWh. Kommerzielle Anlagen sind für Co-firing,

WKK und IGCC (Vergasung mit integriertem Gas- und Dampfturbinenprozess) in Betrieb.

### Schweizer Mitarbeit in Task 37 «Energy from Biogas and Landfill Gas»

Der dritte Task, in dem die Schweiz Mitglied im Rahmen des Technology Agreements Bioenergy ist, ist Task 37 *Energy from Biogas and Landfill Gas*. Hier stellt die Schweiz auch gleichzeitig den Taskleader. Auch bei diesem Task steht der Informationsaustausch über die anaerobe Vergärung an oberster Stelle. Das Themenfeld ist dabei komplex und reicht von der Produktion über die Aufbereitung und die Verwendung von Biogas als Energiequelle, vom Gärgut als Dünger und dem anaeroben Abbauprozess als Verbindung zur Abfallwirtschaft (Wasser). Die Vergärung versteht sich somit als ein Glied in der Kette der nachhaltigen Abfallaufbereitung und Energieproduktion mit dem Ziel, die Kreisläufe zu schliessen, was heute als «biorefinery» definiert wird. Das Hauptaugenmerk liegt in der Einführung angemessener Praktiken für das Abfallmanagement, in der Förderung von Biogasanlagen, Qualitätsverbesserung der Produkte und Verbesserung ökologischer Standards. Im Task 37 sind 10 Länder und die Europäische Kommission vertreten. Durch die Mitgliedschaft der Schweiz wird garantiert, dass die Informationen zur Schweizerischen Entwicklung gesammelt den anderen Mitgliederländern zur Verfügung gestellt werden, und dass umgekehrt die Informationen der anderen Task-Mitglieder auch wieder in die Netzwerke der Schweiz einfließen. Zusätzlich gibt es einen bilateralen Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Mitgliedsländern und der Schweiz.

Die generelle Entwicklung von Biogas zeigte im Jahr 2008 klar nach oben. Im Hinblick auf die

KEV (kostendeckende Einspeisevergütung) wurden wieder mehr Anlagen geplant und gebaut als zuvor. Die Einführung der Steuerbefreiung von Biomethan und die Reduktion der MinÖSt (Mineralölsteuer) auf Erdgas zusammen mit der Installation des Biogasfonds (freiwillige Vereinbarung der Gasbranche mindestens 10 % Biomethan dem Erdgas als Treibstoff beizumischen) hat zu einer erhöhten Gasaufbereitung geführt. Dank den rund 30 % tieferen Treibstoffkosten beim Gas und den Förderaktionen der Gaswerke werden zunehmend mehr Gasautos gekauft und Tankstellen gebaut. Zurzeit sind 105 Gastankstellen in Betrieb und etwa 7'000 Fahrzeuge in Verkehr gesetzt. Qualitätssicherung bei der Produktion von Biogas und Gärgut sowie bei der Gasnutzung ist ein zunehmend wichtiges Thema und wird auch 2009 im Zentrum stehen. Task 37 hat daher entschieden, bis Ende 2009 eine entsprechende Publikation zu erarbeiten.

Das Jahr 2008 war im Biogasbereich sehr bewegt. Kanada und Frankreich stehen vor einer Periode stark steigenden Biogasanlagenbaus und auch in Grossbritannien wird wieder vermehrt in Biogasanlagen – auch mit gleichzeitiger Gasaufbereitung – investiert. Im Hinblick auf die Netzeinspeisung von Biogas ist auch in Holland und Deutschland viel geschehen. In Holland wurde eine sogenannte Biogasplattform gegründet, die sich aus Mitgliedern der Regierung, der Administration und der Industrie zusammensetzt und Biogasprojekte fördert. In Deutschland ist im März 2008 das Gaseinspeisegesetz in Kraft getreten, welches Aufbereitungsanlagen fördert. Andererseits sind die NaWaRo-Preise (nachwachsende Rohstoffe) so stark angestiegen, dass nicht wenige Anlagen und mit ihnen die Anlagenhersteller an den Rand des Konkurses kamen.

### Pilot- und Demonstrationsprojekte

Das einzig momentan laufende Projekt beschäftigt sich mit der *Verfeuerung von Miscanthus* (Chinaschilf) [23]. Miscanthus ist eine mehrjährige Pflanze mit hohen Erträgen, die sich sehr umweltschonend anbauen lässt (extensive Düngung, kein chemischer Pflanzenschutz). Sie lässt sich weder als Nahrungs- noch als Futtermittel einsetzen. Neben der stofflichen Nutzung als Faserpflanze würde sie sich sehr gut als Energieträger eignen, sei es in Form von Häckseln oder Pellets. Sie hat, bezogen auf die Anbaufläche, sehr hohe Energieerträge und ist arbeitswirtschaftlich interessant, da nur eine Ernte pro Jahr notwendig ist.

Das Pilotprojekt soll objektive Grundlagen über den Einsatz von Miscanthus in Kleinfeuerungen bereitstellen. Mit dem Ziel die Feinstaubemissio-

nen auf den Stand vergleichbarer Holzfeuerungen zu senken, ist die Kleinfeuerung mit einem Rauchgaswäscher ausgerüstet worden. Die Messungen und die betrieblichen Erfahrungen sollen belegen, inwieweit dies erreichbar ist. Im Projekt wird eine neue Kleinfeuerungsanlage von 30 kW eingesetzt und in 2 Stufen mit verschiedenen Brennstoffen beschickt: Holzschnitzel (Referenz) und reine Miscanthushäcksel.

Ein zweites im Jahre 2008 gefördertes Projekt ist das *Forschungslabor Bioenergie* [24]. Dies beinhaltet den Aufbau eines Forschungslabors zur Demonstration der technischen Möglichkeiten zur Untersuchung der Schadstoffbildung in Holzfeuerungen, sowie zur Demonstration und Anwendung der experimentellen und theoretischen Möglich-

keiten zur Entwicklung schadstoffarmer Techniken an der HSLU in Horw (Figur 9).

Die Infrastruktur umfasst insbesondere folgende Komponenten: Verbrennungslabor zum Betrieb von Feuerungsanlagen unter praxisnahen und unter idealen Bedingungen durch Simulation des Kamineinflusses; Versuchseinrichtung zur Abscheidung von Feinstäube; Versuchseinrichtung zur Untersuchung und Visualisierung der Strömungsverhältnisse. Das Labor wurde 2008 durch verschiedene Projekte bereits rege in Anspruch genommen.



Figur 9: Bioenergielabor Horw. (HSLU)

## Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Betrachtet man die Programmschwerpunkte und die anvisierten Ziele für das Forschungsprogramm, so sind in allen 3 Bereichen (Systemoptimierung und -integration, Qualitätssicherung, neue Verfahren und Technologien) erfolgreich Projekte durchgeführt worden.

### Systemoptimierung und -integration

Im Bereich Holzenergie wurde das aktuelle Thema der Feinstaubemissionen von mehreren Seiten (handbeschickte Öfen, Pelletöfen, Stückholzkessel) angegangen. Es zeigte sich, dass die Anfeuerphase den kritischen Zeitpunkt des Betriebes darstellt. Durch die genaue Definition der entstehenden Verbindungen können nun betriebs- und feuerungstechnische Massnahmen getroffen werden, um die Betriebsweise zu optimieren. In den Bereich Systemoptimierung fällt auch ein verbessertes Zusammenspiel von Kombianlagen wie z.B. Pelletfeuerungen und Solarsysteme. Hier gilt es die Regeltechnik zu optimieren, um den Jahresnutzungsgrad des Systems zu erhöhen. In diesem Projektbereich wird die nationale Zusammenarbeit beispielhaft ersichtlich, da die Expertise aus zwei Bereichen gefragt ist. Neben der Verbrennungstechnologie beschäftigt sich auch die anaerobe Vergärung mit der Systemoptimierung und -integration. Ein wichtiges Thema ist in diesem Zusammenhang die Gasaufbereitung, die damit verbundenen Methanverluste und die Nutzung dieser Schwachgase. 2008 konnten wichtige Zahlen zu den Methanverlusten geliefert werden, welche sowohl ökologisch, als auch ökonomisch in Relation gesetzt wurden. Ein sehr umsetzungsorientiertes Projekt im Bereich Biogas, nämlich der Einsatz von Biogasbussen im öffentlichen Verkehr, zog eine positive Bilanz bezüglich der Betriebsumstellung. Dieses Projekt zeigt auch eine gute Zusammenarbeit zwischen Bundesamt und städtischen Betrieben.

### Qualitätssicherung

Qualitätssichernde Massnahmen wurden in der Verbrennungsforschung angegangen, indem z.B. neue Messmethoden für Typenprüfungen untersucht wurden, um die Feinstaubproblematik mit einzubeziehen. Ziel ist es somit, aus den Untersuchungen Konsequenzen für einen optimalen Betrieb sowie für Kontroll- und Vollzugsverfahren abzuleiten. Bei der Vergasung wurde Qualitätssicherung und die internationale Zusammenarbeit mit der Erarbeitung einer europäischen Richtlinie über «Health, Safety and Environment» sehr transparent.

### Neue Verfahren und Technologien

Der Schwerpunkt «Neue Verfahren und Technologien» wurde hauptsächlich in den Bereichen Vergasung und anaerobe Vergärung bearbeitet. Bei der Vergasung ist die Rohgasreinigung ein aktuelles Thema, bei welcher es den Wirkungsgrad zu verbessern gilt. Nicht nur holzige Biomasse kann vergast werden, auch für nasse Chargen ist dies Dank einer neuen Technologie, der hydrothermalen Vergasung, möglich. Dieser Ansatz bietet ebenfalls eine Rückgewinnung der Nährsalze, was der Forderung nach Schliessen von Stoffkreisläufen Rechnung trägt. Auch die online Überwachung von Spurenstoffen in Prozessgasen ist ein neues Verfahren, welches Umsetzungspotenzial besitzt, da somit die Langlebigkeit der Anlagenteile gesichert wird. Auch der Bereich der anaeroben Vergärung konnte neue Technologien im Forschungsumfeld platzieren. Energieeffizienz, die Erhöhung des biologischen Wirkungsgrades und der Nährstoffkreislauf standen im Vordergrund.

Das Substrat Biomasse ist sehr komplex und vielfältig, was auch die Bandbreite der Projekte demonstriert. Durch die Vielzahl der laufenden Pro-

jekte konnten zahlreiche Fragestellungen, welche im Rahmen des Forschungsprogramms Biomasse (2008–2011) des Bundes erhoben wurden, bearbeitet werden. Somit wurde das Jahresziel klar erreicht. Die meisten der oben beschriebenen Projekte sind noch nicht abgeschlossen und lassen auf spannende Ergebnisse hoffen. Für das Jahr 2009 werden als projektübergeordnete Ziele u.a. die verbesserte Effizienz des Gesamtsystems, die Reduktion von Emissionen, Kostensenkungen, Standardisierungen von Verfahren und die Entwicklung neuer Verfahren und Technologien definiert.

### Schweizweiter Rundumschlag

Holz als Energiequelle ist in der Schweiz weiter auf dem Vormarsch. Dies zeigt auch die Tatsache, dass z.B. die Firma AEK Pellets in diesem Jahr die Erweiterung des Holzenergie-Pelletwerks in Klus in Betrieb nahm. Die AEK hat mit dem Ausbau ihrer Produktionsanlagen für Holzenergie-Pellets auf den doppelten Jahresausstoss von 60'000 t ausgebaut. Die Produktionsanlage erlaubt neu auch den Einsatz von feuchtem Sägemehl und feuchten Hobelspänen, welche in Schweizer Sägereibetrieben in grossen Mengen anfallen. Derzeit wird das feuchte Rohmaterial noch über die Wärme einer Gasheizung getrocknet. In einem nächsten Schritt soll eine Holzheizung diese ersetzen und den Einsatz «grauer Energie» aus fossilen Energieträgern für die Pelletsproduktion weiter verringern. Der Pellets-Verbrauch 2007 in der Schweiz lag bei ca. 80'000 t, in Europa bei ca. 3'200'000 t. Der bisherige Pellets-Verbrauch pro Kopf und Jahr lag in der Schweiz bei 2 kg, in Österreich, dem Führer in Mitteleuropa, bei 24 kg und in Schweden, dem Vorreiter und Weltführer, bei 101 kg (Wald und Holz 07/08).

Pellets sind nicht nur in kleinen Heizungsanlagen auf dem Vormarsch, immer mehr Betriebe und öffentliche Einrichtungen setzen auf Holzpellets statt auf fossile Brennstoffe. Die Zahl der Pellettheizanlagen mit Nennleistungen von mehreren hundert Kilowatt nimmt zu. Gerade für Gebäudetypen wie beispielsweise Sportmehrzweckhallen, Schwimmbäder oder Gewächshäuser von Gärtnereien mit ihrem über das gesamte Jahr relativ konstant hohem Wärmebedarf sind Pellets eine interessante Alternative. Gerade für Unternehmen mit einem hohen Energieverbrauch sind Pellets interessant, da die spezifischen Investitionskosten für die Kessel der Grossanlagen pro Kilowatt Nennleistung abnehmen. In Langendorf im Kanton Solothurn ging im Juli 2007 ein 800-Kilowatt-Pelletkessel in Betrieb – der bislang grösste in der Schweiz. Während Schnitzel ungefähr 5 Rp. pro kWh kosten, liegt man bei Pellets bei 7 Rp. In den allermeisten Fällen führt dieser Unterschied bei Grossanlagen zur Wahl von Schnitzeln. Grössere

Pelletheizungen werden deshalb auch in Zukunft meistens Nischenlösungen für Situationen sein, wo eine Schnitzelheizung aus Platzgründen nicht in Frage kommt. Zudem wird die Forderung laut, dass in Pelletgrossanlagen auch endlich Industriepellets produziert werden müssen. Durch kostengünstigere Produktionsbedingungen, einfacheren Transport und grosse Mengenabnahme sind Industriepellets kostengünstiger als zertifizierte Pellets für den Hausbrand (Erneuerbare Energien, Nr. 4, August 2008).

Der Trend der industriellen Nutzung von Holz zur Wärme- und Stromerzeugung zeigt sich auch in der Projektierung und Realisation von Holzkraftwerken. Neben dem grössten Holzkraftwerk der Schweiz in Domat-Ems stehen weitere Projekte in Aussicht. Im Herbst 2008 ist das Holzkraftwerk Basel in Betrieb gegangen. Das Gemeinschaftsprojekt der Waldwirtschaft Nordwestschweiz, der Energiedienstleister Industrielle Werke Basel (IWB) und Elektra Baselland (ebl) ist mit seinen Leistungen von rund 21'000 kW Wärme und 4'000 kW Strom eines der bisher grössten Holzkraftwerke der Schweiz. Versorgt werden damit in Zukunft zwischen 5'000 und 7'000 Haushalte während sieben Monaten im Jahr. Zurzeit sind 9 Anlagen in Betrieb (Domat-Ems, Stans, Crissier, Biere, Meiringen, Otelfingen, Kleindöttingen, Spiez, Wila) und 40 bis 50 weitere Projekte sind in Planung. Auch in der neuen KVA Bern im Forsthaus West ist ein Holzheizkraftwerk geplant. Ab 2011 sollen dort 27'000 kW Wärme und 8'000 kW Strom produziert werden, wobei diese Energie der Bevölkerung der Stadt Bern sowie dem Bundeshaus geliefert werden soll (Umwelttechnik Schweiz, 09/08).

Mit einem höheren Anteil an holzbetriebenen Heizungen steigt auch die Debatte um die Feinstaubproblematik. Wie bereits oben erwähnt (Holzenergiesymposium), drängen zahlreiche Hersteller von Feinstaubabscheidern mit ihren Neuerungen auf den Markt. Auch in der Forschung beschäftigt man sich mit dem Feinstaub. Neben diversen vom BFE mitfinanzierten Projekten, welche sich mit dem Einfluss der Betriebsweise von Holzfeuerungen auf die Feinstaubemissionen beschäftigen, laufen auch Projekte, welche sich mit den Hauptquellen von Partikelemissionen befassen. Es zeigte sich, dass primäre Feinstaubemissionen vom Verkehr und von der Holzverbrennung gleichbedeutend sind, aber nur zu 25 % zu den Gesamtfeinstaubemissionen beitragen. Die Hauptfeinstaubquelle ist sekundären Ursprungs und beinhaltet die Oxidation verschiedener Spurengase in der Atmosphäre. Betrachtet man sowohl die primären Emissionen, als auch die Emissionen, die zu sekundären Aerosolen führen, so tragen der Verkehr, die Holzverbrennung und die Industrie am meisten

zum Feinstaub bei, aber die Landwirtschaft und konventionelle Heizsysteme dürfen auch nicht ausser Acht gelassen werden (PSI, Scientific Report, 2007).

Nicht nur in der Forschung, auch in der Praxis, z.B. auf der kantonalen Ebene, beschäftigt man sich mit der Biomasse und ihrem Potenzial. Im Kanton Bern, z.B. ist viel Biomasse in Form von Holz, landwirtschaftlichen Abfällen, organischen Abfällen aus der Industrie und Haushalten sowie aus Kläranlagen verfügbar, so dass der Kanton auf Energie aus Biomasse setzt. Gezielt eingesetzt, könnte einheimische Biomasse rund 8 % des heutigen Energiebedarfs decken. Angestrebt wird, mit der Biomasse bis ins Jahr 2035 je 10 % des Endenergiebedarfs beim Strom- und Wärmeverbrauch zu decken (www.be.ch). Die Energieanlagen müssen so optimiert werden, dass sowohl Strom als auch nutzbare Wärme erzeugt wird. Der Kanton Bern will nun in erster Linie die Rahmenbedingungen verbessern. Im Vordergrund stehen raumplanerische Massnahmen, finanzielle Beiträge an geeignete Anlagen und eine effiziente Bewilligungspraxis.

Nicht nur Holz ist im Energiebereich derzeit sehr gefragt, auch die nicht-holzige Biomasse wie Hofdünger, Restaurationsabfälle, Grüngut etc. werden stark genutzt.

Ende Mai 2008 wurde die Biogasanlage der Rhy-Biogas AG in Widnau eingeweiht. Dies ist die erste landwirtschaftliche Anlage in der Schweiz, welche das Biogas ins Erdgasnetz einspeist (Figur 10).



Figur 10: Gasaufbereitungsstation (PSA) zur Einspeisung ins Erdgasnetz. (Rhy Biogas AG; Widnau)

In dieser Anlage können jährlich bis zu 20'000 t Hofdünger und Co-Substrate vergärt werden. Die Substrateinbringung erfolgt jedoch nicht wie bei herkömmlichen Anlagen über Förderschnecken, sondern über ein Flüssigeinspülungssystem. Der grosse Vorteil dieser neuen Technologie liegt in der vorangehenden Komprimierung der festen Substrate ohne Sauerstoffzufuhr. Das Rohgas hat einen Methangehalt von 55-60 %. Es wird getrocknet, entschwefelt und über ein PSA-Verfahren (Druckwechsel-Adsorptionsverfahren) aufkonzentriert. Das Produktgas besteht zu mindestens 96 % aus Methan.

Um die Qualitätsanforderungen zur Einspeisung ins Erdgasnetz zu erfüllen, werden die Hauptkomponenten des Produktgases nach der Aufbereitung regelmässig gemessen. Anschliessend wird das Biogas verdichtet und dem Erdgasnetz zugeführt (Umwelttechnik Schweiz 06/08 und Merkblatt BiomassEnergie).

Die grösste landwirtschaftliche Biogasanlage mit Biogaseinspeisung steht in Inwil im Kanton Luzern (Swiss Farmer Power). In dieser Anlage können jährlich bis zu 61'000 t Gülle und bis zu 45'000 t Feststoffe – insbesondere Grünabfälle aus der Region – verarbeitet werden. Damit erbringt die Anlage einen wichtigen und sehr erwünschten Beitrag an die Reduktion der Stickstoff- und Phosphatfracht in den Boden. Die Inbetriebnahme der Anlage dauerte rund ein halbes Jahr. Seit Mitte Januar 2009 speist die Biogasanlage erstmals Gas ins regionale Erdgasnetz und wird in Zukunft jährlich 1.9 Mio m<sup>3</sup> Biogas, 8'000 m<sup>3</sup> Flüssigdünger und 15'000 m<sup>3</sup> Kompost liefern.

Biogas ist auch im Jura auf dem Vormarsch, denn im Sommer 2008 wurde in Porrentruy eine Anlage mit grossem Erfolg vorgestellt. Die Ursprungsproblematik lag in der Grüngutentsorgung der Gemeinde sowie der Geruchsbelästigung durch die Schweinehaltung. Die Schweinehaltung im Dorf wurde zugunsten einer Rindermast ausserhalb aufgegeben. Den Biogasanlagenbetreibern wurde eingeräumt, sämtliche Grüngutabfälle der umliegenden Gemeinden in ihrer Biogasanlage verwerten zu dürfen. Auch hier wird der gewonnene Strom ins lokale Stromnetz eingespeist und verkauft (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Das Amt für Entsorgung und Recycling Zürich geht neue Wege. Es startet ein Pilotprojekt, in welchem Küchenabfälle versuchsweise separat eingesammelt und zur Treibstoffgewinnung vergärt statt verbrannt werden. Das Pilotprojekt wird ein Jahr dauern. Um der Menge gesammelter Küchenabfälle in Zukunft gerecht zu werden, plant die Stadt Zürich ein geschlossenes Vergär- und Kompostierwerk. Die biogenen Haushaltsabfälle der Zürcher Bevölkerung landeten bisher im «Zü-

risack» und wurden verbrannt. Dies wird bis 2011 auch weiterhin der Fall sein. Ab 2011 soll dann die Vergärung von Küchenabfällen in der ganzen Stadt Zürich eingeführt werden (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Die Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz erfreut sich immer grösserem Interesse und damit entsteht auch Diskussionsgrundlage zu Aufbereitungstechniken von Biogas für die Einspeisung. Ein weit verbreitetes Verfahren ist die Druckwechseladsorption (PSA). Im März 2008 hat sich die Erdgas Zürich AG entschlossen, die Lizenz für das BCM-Verfahren (Biogas, CO<sub>2</sub>, Methan; drucklose Aminwäsche) in der Schweiz zu erwerben. Zu dem bisher erfolgreich eingesetzten Verfahren der drucklosen Aminwäsche BCM-Sorb wurde jetzt ein weiteres druckloses Verfahren BCM-Clean entwickelt. Mit diesem Verfahren wird das aus dem Fermenter austretende Biogas drucklos vorbehandelt. Bei diesem Verfahren erfolgt eine Feinentschwefelung und eine gleichzeitige CO<sub>2</sub>-Vorabscheidung von 30 bis 85 %, je nach gewünschtem Reinheitsgrad. Kombiniert man das BCM-Clean-Verfahren mit dem BCM-Sorb-Verfahren, so kann Biogas mit einem Methangehalt von über 99,5 Vol.-% erzeugt werden. Der Wärmebedarf für die Biomethanherzeugung beträgt anstatt 0,4 bis 0,6 kWh/Nm<sup>3</sup> nur 0,1 bis 0,3 kWh/Nm<sup>3</sup> und kann somit drastisch reduziert werden. Im Juni 2008 wurde im Klärwerk Obermeilen die erste BCM-Anlage errichtet. Es konnte ein einspeisefähiges Biomethan von 98,7 Vol. % erzeugt werden. Der Methanverlust lag bei 0,04 % (Umwelttechnik Schweiz 7–8/08).

Auch strategische und politische Überlegungen im Bereich Biomasse beschäftigten die Ämter im Jahre 2008. Mit der entstehenden Biomassestrategie wollen die Ämter ein Zeichen der Zusammenarbeit und Koordination im Biomassebereich setzen. Die Strategie enthält wichtige Ziele zu den Themen Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz und wird von den hauptsächlich betroffenen Bundesämtern (ARE, BAFU, BFE, BLW) anerkannt und im Jahr 2009 verabschiedet. Aufgrund der technischen, ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen muss diese Strategie periodisch kritisch überdacht, angepasst und möglicherweise auch weiter entwickelt werden.

### Was die Gemüter 2008 im Ausland bewegte

Themen, die 2008 oft in Wissenschaftsartikeln zu finden waren, sind Ökobilanzen für Biotreibstoffe, Bioenergie-Potenzial, Biomasseproduktion mit Hilfe von Algen, Algen als Biotreibstoff und steigender Pelletmarkt. In den vergangenen Jahren wurde der Handel mit Biotreibstoffen intensiviert,

nicht zuletzt auch durch Subventionen. Biotreibstoffe schienen die Lösung, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Nach dem Boom der Biotreibstoffe der ersten Generation machen sich auch kritische Stimmen bemerkbar, welche die positive Ökobilanz mit fundierten Erkenntnissen in Frage stellen. Hoffnungsträger sind mittlerweile die Biotreibstoffe der zweiten Generation geworden. Bei diesen gilt es jetzt, die Ökobilanz sorgfältig zu prüfen, und differenziert je nach Herstellungstechnologie zu betrachten ([www.idw-online.de](http://www.idw-online.de)). Auch Fragen des Bioenergie-Potenzials werden berechtigterweise gestellt. Eine deutsche Studie konnte zeigen, dass nachhaltig produzierte Bioenergie bis zur Mitte dieses Jahrhunderts etwa ein Zehntel des weltweiten Bedarfs an Primärenergie decken kann. Für die nachhaltige Nutzung von Bioenergie ist ein Potenzial von 80 bis maximal 170 Exajoule (EJ, 10<sup>18</sup> Joule) im Jahre 2050 angegeben. Diese Grössenordnung entspricht auch den veröffentlichten Zahlen der IEA [26]. Zum Vergleich: In der Schweiz beträgt der jährliche Energiebedarf 865 PJ (2007). Ein mittlerer Wert von 120 EJ pro Jahr entspricht in etwa einem Viertel des heutigen weltweiten Primärenergiebedarfs und knapp einem Zehntel des Bedarfs im Jahr 2050. Es wird davon ausgegangen, dass bis zum Jahr 2050 etwa die Hälfte des jährlichen Potenzials, 85 EJ, wirtschaftlich erschlossen werden kann. Untersuchungen haben ergeben, dass das Potenzial der Bioenergie die Kosten für den Klimaschutz massgeblich beeinflussen: Je höher das Potenzial, umso geringer sind die Gesamtausgaben zum Erreichen des Ziels, die globale Erwärmung auf 2 °C zu begrenzen ([www.idw-online.de](http://www.idw-online.de)).

Mit der Mikroalgenproduktion tut sich ein neues Feld der Biomasseproduktion auf. Mikroalgen betreiben Photosynthese mit einem besonders hohen Wirkungsgrad. Ihre Biomasse kann zur Produktion von Biogas, Biodiesel und Bioethanol genutzt werden. Bei der Algenkultivierung können zusätzlich CO<sub>2</sub>-Abgase aus Kraft-, Zement- oder Kalkwerken genutzt werden. Auf internationaler Ebene hat das Wettrennen um die besten Konzepte längst begonnen. Bislang sind die Techniken jedoch noch nicht ausgereift. Das Thema hat mittlerweile weltweit Fahrt aufgenommen. Anfang 2007 vermeldete das spanische Biotech-Unternehmen Bio-Fuel-Systems den Bau der weltweit ersten industriellen Anlage zur Algensprit-Produktion in der Region Alicante. Royal Dutch Shell plc und HR Biopetroleum haben den Bau einer Pilotanlage zum Anbau von Meeresalgen auf Hawaii angekündigt. In Israel hat die Firma Seambiotic eine Algenmassenproduktion mit Kraftwerksabgasen in «Open Pond»-Systemen bereits realisiert. Besonders in den USA gibt es eine Vielzahl von Start-up-Firmen mit ersten Pilotprojekten ([www.idw-online.de](http://www.idw-online.de)).

Bezüglich dem Energielieferanten Holz ist die Pelletnachfrage sowohl in Österreich, als auch in Deutschland stark angestiegen. Stark wächst auch die Nutzung von Pellets für die Beheizung grosser Objekte wie Hotels, Gewerbebetriebe oder Wohnhausanlagen (Nr. 34 Holzzentralblatt). Gemäss Angaben aus Deutschland hat sich die Pelletproduktion innert Jahresfrist verdoppelt. In Deutschland werden zurzeit jährlich 2,2 Mio. t Pellets hergestellt. Neue Unternehmen sind in den Pelletmarkt eingestiegen, bestehende haben ihre Kapazitäten erweitert. Die Rohstoffbasis zur Herstellung von Holzpellets hat sich im Vergleich zu den vergangenen Jahren kaum verändert. Die meisten Pelletproduzenten beziehen ihren Rohstoff in Form von Sägemehl oder -spänen

als Nebenprodukte von Sägewerken. Allerdings sind neue Rohstoffquellen wie Waldrestholz, schwache Äste und Baumkronen oder aktuell auch Kurzumtriebsholz aus schnell wachsenden Weiden im Kommen (Nr. 33 Holzzentralblatt). In Deutschland rechnet man mittelfristig mit einem Marktanteil an Pelletheizungen von 3 bis 5 % am Heizungsmarkt, was bei geschätzten 20 Mio. Anlagen einen Bestand zwischen 600'000 und 1 Mio. bedeutet (Nr. 30 Holzzentralblatt). In Europa könnte sich die Produktion von Energiepellets bis 2020 auf 70 Mio. t/a verzehnfachen. Damit könnte ein Drittel des derzeitigen Heizölverbrauchs und rund 3 % der Kohlekraftwerke durch den aus Holz produzierten Energieträger ersetzt werden (Nr. 30 Holzzentralblatt).

## Liste der F+E-Projekte

- [1] U. Elber, Vision Engineering GmbH: Feuchtegehalt-Änderungen des Waldfrischholzes bei Lagerung im Wald (Schlussbericht Projekt 101410).
- [2] Eidg. Energieforschungskommission CORE: Konzept der Energieforschung des Bundes 2008–2011 (<http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de>).
- [3] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), J. Good, Verenum, Zürich, A. Doberer, HSLU Horw R. Bühler, Umwelt & Energie, Maschwanden: Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70kW (Jahresbericht Projekt 101905).
- [4] A. Prévôt (andre.prevot@psi.ch), U. Baltensperger, PSI, Villigen : Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase (Jahresbericht Projekt 102207).
- [5] B. Salerno (basso.salerno@sesolar.ch) Salerno Engler GmbH, Langenbruck, A. Jenni, ardens GmbH, Liestal, D. Schlottmann, Lopper AG, Buochs: Buondi-Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel (Jahresbericht Projekt 102525).
- [6] L. Konersmann (Lars.Konersmann@solarenergy.ch), R. Haberl, E. Frank, SPF, Rapperswil: Pelletsolar-2 Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand (Jahresbericht Projekt 101792).
- [7] L. Konersmann (Lars.Konersmann@solarenergy.ch), M. Haller, P. Vogelsanger, SPF Rapperswil: Pelletsolar: Leistungsanalyse und Optimierung eines Pelletsolkombinierten Systems für Heizung und Warmwasser (Schlussbericht Projekt 101792).
- [8] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch): 10. Holzenergie-Symposium: Ökonomie, Technik und Luftreinhaltung. Tagung an der ETH Zürich am 12. September 2008, Verenum Zürich 2008, [www.holzenergiesymposium.ch](http://www.holzenergiesymposium.ch).
- [9] T. Schildhauer (tilman.schildhauer@psi.ch), S. Biollaz, PSI, Villigen: Hochtemperatur-Entschwefelung für biogene Produktgase – Design und Optimierung (Jahresbericht Projekt 102133).
- [10] J. Müller (johannes.mueller@psi.ch), F. Vogel, PSI, Villigen: Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse (Jahresbericht Projekt 102301).
- [11] M. Wellinger (marco.wellinger@psi.ch), J. Wochele, Ch. Ludwig, PSI, Villigen: Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online Messung von Alkalien in Prozessgasen (MOPSID: Monitoring of Process Gases with a Surface Ionization Detector) (Jahresbericht Projekt 102093).
- [12] W. Edelmann (edelmann@arbi.ch), Arbeitsgemeinschaft Bioenergie, Baar: Bestimmung der TS- und OS-Gehalte von Ausgangsmaterialien für die Feststoffvergärung (Schlussbericht Projekt 102112).
- [13] R. Warthmann (Rolf.Warthmann@zhaw.ch), M. Kühni, ZHAW Wädenswil: Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz (Jahresbericht Projekt 102774).
- [14] J.-L. Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen, U. Meier, Meritec GmbH, Guntershausen: Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bioreaktor (MBRII) (Jahresbericht Projekt 102406).
- [15] S. Gutzwiller (stephan.gutzwiller@eicher-pauli.ch): Abwärmennutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Schlussbericht 102315).
- [16] T. Bakx (Toine.Bakx@erep.ch), Y. Membrez, Erep SA, Aclens, A. Joss, Eawag, Dübendorf : Etat de l'art des méthodes (rentables) pour l'élimination, la concentration ou la transformation de l'azote pour les installations de biogaz agricoles de taille petite/moyenne (Jahresbericht Projekt 102684).
- [17] S. Baum (sebastian.baum@zhaw.ch), U. Baier, ZHAW, Wädenswil, J. Judex, S. Biollaz, PSI, Villigen : Methanverluste bei der Biogasaufbereitung (Schlussbericht Projekt 101718).
- [18] M. Schmid (schmid@oekozentrum.ch), H.P. Zumsteg, Ökozentrum, Langenbruck: Emissionsarme Verbrennung und energetische Nutzung von Schwachgasen bis unter 2.5MJ/m<sup>3</sup> (Jahresbericht Projekt 102105).
- [19] D. Finger (david.finger@infras.ch), N. Kljun, M. Keller, INFRAS, Bern: Die Einführung von Gasbussen bei Bernmobil (Schlussbericht Projekt 101462).
- [20] A. Märki (Alexandra.Maerki@ebp.ch), K. Serafimova, EBP, Zollikon: Konzept für die Infothek Biomasse (Konzeptentwurf Projekt 102782).
- [21] S. Baum (baum@zhaw.ch), U. Baier: Biogene Güterflüsse der Schweiz 2006, Massen- und Energieflüsse. Umwelt-Wissen Nr. 0831. Bundesamt für Umwelt, Bern: 115 S.
- [22] A. Rügsegger (adrian.ruegsegger@swtr.admin.ch), TA Swiss, Bern: Technology Assessment Studie «Treibstoffe aus Biomasse-zweite Generation» (Sitzungsunterlagen Projekt 102772).

## Liste der P+D-Projekte

- [23] T. Anken (thomas.anken@art.admin.ch), Agroscope, Tänikon: Miscanthus Kleinfeuerung (Jahresbericht Projekt 102882).
- [24] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@hslu.ch): Forschungslabor Bioenergie (Schlussbericht 102306).

## Referenzen

- [25] International Energy Agency (IEA) Technology Agreement Bioenergy (<http://www.ieabioenergy.com/>).
- [26] International Energy Agency (IEA) Energy Technology Perspectives 2008, Scenarios and Strategies to 2050.

### Impressum

Juni 2009  
Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern  
Druck: Ackermann Druck AG, Bern-Liebefeld  
Bezug der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

### Programm- und Bereichsleiterin

Dr. Sandra Hermle  
Bundesamt für Energie BFE  
CH-3003 Bern  
[sandra.hermle@bfe.admin.ch](mailto:sandra.hermle@bfe.admin.ch)