

Schlussbericht vom Dezember 2005

# Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen Verbrennungsversuche Frühjahr 2005

Projekt Nr. 100973

Vertrag Nr. 151447



Ausgearbeitet durch

Ruedi Bühler  
Jean-Louis Hersener  
Andres Jenni

Im Auftrag des  
Bundesamtes für Energie

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

**Auftragnehmer:**

Arbeitsgemeinschaft Biomasse, c/o Umwelt + Energie, Sagiweg 4, 8933 Maschwanden

**Autoren:**

Ruedi Bühler, Umwelt + Energie, Maschwanden

Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen

Andres Jenni, ardens GmbH,

**Mitarbeit**

Schmid AG, Eschlikon

A. Villiger, Sins

T. Wehrli, Möriken

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Biomasse“ des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt sind alleine die Studiennehmer/in verantwortlich.

**Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · [www.admin.ch/bfe](http://www.admin.ch/bfe)

Bezugsquelle: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) · [www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch)

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Zusammenfassung .....  | 4  |
| Abstract .....   | 5  |
| 1. Ausgangslage .....  | 6  |
| 2. Projektziele.....   | 7  |
| 3. Versuchsanlage .....  | 7  |
| 3.1 Beschreibung der Anlage .....  | 7  |
| 3.2 Technische Angaben .....   | 8  |
| 3.3 Wärmeleistungsbedarf.....  | 9  |
| 3.4 Datenerfassung und Datenauswertung .....                                       | 9  |
| 3.5 Mischung von Hauptbrennstoff und Zusatzbrennstoff.....                         | 10 |
| 4. Brennstoffe der Versuchreihe «Frühjahr 2005» .....                              | 11 |
| 4.1 Pferdemist.....  | 11 |
| 4.2 Getreideabgang.....  | 12 |
| 4.3 Pilzkompost .....  | 12 |
| 4.4 Charakterisierung der Versuchsbrennstoffe .....                                | 12 |
| 5. Mess- und Versuchsprogramm .....  | 16 |
| 5.1. Ziele der Versuche .....  | 16 |
| 5.2 Programm .....   | 16 |
| 5.3 Datenaufzeichnung .....  | 17 |
| 6. Versuchsergebnisse .....  | 18 |
| 6.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel).....                   | 18 |
| 6.2 Versuche mit Pferdemist/Holz-Mischung .....                                    | 18 |
| 6.3 Versuch mit der Mischung Pferdemist/Getreideabgang .....                       | 21 |
| 6.4 Versuch mit 100% Getreideabgang.....   | 22 |
| 6.5 Versuch mit Pilzkompost/Holz.....  | 23 |
| 7. Erkenntnisse aus den Versuchen.....   | 24 |
| 7.1 Einsatz von Holz allein.....   | 24 |
| 7.2 Zumischung von schwierig zu verbrennender Biomasse aus Zusatzsilo .....        | 24 |
| 7.3 Eignung des Feuerungssystems für die Verbrennung schwieriger Biomasse .....    | 25 |
| 7.4 Eignung des Elektrofilters.....  | 25 |
| 7.5 Pferdemist als Brennstoff .....  | 26 |
| 7.6 Getreideabgang als Brennstoff .....  | 26 |
| 7.7 Pilzkompost als Brennstoff .....   | 27 |
| 8. Schlussfolgerungen.....   | 27 |
| 9. Ausblick .....  | 27 |
| 10. Literatur .....  | 28 |
| Anhang A    Beispiel einer Emissionsmessung mit dem Emissionsmessgerät «MAD» ..... | 29 |
| Anhang B    Auszug aus den Messprotokollen von T. Wehrli.....                      | 30 |
| B.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel) vom 11.4.05 .....      | 30 |
| B.2 Emissionsmessung mit Pferdemist-Holz-Mischung vom 21.4.05 .....                | 31 |
| B.3 Emissionsmessung mit Pferdemist/Getreideabgang vom 18.5.05 .....               | 32 |
| B.4 Emissionsmessung mit Getreideabgang (100%) vom 20.5.05 .....                   | 33 |
| B.5 Emissionsmessung mit Pilzkompost/Holz-Mischung vom 10.6.05 .....               | 33 |

## Zusammenfassung

Erneuerbare Energie, welche aus Biomasse gewonnen werden kann, soll vermehrt gefördert werden. Neben Holz können auch andere Biomassesortimente genutzt werden, u.a. aus der landwirtschaftlichen Produktion bzw. aus nachgelagerten Verarbeitungsbetrieben. Im Vergleich zu Holz stellen diese Brennstoffe höhere Anforderungen an eine zuverlässige, emissionsarme Nutzung. Mit einer Serie von mehrtägigen Versuchen sollen daher für mehrere Brennstoffsorbitimente die folgenden Ziele erreicht werden:

- Kenntnisse bezüglich Emissionen und Dauerverhalten im Betrieb. Die Erfahrungen aus früheren Kurzzeitversuchen beziehen sich vor allem auf Brennstoffmischungen mit Güllefeststoffen, welche in dieser Versuchsserie nicht weiter untersucht werden. In der Luftreinhalte-Verordnung sind diese Biomassesortimente als Brennstoff nicht erwähnt.
- Eruiieren optimaler ökonomischer und ökologischer Brennstoffmischungen bezüglich
  - Emissionen
  - Betriebssicherheit und technischer Anforderungen
  - Wirtschaftlichkeit.

Der Betrieb Villiger, Holderstock, Sins ist ein geeigneter Standort ist für eine Anlage, auf welcher die Versuche mit anspruchsvollen Biomassebrennstoffen durchgeführt werden können. Der Prozesswärmebedarf für die Obsttrocknung erlaubt den Dauerbetrieb der Verbrennungsversuche. Die Feuerung verfügt über einen gekühlten Rost. Die Abgasreinigung erfolgt mit einem Elektrofilter. Die Anlage ist mit einem Zusatzsilo ausgerüstet, von welchem der Zusatzbrennstoff «schwierige Biomasse» dem Hauptbrennstoff «trockene Hackschnitzel» in einem wählbaren Mischverhältnis zugemischt werden kann.

Von Mitte April bis Mitte Juni 2005 wurden folgende Brennstoffmischungen untersucht:

- Pferdemit/Holz
- Pferdemit/Getreideabgang
- 100% Getreideabgang
- Pilzkompost/Holz.

Die Versuche führten zu folgenden Erkenntnissen:

- Pferdemit (mit Hobelspänen als Einstreu) ist ein geeigneter Zusatzbrennstoff für Rostfeuerungen mit gekühltem Rost, wenn der zweite zu verwendende Brennstoff einen Wassergehalt unter 30% aufweist.
- Getreideabgang von Getreidesammelstellen ist ein geeigneter Brennstoff für eine Rostfeuerung mit gekühltem Rost. Dieser Brennstoff eignet sich sowohl als Alleinbrennstoff, als auch als Zusatz zu einem Brennstoff mit hohem Wassergehalt und tiefem Ascheschmelzpunkt, wie das z.B. bei Pferdemit der Fall ist.
- Die Anlage Villiger erfüllt noch nicht alle Forderungen für einen störungsarmen Dauerbetrieb. Dazu sind Ergänzungsmaßnahmen notwendig.
- Der eingesetzte Elektrofilter erfüllt die Anforderungen nicht. Ob und allenfalls wie mit einem Elektrofilter die Anforderungen erfüllt werden könnte, ist offen. Dazu sind zusätzliche Untersuchungen notwendig.
- Pilzkompost ein schwieriger Zusatzbrennstoff. Ob mit einem Gewebefilter mit Beimischung von Zuschlagstoffen die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können ist offen. Zudem ist unsicher, ob mit dem hohen Wassergehalt von Pilzkompost die Betriebsbedingungen für ein Gewebefilter erfüllt werden können.
- Die Anlage Villiger eignet sich für die Durchführung weiterer Versuche mit schwieriger Biomasse wie Ernterückstände, Landschaftspflegematerial, weitere Arten von Getreideabfall Pferdemit auf Strohbasis etc. Bei diesen Versuchen könnte auch die Problematik des Elektrofilters vertieft untersucht werden.

## Abstract

Renewable energy should be further enhanced. Besides wood also other biomass can be used, e.g. agricultural waste. Clean and reliable combustion of these waste materials is more difficult to achieve than with wood. In a series of combustion tests of lasting for several days, for these biomass types the following objectives should be achieved:

- Knowledge as regards emissions and long-term operational behaviour. Experience from former short-term tests was mainly gained from combustion of manure sludge.
- Find the optimal fuel mixture as regards economic and ecological aspects.

The Villiger plant at Sins has appropriate conditions for such tests. The demand for process heat for fruit drying enables continuous heat production during the tests. The firing has a cooled grate. The flue gas is cleaned with an electrostatic precipitator. The plant equipped with a second fuel storage for a second fuel, which can be mixed to the main fuel in an adjustable mixing ratio.

From mid April to mid June 2005 the following fuel mixtures were tested:

- Horse manure / wood
- Horse manure / cereal waste
- 100% cereal waste
- Mushroom compost with wood.

The following results were achieved by the tests:

- Horse manure (with wood shavings as bedding) is a suitable additional fuel, if a cooled grate is applied and the other part of the fuel mixture has water content below 30%.
- Cereal waste is a suitable fuel if a cooled grate is applied. This fuel can be used by its own or as addition to a fuel with high water content and low ash melting point, as this is the case for horse manure.
- The Villiger plant does not fulfil all requirements for a reliable operation, if using this biomass waste material. Some improvements are necessary.
- The electrostatic precipitator (ESP) installed at the Villiger plant does not fulfil the requirements. It is an open question, whether an ESP, which is designed for this type of fuel could fulfil the requirements. To answer this question, additional tests are necessary.
- Mushroom compost is a difficult fuel. It is an open question whether a bag house filter (with addition of aggregates) could meet the requirements. Also it is questionable if a bag house filter is appropriate for the flue gas cleaning of mushroom compost, which has high water content.
- The Villiger plant is suitable for further tests with biomass, which is difficult to combust like harvest waste, material from landscape conservation, different type of cereal waste and horse manure with straw as bedding. Together with these tests, also the problems of ESP application could further be investigated.

# 1. Ausgangslage

Erneuerbare Energie, welche aus Biomasse gewonnen werden kann, soll vermehrt gefördert werden (Energie Schweiz, Rio-Ziele, kantonale Programme etc.).

Neben Holz können auch andere Biomassesortimente genutzt werden, u.a. aus der landwirtschaftlichen Produktion bzw. aus nachgelagerten Verarbeitungsbetrieben. Beispiele:

- Landschaftspflegematerial aus Naturschutzflächen
- Ernterückstände
- Getreidebruch und anderer Reinigungsabgang
- Tabakrippen
- Müllereiabgang
- Holz aus Landschaftspflege
- Pferdemit
- Pilzkompost

Im Vergleich zu Holz stellen diese Brennstoffe höhere Anforderungen an eine zuverlässige, emissionsarme Nutzung. In der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) sind diese Brennstoffe nicht erwähnt. Da es sich zum Teil um Abfallbrennstoffe handelt, werden – wenn ein Antrag um Bewilligung für die Verwendung als Brennstoff gestellt wird – in der Regel auch strengere Emissionsgrenzwerte verlangt als bei der Verbrennung von Holzbrennstoffen.

Für diese wenig erforschten Biomassesortimente können mit Verbrennungsversuchen auf der wichtige Erkenntnisse zur technischen, ökonomischen und ökologischen Durchführbarkeit gewonnen werden. Die Versuche sollen auch Erkenntnisse liefern, wie in der Luftreinhalte-Verordnung die Emissionsvorschriften für diese Biomassebrennstoffe formuliert werden könnten.

Untersuchungen im Rahmen der Projekte «Energiegras» [1] und «Energetische Nutzung von Biomasse» [2] haben gezeigt, dass eine optimale Verbrennung von landwirtschaftlicher und landwirtschaftsähnliche Biomasse wesentlich schwieriger ist als die Verbrennung von Holz und daher erhöhte Anforderungen an die Feuerung und die Abgasreinigung gestellt werden. Diese Untersuchungen wie auch Tests auf einer Versuchsanlage in Gembloux, Belgien [3] mit schwierigen Biomassesortimenten zeigten, dass

- einige der oben erwähnten Brennstoffsportimente wahrscheinlich nur als Zusatzbrennstoff zu trockenen Hackschnitzeln oder anderen trockenen Biomassebrennstoffen eingesetzt werden können
- sich eine Feuerung mit gekühltem Rost, gekühlten Seitenwänden und Abgasrückführung für die Verbrennung von landwirtschaftlicher Biomasse eignet. Damit die Anforderungen der Luftreinhalte erfüllt werden können, müssen die Abgase mit einem Filter (z.B. Elektrofilter oder Gewebefilter) gereinigt werden. Noch gibt es aber offene Fragen.

In Vorabklärungen wurden Anlagestandorte gesucht, bei welchen länger dauernde Versuche mit anspruchsvollen Biomassebrennstoffen durchgeführt werden können. Die Anforderungen an eine solche Anlage sind:

- Prozesswärmebedarf, damit die Anlage während der Verbrennungsversuche im Dauerbetrieb (ohne Ein- und Ausschalten der Verbrennungsluftzufuhr) gefahren werden kann.
- Feuerung mit gekühltem Rost
- Abgasreinigung mit Elektro- oder Gewebefilter
- Die Anlage muss so konzipiert sein, dass dem Hauptbrennstoff (z.B. trockene Hackschnitzel) der Zusatzbrennstoff «schwierige Biomasse» zugemischt werden kann, wobei das Mischverhältnis so verändert werden kann, dass die Anlage mit dem optimalen, in Vorversuchen zu bestimmenden Mischverhältnis gefahren werden kann. Die erfordert neben dem Silo des Hauptbrennstoffes ein zusätzliches Silo für den Zusatzbrennstoff.

Die Vorabklärungen zeigten, dass der Betrieb Villiger, Holderstock, Sins ein geeigneter Standort ist für eine Anlage, auf welcher die Versuche mit anspruchsvollen Biomassebrennstoffen durchgeführt werden können. Die Anlage ist in Kapitel 3 beschrieben.

## 2. Projektziele

Mit einer Serie von mehrtägigen Versuchen sollen für jedes Brennstoffsortiment die folgenden Zielsetzungen erreicht werden:

- Kenntnisse bezüglich Emissionen und Dauerverhalten im Betrieb. Die bisherigen Erfahrungen in den Kurzzeitversuchen beziehen sich vor allem auf Brennstoffmischungen mit Güllefeststoffen, welche in dieser Versuchsserie nicht weiter untersucht werden.
- Eruiere optimaler ökonomischer und ökologischer Brennstoffmischungen bezüglich
  - Emissionen
  - Betriebssicherheit und technischer Anforderungen
  - Wirtschaftlichkeit.

## 3. Versuchsanlage

### 3.1 Beschreibung der Anlage

In Ergänzung zum Landwirtschaftsbetrieb der Familie Villiger werden auf dem Hof Villiger getrocknete Birnen, Apfelringe und Apfelstücke hergestellt. Die Wärme für Trocknung und Raumheizung wurde bis Anfang 2005 mit einer Unterschubfeuerung mit einer Leistung von 350 kW erzeugt. Diese Heizungsanlage genügte den Anforderungen nicht mehr und musste ersetzt werden.

Die Bedingungen für die Verbrennungsversuche mit schwieriger Biomasse sind beim Betrieb Villiger gegeben. Unter der Voraussetzung, dass die Anlage als P+D-Anlage finanziell unterstützt wird, war A. Villiger bereit, die Anlage so zu konzipieren und messtechnisch auszurüsten, dass solche Versuche durchgeführt werden können. Das Bundesamt für Energie sicherte diese finanzielle Unterstützung zu.

Um die Anforderungen an die Verbrennungsversuche erfüllen zu können, wurde die Anlage nach folgenden Prinzipien gebaut:

- Die schwierig zu verbrennenden Biomassesortimente können dem Hauptbrennstoff «Hackschnitzel» in einem vorzugebenden Verhältnis zugemischt werden. Diese Zumischung muss auch im Dauerbetrieb möglich sein.
- Damit die Emissionsanforderungen erfüllt werden, wurde die Anlage mit einem Elektrofilter ausgerüstet.

Der Hauptbrennstoff sind Hackschnitzeln von Baurestholz und Restholz aus der Holzverarbeitung (Spanplattenabschnitte).

Abbildungen 1 und 2 zeigen die Pilotanlage Villiger.



Abbildung 1: Feuerung und Kessel der Anlage Villiger



*Abbildung 2:* Brennstofflager der Anlage Villiger. Links das Silo für den Hauptbrennstoff «Hack-schnitzel». Rechts das Silo für den Zusatzbrennstoff, welcher dem Hauptbrennstoff zugemischt werden kann. Auf dem Bild wird als Zusatzbrennstoff Pferdemist verwendet.

### 3.2 Technische Angaben

- Silo- /Siloaustragung: 2 getrennte Brennstoffsilos: Grosses Silo mit zwei Schubstangen für den Holzbrennstoff, kleineres Silo mit einer Schubstange für den Zusatzbrennstoff „schwierige Biomasse“
  
- Transport und Beschickung: Queraustragung von den beiden Silos mit Schnecken in einen gemeinsamen Mischschacht. Dosierung und Mischung des Brennstoffes mit Steilförderschnecke über Fallschacht zu den zwei Stokerschnecken.
  
- Feuerung (Abbildung 3): Nennwärmeleistung: 500 – 600 kW  
Wassertemperatur: max. zulässig 110 °C  
Feuerungstyp: Schräg-Vorschubrost  
Flammenführung im Gegenstrom  
Leistungsregelung Feuerung 30 - 100 %  
Primärluftzonen: 2  
Gekühlte Rostbalken, wobei die festen Balken wassergekühlt und die beweglichen luftgekühlt sind  
Bewegung des Vorschubrostes über hydraulischen Antrieb
  
- Entaschung: Mechanisch in einen Container
  
- Abgasreinigung: 1. Stufe: Multizyklon  
2. Stufe: Elektrofilter



Abbildung 3: Schmid Rostfeuerung UTSW mit gekühltem Rost und Seitenwänden

### 3.3 Wärmeleistungsbedarf

Basierend auf den Wärmezählerablesungen während der Verbrennungsversuche mit schwieriger Biomasse wurde der max. Wärmeleistungsbedarf der Wärmebezüge wie folgt geschätzt:

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| – Vortrockner, neu          | ca. 150 kW |
| – Nachtrockner, bestehend   | ca. 150 kW |
| – Trockenschränke Birnen    | ca. 100 kW |
| – Trockenschrank Apfelringe | ca. 100 kW |
| – Raumwärme                 | ca. 60 kW  |
| Total                       | ca. 560 kW |

### 3.4 Datenerfassung und Datenauswertung

Gemäss der Vereinbarung mit dem Bauherrn müssen folgende Messdaten erfasst werden:

- Temperatur Fassade Nord
- Temperatur Holzessel: Eintritt
- Temperatur Holzessel: Austritt
- Temperatur Hauptvorlauf nach Bypass
- Temperatur Hauptrücklauf vor Bypass
- Temperatur Hauptrücklauf nach Bypass
- Wärmezähler Holzessel
- Holzessel: Sollwert der Feuerungsleistung
- Holzessel: Istwert Verbrennungstemperatur
- Holzessel: Istwert Primärvolumenstrom 1
- Holzessel: Istwert Primärvolumenstrom 2
- Holzessel: Istwert Sekundärvolumenstrom 1
- Holzessel: Istwert Sekundärvolumenstrom 2
- Holzessel: Abgastemperatur
- Holzessel: Luftüberschuss  $\lambda$

Die Speicherung der Daten auf dem fest eingebauten PyroWeb der Schmid-Elektronik. Speicherung der Daten mindestens der letzten 4 Wochen.

Bis zum Sommer 2005 war der Wärmezähler noch nicht an die SPS von Schmid angeschlossen. Während der Versuche wurden daher die vom Wärmezähler gemessenen Leistungen als Momentanwert von Hand erfasst. Sie wurden jeweils vor, während und nach den Emissionsmessungen abgelesen.

Bei der Auswertung der Versuche zeigte sich, dass die Daten (mit Ausnahme der Leistung gemäss Wärmehändler) wohl aufgezeichnet wurden. Wegen einem Softwarefehler in der periodischen Datenspeicherung konnten die auf diese Weise ausgelesenen Daten aber nicht den Versuchstagen zugeordnet werden. Da die Telefonverbindung zum Modem der SPS von Schmid nicht vorhanden war, wurde der Fehler erst beim Auslesen der Daten vor Ort – nach der periodischen Sicherung – festgestellt (siehe auch Kap. 5.3).

Es war vorgesehen, dass für die Messung und Aufzeichnung der wichtigsten Emissionsparameter (Abgastemperatur, CO, CO<sub>2</sub>) für die gesamte Dauer der Versuche das Messgerät MAD zur Verfügung steht. Nach einer ersten erfolgreichen Testphase führte ein Defekt im PC des Messgerätes dazu, dass die Daten wohl gemessen, aber nicht mehr aufgezeichnet werden konnten (siehe auch Kap. 5.3).

### 3.5 Mischung von Hauptbrennstoff und Zusatzbrennstoff

Die Schubböden des Haupt- und des Zusatzsilos schieben den Brennstoff in die zugehörige Queraustragung (siehe Abbildung 4). Die Queraustragungsschnecken fördern den Brennstoff in den gemeinsamen Mischschacht (siehe Abbildung 5). Die Dosierung und Mischung des Brennstoffes erfolgt mit Steilförderschnecke aus dem Mischschacht zum Fallschacht über den zwei Stokerschnecken.

Das Mischverhältnis wird eingestellt durch Festlegen der Drehzahl (ergibt das Drehzahlverhältnis) und der Laufzeit (ergibt das Laufzeitverhältnis) der Queraustragungsschnecken. Meldet die Füllstandsanzeige im Mischschacht Brennstoffbedarf, so dreht sich die Queraustragungsschnecke des Zusatzbrennstoffes, bis die Füllstandsanzeige im Mischschacht «voll» meldet. Während dieser Laufzeit wird die Queraustragungsschnecke des Hauptbrennstoffes intervallweise zugeschaltet.

Die Vermischung der beiden Brennstoffe erfolgt ausschliesslich in der Steilförderschnecke.



*Abbildung 4:* Brennstoffaustragung aus den beiden Silos. Im Vordergrund ist der Hydraulikzylinder des Schubbodens des Hauptsilos zu sehen sowie die mit Hackschnitzeln gefüllte Queraustragung. Im Hintergrund dasselbe für den Zusatzbrennstoff (in dieser Aufnahme Pferdemist). In der Mitte rechts befindet sich der Mischschacht. In der Mitte links ist ein kurzes Stück des Steilförderkanals zu sehen.



Abbildung 5: Blick von oben in den Mischschacht. Links die Schnecke, gefüllt mit Pferdemist; rechts die Queraustragung des Hauptbrennstoffes Hackschnitzel.

## 4. Brennstoffe der Versuchreihe «Frühjahr 2005»

Mit möglichen Lieferanten von Biomassebrennstoffen und interessierten Nutzern dieser Brennstoffe wurden Gespräche geführt. Dabei hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, die Versuche in einzelnen Versuchsserien durchzuführen. Die Erfahrungen einer Versuchsserie sollen in der Planung weiterer Versuche berücksichtigt werden. Eine erste Versuchsserie wurde für die Zeit von Mitte April 2005 bis Mitte Juni 2005 geplant. Der vorliegende Bericht behandelt diese Versuchsserie «Frühjahr 2005»

Aufgrund der Vorabklärungen sollen die Versuche mit den nachfolgend beschriebenen Brennstoffen durchgeführt werden.

### 4.1 Pferdemist

In den Reitzentren werden in zunehmendem Mass Hobelspäne als Einstreu verwendet. Pferdemist mit Stroheinstreu wird vorwiegend in der Landwirtschaft eingesetzt. Pferdemist mit Hobelspänen steht für die energetische Verwertung (Verbrennung) zur Verfügung.

Pro Jahr und Pferd fallen 10 - 15 t Pferdemist an. Bei einem heutigen schweizerischen Pferdebestand von ca. 50'000 Pferden ergibt das mind. 500'000 t/a Pferdemist.

Pferdemist mit Hobelspänen als Einstreu besteht aus ca. 80 – 90% aus Hobelspänen, ca. 5% Stroh/Heu und ca. 10 – 15% Pferdekot. Bei den Vorabklärungen wurden folgende Angaben genannt: Wassergehalt max. 50%, Energieinhalt 2 - 3 MWh/t.

Nimmt man an, dass 20% des Pferdemistes unter Anwendung von Hobelspänen als Einstreu zur energetischen Verwertung anfallen, so ergibt sich daraus eine jährlich anfallende Energiemenge von mind. 250'000 MWh/a. Würde diese Energie zur Grundlastabdeckung (z.B. Vollbetriebsstundenzahl von 4'000 h/a) eingesetzt, so würde dies einer installierten Heizleistung auf der Basis von Pferdemist von ca. 50 MW entsprechen.

In einem Reitzentrum ausserhalb des Stadt Bern soll eine Anlage zur Verwertung von Pferdemist (mit Hobelspänen als Einstreu) geplant und realisiert werden. Die Kesselleistung der Biomasseanlage wird im Bereich von 500 kW bis 1 MW liegen. Weitere Interessenten für solche Anlagen sind aus dem Raum Zürich bekannt.

Für die Versuche im Frühjahr 2005 wird uns der Brennstoff vom Besitzer des Reitzentrums ausserhalb Bern zur Verfügung gestellt.

## 4.2 Getreideabgang

Es gibt drei Arten von Reinigungsabgang von Getreide:

- Bei der Ernte: Dieser Abgang besteht aus Bruchkörnern, Spelzen, Strohteilen, Unkrautsamen etc. Die Gesamtmenge liegt im Bereich von 20'000 t/a und entspricht damit einer Energiemenge von ca. 60'000 MWh/a.
- Im Verlaufe des Jahres fallen beim Umpumpen Staub und weitere Verunreinigungen an. Diese konstant anfallende Menge liegt im Bereich von 5'000 t/a und entspricht damit einer Energiemenge von ca. 15'000 MWh/a.
- Beim Bereitstellen von Getreide für Brotgetreide und Futtermittel fällt minderwertiges Getreide als Abgang an. Dieses Material könnte in Zukunft als Brennstoff in Frage kommen. Die zu erwartende Menge ist im Moment aber noch sehr unsicher. Sie könnte im Bereich von 20'000 t/a liegen.

Insgesamt fallen damit – je nach künftiger Entwicklung – für die energetische Verwertung 25'000 – 50'000 t/a an, was einer Energiemenge von ca. 70'000 – 150'000 MWh/a entspricht. Würde diese Energie zur Grundlastabdeckung (z.B. Vollbetriebsstundenzahl von 4'000 h/a) eingesetzt, so würde dies einer installierten Heizleistung auf der Basis von Getreideabgang von ca. 15 – 30 MW entsprechen.

Mit Getreideabgang sind im Frühjahr 2005 ein Dauerversuch mit einer Mischung „Pferdemist/Getreideabgang“ sowie ein Kurzzeitversuch (zur Bestimmung der Emissionen) mit 100% Getreideabgang vorgesehen. Die dazu benötigte Menge wird von einer Getreideannahmestelle zur Verfügung gestellt, welche an der energetischen Verwertung interessiert ist. Mit weiteren Interessenten bestehen Kontakte. Der Getreideabgang wird in Form von lose gepressten Briketts, abgepackt in 10 Big-bags zur Verfügung gestellt.

## 4.3 Pilzkompost

Pilzkompost, der bei den Pilzproduzenten zur Entsorgung anfällt, besteht aus

- einer Oberschicht aus Torf und
- einer Unterschicht aus ca. 90% Pferdemist, der Rest sind andere Zuschlagstoffe.

Da Pilzkompost vor dem Ausbauen mit Wasserdampf pasteurisiert werden muss, liegt der Wassergehalt in der Regel über 50%. Wegen dem hohen Wassergehalt und der Struktur muss dieses Material vor der Verbrennung wahrscheinlich mit einem anderen Brennstoff (z.B. trockene Hackschnitzel oder Getreideabgang) vermischt werden.

In der Schweiz fallen bei den 5 grössten Pilzproduzenten ca. 30'000 - 35'000 m<sup>3</sup>/a Pilzkompost an; entsprechend ca. 20'000 t/a. Der Heizwert liegt im Bereich von 2 MWh/t, was einer Energiemenge von ca. 40'000 MWh/a entspricht. Würde diese Energie zur Grundlastabdeckung (z.B. Vollbetriebsstundenzahl von 4'000 h/a) eingesetzt, so würde dies einer installierten Heizleistung auf der Basis von Pilzkompost von ca. 8 MW entsprechen.

Die Entsorgung dieses Materials stösst auf zunehmende Schwierigkeiten, weshalb die Pilzproduzenten an neuen Entsorgungslösungen interessiert sind. Da die Pilzproduzenten selber einen Bedarf für Raum- und Prozesswärme haben, könnten sie den Pilzkompost zur eigenen Energieabdeckung einsetzen. Der gesamtschweizerische Energiebedarf der Pilzproduzenten dürfte im Bereich von 5'000 - 10'000 MWh/a liegen und könnte damit – ohne Berücksichtigung der Probleme Bandlast/Spitzenlast – vollständig mit dem eigenen Brennstoff abgedeckt werden.

Der Pilzkompost für die Frühjahrsversuche wird von der Wauwiler Champion AG, abgepackt in Big-bags zur Verfügung gestellt.

## 4.4 Charakterisierung der Versuchsbrennstoffe

Die Brennstoffeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Einzelne Werte wurden durch Brennstoffanalysen ermittelt, welche im Rahmen des Versuchsprogramms ermittelt wurden. Andere Werte wurden geschätzt. Die Datenquelle ist in der Legende der Tabelle angegeben

Die Abbildungen 6 bis 9 zeigen die eingesetzten Brennstoffe.



*Abbildung 6:* Hauptsilo mit Hauptbrennstoff: Hackschnitzel von Baurestholz und Restholz aus der Holzverarbeitung (Spanplattenabschnitte)



*Abbildung 7:* Pferdemit im Zusatzsilo



*Abbildung 8:* Getreidebruch, angeliefert in Big-bags in Form von lose gepressten Briketts. Schon im Big-bag ist ein grosser Teil der Briketts in Staub zerfallen



*Abbildung 9:* Pilzkompost. Der Brennstoff ist von weisslich gefärbt, wahrscheinlich verursacht durch den Zuschlagstoff Gips. Im Klumpen im Vordergrund gut sichtbar, wie das Grundmaterial mit Pilz-Mycel durchsetzt ist

Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen

|  | Hackschnitzel aus Baurestholz<br>(Haupt-/Referenzbrennstoff) | Pferdemist auf Basis von Ho-<br>belspänen | Getreideabgang     | Pilzkompost   |
|--|--|---|--------------------|---|
| Schüttgewicht [kg/Srm]                           | 245 <sup>1)</sup>  | 320 – 370 <sup>1)</sup>                   | 430 <sup>1)</sup>  | 447 <sup>1)</sup>   |
| Wassergehalt [%]                                 | 22 <sup>1)</sup>   | 63/64 <sup>1)</sup> , 69 <sup>2)</sup>    | 16 <sup>3)</sup>   | 45 <sup>8)</sup> , 61 <sup>8)</sup> , 53 <sup>4)</sup> , 64 <sup>1)</sup> |
| Heizwert [kWh/kg, bezogen auf feuchten<br>Brst.] | 4 <sup>5)</sup>  | 1.63 <sup>2)</sup>                        | 4.05 <sup>3)</sup> | 1.7 <sup>8)</sup>   |
| Energieinhalt pro Schüttraummeter<br>[kWh/Srm]   | 980  | 521 - 603                                 | 1740               | 760   |
| Kohlenstoffgehalt, wasserfrei [%]                | 50 <sup>7)</sup>   | 48.12 <sup>2)</sup>                       | 46.6 <sup>3)</sup> |   |
| Wasserstoffgehalt, wasserfrei [%]                | 6  | 4.67 <sup>2)</sup>                        | 5.57 <sup>3)</sup> |   |
| Stickstoffgehalt [%]                             | 0.08   | 0.48 <sup>2)</sup>                        | 1.3 <sup>3)</sup>  |   |
| Schwefelgehalt, wasserfrei [%]                   | 0.01   | 0.09 <sup>2)</sup>                        |                    |   |
| Chlorgehalt [%]                                  | <0.001   | 0.18 <sup>2)</sup>                        |                    |   |
| Ascheerweichungspunkt [°C]                       | 1470   | 980 <sup>2)</sup>                         | 1060 <sup>3)</sup> |   |
| Halbkugelpunkt [°C]                              | 1600   | 1100 <sup>2)</sup>                        | 1180 <sup>3)</sup> |   |
| Fliesspunkt [°C]                                 | 1640   | 1220 <sup>2)</sup>                        | 1320 <sup>3)</sup> |   |

<sup>1)</sup> überschlägige Bestimmung im Rahmen der Verbrennungsversuche mit dem Versuchsbrennstoff

<sup>2)</sup> Analyse Intertek, mit Probe aus Kt. BE (nicht identisch mit Versuchsbrennstoff)

<sup>3)</sup> Analyse Intertek, mit Versuchsbrennstoff

<sup>4)</sup> Trockenenschrank Schmid mit dem Versuchsbrennstoff

<sup>5)</sup> Literaturwert für Fichte

<sup>6)</sup> Schätzung der ARGE Biomasse

<sup>7)</sup> Typische Werte für naturbelassenes Holz, Grundlagen und Technik, QS Holzheizung, 2001

<sup>8)</sup> Ergebnisse früher (2003 /2004) durchgeführter Laboranalysen

*Tabelle 1:* Daten zu den Brennstoffen, welche in den Verbrennungsversuchen vom Frühjahr 2005 eingesetzt wurden

## 5. Mess- und Versuchsprogramm

### 5.1. Ziele der Versuche

In der ersten Versuchsserie vom Frühjahr 2005 mit schwierig zu verbrennender Biomasse sollten die nachfolgend pro Brennstoffsoriment aufgeführten Ziele erreicht werden. Der Massstab für die Beurteilung der Verbrennungsqualität und der Abgasemissionen ist dabei die Luftreinhalte-Verordnung, Anhang 2, Ziffer 72 (Anlagen zur Verbrennung von Altholz, Papier- und ähnlichen Abfällen).

#### **Pferdemist**

- Kenntnis des Mischverhältnisses „Pferdemist/Hackschnitzel“ für einen optimalen Betrieb bezüglich Betriebsverhalten und Emissionen. Ziel: 100% Pferdemist.
- Kenntnis der zu erwartenden relevanten Abgasemissionen bei der Verbrennung mit dem optimalen Mischverhältnis.
- Kenntnis der bei der Verbrennung anfallenden Aschemengen (für eine allfällige Bestimmung der Aschequalität werden Rückstellproben genommen)
- Hinweise über erhöhte Korrosionsgefahr (im Vergleich mit Hackschnitzeln erhöhte HCl und SO<sub>2</sub>-Werte?)
- Kenntnis über das Dauerverhalten im Betrieb (5-7 Tage Dauerbetrieb).
- Beurteilung der Emissionen und deren Auswirkungen.

#### **Getreideabgang**

- Kenntnis der zu erwartenden relevanten Abgasemissionen bei der Verbrennung mit 100% Getreideabgang
- Kenntnis der bei der Verbrennung anfallenden Aschemengen (für eine allfällige Bestimmung der Aschequalität werden Rückstellproben genommen)
- Hinweise über erhöhte Korrosionsgefahr (im Vergleich mit Hackschnitzeln erhöhte HCl und SO<sub>2</sub>-Werte?)
- Beurteilung der Emissionen und deren Auswirkungen.

#### **Brennstoffmischung Pferdemist/Getreideabgang**

- Kenntnis des Mischverhältnisses „Pferdemist/Getreideabgang/Hackschnitzel“ für einen optimalen Betrieb bezüglich Betriebsverhalten und Emissionen. Ziel: 100% Pferdemist/Getreideabgang, ohne Zumischung von Hackschnitzeln.
- Kenntnis der zu erwartenden relevanten Abgasemissionen bei der Verbrennung mit dem optimalen Mischverhältnis.
- Kenntnis der bei der Verbrennung anfallenden Aschemengen (für eine allfällige Bestimmung der Aschequalität werden Rückstellproben genommen)
- Kenntnis über das Dauerverhalten im Betrieb (5-7 Tage Dauerbetrieb).
- Beurteilung der Emissionen und deren Auswirkungen.

#### **Pilzkompost**

- Kenntnis des Mischverhältnisses „Pilzkompost/Hackschnitzel“ für einen optimalen Betrieb bezüglich Betriebsverhalten und Emissionen.
- Kenntnis der zu erwartenden relevanten Abgasemissionen bei der Verbrennung mit dem optimalen Mischverhältnis.
- Kenntnis der bei der Verbrennung anfallenden Aschemengen (für eine allfällige Bestimmung der Aschequalität werden Rückstellproben genommen)
- Hinweise über erhöhte Korrosionsgefahr (im Vergleich mit Hackschnitzeln erhöhte HCl und SO<sub>2</sub>-Werte).

### 5.2 Programm

Pro Versuchsbrennstoff wurde in ein- bis zweitägigen Vorversuchen das für den Dauerversuch geeignete Mischverhältnis und die optimale Einstellung der Feuerung bestimmt. Für jede Brennstoffmischung wurde eine Emissionsmessung durchgeführt. Dabei wurden folgende Emissionen bestimmt: Bei allen Messungen:

- Abgastemperatur
- Abgasgeschwindigkeit
- Sauerstoff

- Kohlenmonoxid
- Feststoffe (mit Rückstellproben für eventuell spätere Bestimmung des Schwermetallgehaltes)
- Stickoxid

Ergänzende Messungen, je nach Brennstoff:

- SO<sub>x</sub>
- HCl
- Ammoniak und Ammoniumverbindungen
- Gesamtkohlenstoff.

Nach der Emissionsmessung wurde die einzelne Brennstoffmischung (Details dazu siehe in der Beschreibung der Ergebnisse) mehrere Tage im Dauerversuch gefahren. Um mögliche Betriebsstörungen zu reduzieren, wurde das Mischverhältnis auf die sichere Seite angepasst. D.h. es wurde etwas weniger Versuchsbrennstoff beigemischt als während der Emissionsmessung.

Zeitlicher Ablauf:

- |  |               |
|--|---------------|
| – Emissionsmessung mit trockenen Hackschnitzeln (Referenzbrennstoff) | 11.4.2005     |
| – Einregulierung Pferdemist/Holz-Mischung                            | 18./19.4.2005 |
| – Emissionsmessung mit Pferdemist/Holz-Mischung                      | 21.4.2005     |
| – Einregulierung Pferdemist/Getreideabgang-Mischung                  | 17.5.2005     |
| – Emissionsmessung mit Pferdemist/Getreideabgang-Mischung            | 18.5.2005     |
| – Einregulierung Getreideabgang 100%                                 | 18./20.5.2005 |
| – Emissionsmessung mit Getreideabgang 100%                           | 20.5.2005     |
| – Einregulierung Pilzkompost/Holz-Mischung                           | 9.6.2005      |
| – Emissionsmessung mit Pilzkompost/Holz-Mischung                     | 10.6.2005     |

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Der Kommentar dazu findet sich in den nachfolgenden Abschnitten, in welchem die Ergebnisse der Versuche mit den einzelnen Brennstoffen bzw. Brennstoffmischungen dargestellt sind.

## 5.3 Datenaufzeichnung

### Aufzeichnung durch Pyrotronic

In der SPS «Pyrotronic» von Schmid AG werden alle wichtigen Steuer- und Regelparameter gespeichert und können unter Anwendung einer von Schmid AG zur Verfügung gestellten Software grafisch aufgezeichnet und so für die Analyse des Betriebverhaltens eingesetzt werden.

Mit der Arbeitsgemeinschaft Biomasse war vereinbart, dass zusätzlich zu den Messstellen der SPS auch die Wärmezählerdaten erfasst und aufgezeichnet werden. Bei der Durchführung der Verbrennungsversuche war diese Erfassung der Wärmezählerdaten noch nicht realisiert (siehe Kap. 3.3).

Die periodische Auslesung der Daten durch Schmid AG über das Modem war nicht möglich, da dieses noch nicht mit dem Telefonnetz verbunden war (siehe Kap. 4.4). Bei der Auslesung der Versuchdaten vor Ort mit dem PC zeigte sich, dass die Daten wohl aufgezeichnet waren und ausgelesen werden konnten. Die zeitliche Zuordnung (Tage und Stunden) war aber falsch. Als Grund für diesen Fehler wurde zuerst ein Manipulationsfehler während der Versuchsdurchführung vermutet. Als dieser Fehler auch bei der zweiten Auslesung auftrat, zeigte die vertiefte Analyse, dass der Grund in einem Softwarefehler lag.

Trotz mehrmaligen Versuchen war es nicht möglich, die Daten den Versuchstagen zuzuordnen. Sie standen für die Analyse daher nicht zur Verfügung.

### Aufzeichnung der Emissionsdaten

An den Versuchstagen stand das Emissionsmessgerät von Schmid AG zur Verfügung. Die damit ermittelten Messdaten wurden – zusammen mit den Daten der Pyrotronic-SPS – verwendet, um die Feuerung optimal einzustellen.

Für die Aufzeichnung der wichtigsten Emissionsparameter (Abgastemperatur, CO, CO<sub>2</sub>) über eine längere Versuchszeit sollte das Emissionsmessgerät «MAD» eingesetzt werden, das uns vom Schweizerischen Hafnerverband zur Verfügung gestellt worden war. Nach einer ersten erfolgreichen Testphase führte ein Defekt im PC des Messgerätes aber dazu, dass die Daten wohl gemessen, aber nicht mehr aufgezeichnet werden konnten. Nachdem das Gerät mit einem neuen PC ausgerüstet worden war, konnte es am 10.6.2005 bei der Emissionsmessung mit Pilzkompost-Holz Mischung doch

noch eingesetzt werden. Anhang 1 zeigt das Ergebnis einer Aufzeichnung von 160 Minuten, von 1050 -1220 (vor und während drei Emissionsmessungen). Die Auswertung zeigt, dass die Aussagekraft aus folgenden Gründen gering ist:

- Die Berechnung des Wirkungsgrades wäre nur korrekt für eine reine Holzverbrennung von trockenem Holz. Die Angabe des Wirkungsgrades kann nicht verwendet werden.
- Ein Vergleich mit der Temperaturmessung des Schmid-Emissionsmessgerätes und mit den Temperaturen der SPS zeigt, dass das Gerät eine um ca. 20 K zu hohe Abgastemperatur misst.
- Im Normalbetrieb sind die CO-Emissionen so tief, dass sie in der grafischen Aufzeichnung nicht ersichtlich sind.

Es ist unsicher, ob bei eventuellen späteren Versuchen das Gerät noch eingesetzt werden soll (auch wenn die Temperaturmessung korrekt wäre).

## 6. Versuchsergebnisse

### 6.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel)

#### Brennstoffeigenschaften

Beim Hauptbrennstoff Holz der Anlage Villiger handelt es sich grösstenteils um Restholz aus der Holzverarbeitung (Spanplattenabschnitte) und um Restholz von Baustellen.

Bei einer einmaligen Probenahme wurde ein Schüttgewicht von  $245 \text{ kg/m}^3$  mit einem Wassergehalt von ca. 20% (d.h. bezogen auf TS ca.  $200 - 200 \text{ kg/m}^3$ ) ermittelt.

#### Emissionsmessung

Bei der offiziellen Abnahmemessung wurde das Messprogramm erweitert, damit die Ergebnisse als Referenz für die Beurteilung der Emissionen bei der Verbrennung mit schwieriger Biomasse benutzt werden konnten.

Die Ergebnisse der Emissionsmessung zeigen, dass eine gute Verbrennungsqualität erreicht wird und die entsprechenden Grenzwerte für CO und HC unterschritten werden. Der  $\text{NO}_x$ -Wert ist mit ca.  $430 \text{ mg/Nm}^3$  relativ hoch. Der Grund liegt im relativ hohen Anteil an Spanplatten. Der zulässige Massenstrom ( $2'500 \text{ g/h}$ ) wird mit ca.  $700 \text{ g/h}$  aber deutlich unterschritten.

Dank dem Elektrofilter unterschreitet auch der Staubgehalt (höchster Halbstundenmittelwert:  $41 \pm 4 \text{ mg/Nm}^3$ ) den zulässigen Staubgrenzwert von  $50 \text{ mg/Nm}^3$ . Bei einem maximalen Rohgasgehalt von  $200 \text{ mg/Nm}^3$  garantiert der Lieferant einen Staubgehalt im Reingas von max.  $30 \text{ mg/m}^3$ . Dieser Wert ist überschritten, wobei unsicher ist, ob der Rohgasgehalt die Garantiebedingungen erfüllt.

Die für die Emissionsbeurteilung der schwierigen Biomassen wichtigen zusätzlichen Messgrössen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  und Cl) weisen erwartungsgemäss tiefe Werte auf.

### 6.2 Versuche mit Pferdemit/Holz-Mischung

#### Brennstoffeigenschaften

Bei dem in den Verbrennungsversuchen eingesetzten Pferdemit wurden Hobelspäne als Einstreu verwendet. Pferdemit mit Hobelspänen als Einstreu besteht aus ca. 80 – 90% aus Hobelspänen, ca. 5% Stroh/Heu und ca. 10 – 15% Pferdekot. Die Aussagen über den Wassergehalt schwanken stark. Er hängt wesentlich davon ab, wie oft die Einstreu gewechselt wird. Es gibt Aussagen, dass der Wassergehalt unter 50% sei. Es gibt aber auch Aussagen, dass der Wassergehalt wesentlich über 50% ist.

Bei der Planung der Versuche wurde davon ausgegangen, dass der auf Hobelspänen basierende Pferdemit einen Wassergehalt von weniger als 50% aufweist und dass daher eventuell Versuche mit 100%-Pferdemist (ohne Zumischung von trockenen Hackschnitzeln) gefahren werden könnten. Die vorgängig zu den Versuchen durchgeführten Laboranalysen zeigten aber einen Wassergehalt von 69% auf. Dieser Wert wurde mit den während den Versuchen durchgeführten, überschlägigen Wassergehaltsbestimmungen bestätigt.

Frühere Erfahrungen von Schmid AG mit der wassergekühlten Rostfeuerung hatten gezeigt, dass der maximale Wassergehalt bei diesem Feuerungssystem nicht über 50% liegen sollte. Damit war klar, dass Versuche mit 100% Pferdemit mit diesem Feuerungssystem nicht möglich sind.

Der Heizwert des Pferdemistes entspricht – auf die Trockensubstanz bezogen – dem Heizwert von Nadelholz, ca. 19 MJ/kgTS.

Das Schüttgewicht des angelieferten Pferdemistes lag im Bereich von 250 – 350 kgm<sup>3</sup><sub>feucht</sub> (bezogen auf TS: ca. 100 – 130 kg/m<sup>3</sup>)

Die folgenden %-Angaben beziehen sich auf den wasserfreien Pferdemist:

- Der Aschegehalt ist mit 8.3% wesentlich höher als für Holz.
- Der Schwefelgehalt ist mit 0.09% (Holz ca. 0.01%) etwa doppelt so hoch wie bei Rinde
- Der Stickstoffgehalt liegt mit 0.48% im Bereich des Stickstoffgehaltes von Stroh.

Aufgrund der Brennstoffanalyse ist zu erwarten, dass bei der Verbrennung von Pferdemist die SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub> Emissionen höher sind als bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz.

Die im Labor ermittelten tiefen Werte für Ascheerweichung und Aschefliesspunkt zeigen, dass auf einer normalen Rostfeuerung (ohne Rostkühlung) massive Schlackenprobleme zu erwarten wären. Dies wurde bei der visuellen Beurteilung der Schlacke bei den Einregulierungsversuchen vom 18./19.4.04 bestätigt: Trotz Rost- und Seitenwandkühlung bildeten sich Schlackenklumpen, die aber nicht geschmolzen waren und von der Entschungsanlage problemlos ausgetragen werden können.

### Mischung und Mischverhältnis

Die Einregulierungsversuche zeigten, dass eine gute Vermischung der beiden Brennstoffe erreicht werden konnte. Ein emissionsarmer Dauerbetrieb ist möglich, wenn soviel Holzbrennstoff zugemischt wird, dass der Wassergehalt nicht über 50% liegt. Dies führte zu einem Mischverhältnis (bezogen auf die Trockensubstanz und auf den Energieinput) von ca. 33% Holz und 67% Pferdemist. Mit diesem Mischverhältnis wurde die Emissionsmessung durchgeführt. Für den anschliessenden Dauerbetrieb wurde etwas weniger Pferdemist beigemischt.

### Emissionsmessung

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit der Pferdemist/Holz-Mischung eine ebenso gute Verbrennungsqualität erreicht wird wie mit Holz allein und dass die entsprechenden Grenzwerte von CO und HC unterschritten werden. Trotz dem relativ hohen Stickstoffgehalt des Pferdemistes ist der NO<sub>x</sub>-Wert im Bereich von 200 mg/Nm<sup>3</sup> wesentlich tiefer als der NO<sub>x</sub>-Wert des Referenzbrennstoffes. Der Grund kann sein, dass im Holzbrennstoff der Spanplattenanteil bei der Messung mit Pferdemist kleiner war als bei der Referenzmessung. Ob der Ammoniakgehalt des Pferdemistes eine NO<sub>x</sub>-reduzierende Wirkung hat, ist offen.

Der NH<sub>3</sub>-Wert im Abgas wird durch die Zumischung von Pferdemist nur unwesentlich erhöht. Ammoniakgeruch im Abgas – wegen Verbrennung von ammoniakhaltigem Mist – sind damit keine zu erwarten und konnte auch nicht festgestellt werden.

Auffallend ist der gegenüber der Referenzmessung stark erhöhte Staubgehalt, der mit ca. 220 – 300 mg/Nm<sup>3</sup> weit über dem zulässigen Grenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup> liegt. Dass der Staubgehalt unzulässig hoch war, konnte auch visuell beobachtet werden. Trotz praktisch vollständiger Verbrennung zeigte der Ausstoss am Kamin eine deutlich sichtbare weiss-bläuliche Abgasfahne.

Offensichtlich ist der Abscheidegrad des installierten Elektrofilters für den bei der Verbrennung von Pferdemist entstehenden Staub völlig ungenügend. Dies zeigen auch die Versuche mit ausgeschaltetem Elektrofilter bei den späteren Messungen. Die Messungen mit eingeschaltetem Elektrofilter waren nur in wenigen Fällen markant tiefer als mit eingeschaltetem E-Filter. Die visuelle Beurteilung des vom Elektrofilter abgeschiedenen und bei der Staubmessung aufgefangenen Staubes zeigt, dass diese Partikel sehr fein sind. Neben der Partikelgrösse hat aber auch die Zusammensetzung des Staubes (vor allem die Leitfähigkeit) einen Einfluss auf den Abscheidegrad.

Warum der Abscheidegrad des Elektrofilters so tief ist, bleibt im Moment eine offene Frage.

Die Werte für SO<sub>2</sub> und Chlor werden durch die Zumischung von Pferdemist wohl wesentlich erhöht, liegen aber deutlich unter dem Grenzwert von 250 mg/Nm<sup>3</sup>, bzw. 30 mg/Nm<sup>3</sup>.

Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen

| Messgrösse   | Holz (Referenz)<br>11.4.2005 | Anforderungen<br>der LRV<br>(Anh.2, Ziff. 72, | Pferdemist/Holz<br>21.4.2005 | Pferdemist/Getreide<br>18.5.2005 | Getreide 100%<br>20.5.2005  | Getreideabfälle Anlage<br>Düdingen<br>Gewebefilter, | Pilzkompost<br>10.6.2005 |
|--|------------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---|--------------------------|
| Kesselleistung, [kW]<br>(Angabe der Emissionsmessung)                                      | 730-760                      |   | 242-297                      | 550-660                          | 401-536                     | 988-1027  | 458 - 498                |
| Kesselleistung, [kW]<br>(Wärmezähler)  |                              |   | 210-260                      | 400-450                          | 260-300                     |   | 350                      |
| Abweichung Kesselleistung, %<br>(Emissionsmessung-WZ)/WZ                                   |                              |   | 15%                          | 56 %                             | 67%                         |   | 37%                      |
| O <sub>2</sub> [%]   | 10.3-10.9                    |   | 9.5-11.5                     | 9.7-11.6                         | 9.0-11.0                    | 9.0-9.8   | 8.2 - 9.5                |
| Abgastemperatur [°C]   | 144-154                      |   | 130-151                      | 156-184                          | 153-160                     | 117-137   | 165-172                  |
| Staub, E-Filter eingeschaltet<br>[mg Nm <sup>3</sup> ]                                     | 29-42                        | 50  | 167-248                      | 60-318                           | (172) <sup>1)</sup> 231-425 | 0.9-1.6 <sup>2)</sup>                               | 258-265                  |
| Staub, E-Filter ausgeschaltet<br>[mg Nm <sup>3</sup> ]                                     |                              |   |                              | 222-302                          | 227-419                     |   |                          |
| CO [mg Nm <sup>3</sup> ]   | 110-191                      | 250   | 57-114                       | 33-55                            | 20-172                      | 134-224   | 38-123                   |
| SO <sub>2</sub> [mg Nm <sup>3</sup> ]<br>(für Massenstrom > 2'500 g/h)                     | 7-9                          | 250   | 68-181                       | <2                               | 212-251                     |   | 939-999                  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> [mg Nm <sup>3</sup> ]<br>(für Massenstrom > 2'500 g/h) | 422-434                      | 250   | 176-250                      | 229-355                          | 193-280                     | 259-268   | 11-161                   |
| HC als C [mg Nm <sup>3</sup> ]   | 3-6                          | 50  | 12-19                        | <2                               | <2                          | <5  | <2                       |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg Nm <sup>3</sup> ]  | <2                           | 30  | 5-9                          | <1-5                             | <2                          |   | <1                       |
| HCl-Wert trocken [mg Nm <sup>3</sup> ]<br>(für Massenstrom > 300 g/h)                      | <4                           | 30  | 22-33                        | 13-28                            | 8-10                        |   | 53-70                    |

Emissionen bezogen auf 11% O<sub>2</sub>

<sup>1)</sup> E-Filter eingeschaltet, aber Mechanismus zum Abklopfen der Platten ist ausgeschaltet

<sup>2)</sup> Wiederholungsmessung. Bei 1. Abnahmemessung funktionierte das Gewebefilter nicht richtig

Tabelle 2: Ergebnisse der Emissionsmessungen

### **Betriebserfahrungen**

Pferdemist ist wesentlich weniger fließfähig als Hackschnitzel. Dies führte bei der Beschickung der Brennstoffmischung wiederholt zur Brückenbildung im Fallschacht über den Stokerschnecken. Mit dem Einbau von Getrieben, mit welchen die Stokerschnecken mit höherer Drehzahl gefahren werden können, konnte dieses Problem behoben werden.

Da die Abgasrezirkulation einen Kühleffekt zur Folge hat, kann sie bei dem feuchten Brennstoff nicht eingesetzt werden.

Bei der Austragung des Pferdemistes aus dem Silo kam es immer wieder zu Verpressungen. Das führte dazu, dass die Queraustragungsschnecke nicht immer voll belegt und teilweise sogar leer war. Während der Emissionsmessung wurde durch manuelle Eingriffe darauf geachtet, dass die Schnecke immer voll belegt war.

Die Schubbodenaustragung des Hauptsilos (für den Hauptbrennstoff Holzhackschnitzel) arbeitete unbefriedigend. (Siehe Kap. 4.4). Die Schnitzel der hinteren 2/3-Drittel des Schubbodens wurden nicht nach vorne geschoben. Dies führte dazu, dass auch hier die Queraustragungsschnecke nicht immer voll belegt war. Auch hier wurde während der Emissionsmessung mit manuellen Eingriffen dafür gesorgt, dass immer genügend Material ausgetragen wurde und die Schnecke somit immer voll belegt war.

Im Dauerbetrieb führten die Mängel in der Austragung aber zu Betriebsstörungen. Wenn wenig Pferdemist zugeführt wurde, konnte das angestrebte Mischverhältnis zwar nicht erreicht werden. Es ergaben sich dadurch aber keine Betriebsprobleme.

Die Einstellung eines gewünschten Mischverhältnisses ist mit der realisierten Lösung aufwändig und benötigt viel Fingerspitzengefühl. Wenn beide Austragungsschnecken voll belegt waren, konnte aber ein konstantes Mischverhältnis erreicht werden.

## **6.3 Versuch mit der Mischung Pferdemist/Getreideabgang**

### **Brennstoffeigenschaften**

Der Getreideabgang wurde in Form von schwach gepressten Briketts angeliefert. Es handelt sich um Material, welches beim Umlagern in einer Getreidesammelstelle anfällt. Es besteht aus Staub (Abrieb der Getreidekörner) und Bruchstücken von Getreidekörnern. Das Schüttgewicht beträgt ca.  $450 \text{ kg/m}^3$ . Im Labor wurde ein Wassergehalt von 16% bestimmt.

Der Heizwert des Getreideabganges liegt – auf die Trockensubstanz bezogen – mit  $18 \text{ MJ/kgTS}$  leicht unter dem Heizwert von Nadelholz und Pferdemist.

Der Aschegehalt ist mit 17.3% ca. doppelt so hoch wie bei Pferdemist. Der Gehalt an Stickstoff und Schwefel wurde nicht bestimmt. Aus Literaturwerten ist aber bekannt, dass der Schwefelgehalt von Stroh und Gräsern im Bereich von 0.05 – 1.5 % liegt und damit etwa den gleichen Schwefelgehalt aufweist wie der in den Versuchen verwendete Pferdemist. Der Stickstoffgehalt ist mit 1.3% ca. doppelt so hoch wie der Stickstoffgehalt von Pferdemist.

Die im Labor ermittelten Werte für Ascheerweichung und Aschefließpunkt zeigen gegenüber dem Pferdemist um ca. 100 K erhöhte Werte. Da kein Holz – mit höheren Aschschmelzpunkten – eingesetzt wird, ist zu erwarten, dass sich die Schlackenprobleme im Vergleich mit der Verbrennung der Pferdemist-Holz-Mischung etwas verschärfen könnten. Bei den Versuchen konnte aber keine Verschärfung des Schlackenproblems festgestellt.

### **Mischung und Mischverhältnis**

Bei der Anlieferung (25.4.05) der für die weiteren Versuche verwendeten zweiten Lieferung von Pferdemist lag der überschlägig bestimmte Wassergehalt im Bereich von 62 - 65%. Am Tag der Einregulierung (17.5.05) und der Emissionsmessung (18.5.05) lag der Wassergehalt der gezogenen Brennstoffproben zwischen 58 und 62%. Der Grund für die Schwankungen liegt darin, dass bei der Lagerung der Pferdemist an der Oberfläche abtrocknet, der Wassergehalt im Inneren aber nahezu unverändert hoch bleibt.

Die während der Emissionsmessung gezogene Probe der Mischung Pferdemist/Getreideabgang zeigte einen Wassergehalt von 56% und lag damit über dem angestrebten Maximalwert von 50%.

Wegen der grossen Schwankungen des Wassergehaltes des Pferdemistes ist die Bestimmung des Mischverhältnisses mit Hilfe des Wassergehaltes mit einer grossen Ungenauigkeit behaftet. Wenn man die SPS-Einstellwerte für das Zusammenmischen berücksichtigt, ergibt sich ein Mischverhältnis, (bezogen auf die Trockensubstanz und auf den Energieinput) von ca. 20% Getreideabgang und 80% Pferdemist. Mit diesem Mischverhältnis wurde die Emissionsmessung durchgeführt.

Die Einregulierungsversuche zeigten, dass eine gute Vermischung der beiden Brennstoffe erreicht werden konnte.

### **Emissionsmessung**

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit der Pferdemit/Getreideabgang-Mischung eine mindestens so gute Verbrennungsqualität erreicht wurde wie mit dem Referenzbrennstoff Holz und die entsprechenden Grenzwerte von CO und HC unterschritten werden.

Der NH<sub>3</sub>-Wert wie auch der HCl-Wert im Abgas wird durch die Zumischung von Getreide zum Pferdemit nur unwesentlich verändert.

Beim SO<sub>2</sub> liegt offensichtlich eine Fehlmessung vor. Wahrscheinlich war der entsprechende Messschlauch geknickt, so dass der Volumenstrom im Messgerät Null war.

Auch bei dieser Mischung ist der Staubgehalt gegenüber der Referenzmessung mit Holz stark erhöht. Im Vergleich mit der Pferdemit/Holz-Mischung ist die Schwankung bei eingeschaltetem Elektrofilter höher.

Der Staubgehalt im Abgas ist grossen Schwankungen unterworfen. Der Grund ist nicht klar. Ein Grund könnte die Abreinigung des Elektrofilters sein, bei welchem der an den Platten kumulierte Staub abgeklopft und wahrscheinlich teilweise ohne weitere Abreinigung vom gereinigten Abgas mitgerissen wird.

Um den Abscheidegrad des Elektrofilters bestimmen zu können, müsste der Staubgehalt gleichzeitig vor und nach dem Elektrofilter gemessen werden. Dies war bei diesen Verbrennungsversuchen nicht möglich. Um trotzdem die Wirkung des Elektrofilters abschätzen zu können, wurden zusätzliche Staubmessungen mit abgeschaltetem Elektrofilter durchgeführt. Die Ergebnisse in Tabelle 2 zeigen, dass die Staubgehalte mit eingeschaltetem Elektrofilter im Mittel um ca. 100 mg/m<sup>3</sup> tiefer sind als mit ausgeschaltetem Filter. Dies würde einem Abscheidegrad von weniger als 50% entsprechen. In der Literatur wird für Elektrofilter ein Abscheidegrad für Feinstaub von über 90% angegeben.

Obwohl die obigen Abschätzungen mit hohen Unsicherheiten belastet sind, geht daraus doch klar hervor, dass der Abscheidegrad des bei der Anlage Villiger eingesetzten Elektrofilters für den Brennstoff Pferdemit und auch für Getreide markant unter den in der Literatur angegebenen Abscheidegraden liegt und dass trotz Elektrofilter die Emissionsgrenzwerte massiv überschritten werden.

### **Betriebserfahrungen**

Die Probleme mit der Austragung und Beschickung von Pferdemit waren die gleichen wie bei den Versuchen mit der Pferdemit/Holz-Mischung.

Da die Briketts des Getreideabganges ganz vorne im Silo / Schubboden (bei der Tauchwand) eingebracht worden waren, ergaben sich bei der Beschickung mit diesem Brennstoff keine Probleme.

Die Einstellung eines gewünschten Mischverhältnisses war bei diesem Versuch noch schwieriger als beim Versuch mit der Pferdemit/Holz-Mischung, da volumenmässig wesentlich weniger Getreidebriketts zugemischt werden mussten als Hackschnitzel. Eine bessere Anpassung an die stark veränderten Mischverhältnisse hätte mit einer Auswechslung des Antriebsmotors der Austragungsschnecken erreicht werden können.

Der während der Emissionsmessung ermittelte Wassergehalt der Mischung zeigt, dass dieser mit 56% wesentlich über den anvisierten max. 50% lag. Trotzdem konnte eine stabile Verbrennung mit sehr gutem Ausbrand (d.h. tiefen Emissionen) erreicht werden.

Wie bei der Verbrennung der Pferdemit/Holz-Mischung konnten auch beim Einsatz der Pferdemit/Getreide-Mischung keine Schlackenprobleme festgestellt werden.

## **6.4 Versuch mit 100% Getreideabgang**

Beim eingesetzten Getreideabgang handelt es sich um einen Brennstoff, der sehr ähnlich ist zum Brennstoff, der in der Anlage Düdingen verwendet wird. Die Anlage Düdingen ist mit dem gleichen Feuerungssystem ausgerüstet wie die Anlage Villiger. Statt dem Elektrofilter wird dort aber ein Gewebefilter eingesetzt. Es ist zu erwarten, dass Betriebsverhalten und Emissionen bei der Verbrennung von 100% Getreideabgang analog zu den Daten von Düdingen sind, mit einer Ausnahme: Ein Vergleich der Staub Emissionen ermöglicht für diesen Brennstoff einen Vergleich der Wirkung des Elektrofilters und des Gewebefilters.

### **Brennstoffeigenschaften**

Die Brennstoffeigenschaften von Getreideabgang wurden in Kap. 3.7 beschrieben.

### **Emissionsmessung**

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit den in der Anlage Düdingen gemessenen Werten für CO und NO<sub>x</sub> eine gute Übereinstimmung besteht.

Bei den Staubemissionen zeigt sich ein grosser Unterschied. Bei den Versuchen auf der Anlage Villiger ist der Staubgehalt bei 100% Getreideabgang noch höher als bei der Verbrennung der Pferdemit/Getreide-Mischung. Der Staubgehalt des mit Gewebefilter gereinigten Abgases der Anlage Düdingen ist hingegen mit ca. 1 mg/m<sup>3</sup> um Grössenordnungen kleiner als bei dem mit Elektrofilter gereinigten Abgas. Der geforderte Grenzwert wird weit unterschritten.

Der NH<sub>3</sub>-Wert wie auch der HCl-Wert im Abgas wird durch die Zumischung von Getreide zum Pferdemit nur unwesentlich verändert.

Es zeigt sich, dass die Verbrennung von Getreideabgang merklich höhere SO<sub>2</sub> Emissionen verursacht als die Verbrennung von Pferdemit. Die HCl-Werte liegen bei der Pferdemit/Holz-Mischung, der Pferdemit/Getreidemischung und bei der reinen Getreidemischung im gleichen Bereich. Da bei der Anlage Düdingen noch keine erhöhten Korrosionen festgestellt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass bei korrekter Auslegung der Feuerung die Korrosionsprobleme bei der Verbrennung von Pferdemit und Getreideabgang gegenüber der Verbrennung von Restholz aus der Holzverarbeitung nicht wesentlich erhöht werden.

Bei der Verbrennung von 100% Getreide wurde eine Staubmessung durchgeführt, bei der der Elektrofilterwohl eingeschaltet, die Abreinigung aber ausgeschaltet war. Dies sollte eine Grobbeurteilung ermöglichen, ob der Staubgehalt im Reingas durch die Abreinigung erhöht wird. Die Messergebnisse zeigen, dass dies wahrscheinlich der Fall ist. Die Messwerte bei eingeschaltetem Elektrofilter und eingeschalteter Abreinigung sind: 231, 241 und 425 mg/m<sup>3</sup>. Die Messung eingeschaltetem Elektrofilter und ausgeschalteter Abreinigung ergab einen Wert von 172 mg/m<sup>3</sup>. Eine zuverlässige Aussage würde aber eine systematische Untersuchung mit einer höheren Anzahl Messpunkten erfordern.

### **Betriebserfahrungen**

Da es sich beim Getreideabgang um trockenen Brennstoff handelt, wurden die Versuche mit eingeschalteter Abgasrezirkulation betrieben. Es kam zwar zur Bildung von Schlacke. Die Bildung grosser, stark geschmolzener Blöcke konnte aber verhindert werden.

Bei der kurzen Betriebszeit (ca. 3 Tage) mit 100% Getreideabgang ergaben sich erwartungsgemäss keine Betriebsprobleme. Erkundigen beim Betreiber der Anlage Düdingen zeigt dasselbe Bild. Mit dem in beiden Anlagen eingesetzten Feuerungssystem kann eine dauerhaft gute Verbrennungsqualität erreicht werden. Die Betriebsprobleme sind nicht grösser als bei einer Holzschnitzelfeuerung.

## **6.5 Versuch mit Pilzkompost/Holz**

### **Brennstoffeigenschaften**

Gemäss Aussagen des Lieferanten des Pilzkompostes besteht das Ausgangsmaterial (vor der Verwendung für die Pilzkultur) aus

- einer Oberschicht aus Torf und
- einer Unterschicht aus ca. 90% Pferdemit und Zuschlagstoffen wie Gips

Der nach der Pilzernte anfallende Pilzkompost enthält zusätzlich noch Rückstände der Pilze: neben den Resten von Pilzstängeln ist das Material von Pilz-Mycel durchsetzt. Dies lässt erwarten, dass die Verbrennung dieses Materials anspruchsvoller ist als die Verbrennung von Pferdemit.

Schon bei der Anlieferung zeigten sich grosse Unterschiede. Pilzkompost neigt zu starker Klumpenbildung. Für die Entleerung der Big-bags genügte es nicht, die Entleerungsöffnung zu öffnen. Erst wenn der Boden vollständig aufgeschnitten wurde, rutschte der Pilzkompost in grossen Klumpen heraus.

Der in Tabelle 2 aufgeführte Wassergehalt weist mit 45 – 64% einen grossen Streubereich auf.

In einer früheren Untersuchung wurde für den Heizwert von Pilzkompost ein Heizwert von ca. 14 MJ/kgTS ermittelt. Er liegt damit um ca. 20% tiefer als der Heizwert von Holz.

Beim Versuch mit Pilzkompost ging es vor allem darum festzustellen, ob Pilzkompost ein geeigneter Brennstoff für eine Feuerung für schwierige Biomasse sei. Auf eine detaillierte Brennstoffanalyse wurde daher verzichtet.

### **Mischung und Mischverhältnis**

Die Einregulierungsversuche zeigten, dass Pilzkompost viel schwieriger zu verbrennen ist als Pferdemit:

- Die hohe Neigung zur Bildung von Klumpen führte bei der Brennstoffbeschickung im Fallschacht (über den Stokerschnecken) zu Brückenbildungen und in der Folge zu Verpressungen.
- Wegen der Klumpenbildung stellte die Einregulierung auf optimale Verbrennung viel höhere Ansprüche. Mit Mehraufwand konnten aber doch Verbrennungsparameter ermittelt werden, die eine gute Verbrennungsqualität ermöglichten.

Es zeigte sich, dass eine stabile Verbrennung nur mit einem wesentlich höheren Anteil von Holz erreicht werden konnte. Mit diesem höheren Holzanteil aber eine gute Vermischung der beiden Brennstoffe erreicht werden.

Bei der Emissionsmessung vom 10.6.05 wurde ein Mischverhältnis bezüglich Trockensubstanz von ca. 50% : 50% gefahren.

### **Emissionsmessung**

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit der Holz/Pilzkompost-Mischung eine mindestens so gute Verbrennungsqualität erreicht werden kann wie mit dem Referenzbrennstoff Holz und mit der Pferdemit/Holz-Mischung. Die Grenzwerte von CO und HC werden unterschritten. Wie oben erwähnt war es allerdings viel schwieriger, mittels geeigneten Einstellwerten der Feuerung eine stabile Verbrennung zu erreichen.

Erwartungsgemäss ist auch bei diesem Brennstoff die Abscheidewirkung des Elektrofilters ungenügend. Der Staubgehalt liegt im gleichen Bereich wie bei der Verbrennung von Pferdemit und von Getreideabgang.

Auffallend sind die tiefen NO<sub>x</sub> Emissionen. Sie sind tiefer als bei allen anderen Versuchen und auch tiefer als bei der Verbrennung von Holz. Der Grund dafür ist nicht bekannt.

Die SO<sub>2</sub> Emissionen im Bereich von 1'000 mg/m<sup>3</sup> sind überraschend hoch. Der Grund dürfte in einem hohen Schwefelgehalt des Pilzkompostes liegen. Da keine Brennstoffanalyse durchgeführt wurde und auch bei früheren Laboranalysen der Schwefelgehalt nicht bestimmt wurde, können über den Schwefelgehalt keine Angaben gemacht werden. Der Emissionsgrenzwert von 250 mg/m<sup>3</sup> kommt erst bei einem Massenstrom von 2'500 g/h zur Anwendung. Dies würde bei einer Anlage mit einer Leistung im Bereich von 1'000 kW der Fall sein.

Die Emissionen von Chlorwasserstoff (HCl) liegen mit ca. 60 mg/m<sup>3</sup> wesentlich über dem zulässigen Grenzwert.

### **Betriebserfahrungen**

Schon in der Einregulierungs- und Messphase zeigte sich, dass ein störungsarmer Betrieb nur schwer zu erreichen ist. Für den anschliessenden Dauerbetrieb wurde der Anteil Pilzkompost stark reduziert. Trotzdem kam es zu Betriebsstörungen, die nicht akzeptiert werden können. Der Hauptgrund für Betriebsstörungen war die Brückenbildung und Verpressung des Brennstoffes im Fallschacht über den Stokerschnecken.

## **7. Erkenntnisse aus den Versuchen**

### **7.1 Einsatz von Holz allein**

Die Betriebserfahrungen zeigen, dass mit Holz als Brennstoff ein störungs- und emissionsarmer Betrieb möglich ist. Dies allerdings unter der Voraussetzung, dass die Mängel bei der Schubbodenaustragung des Hauptsilos behoben werden.

Die Emissionsmessung zeigt, dass wahrscheinlich auch bei der Verbrennung von Altholz die Grenzwerte der gemessenen Emissionen eingehalten werden können. Offen ist, ob bei dem gemessenen Staubgehalt im Bereich von 40 mg/m<sup>3</sup> der Grenzwert für Blei und Zink eingehalten werden könnte (Pb + Zn < 5 mg/m<sup>3</sup>).

### **7.2 Zumischung von schwierig zu verbrennender Biomasse aus Zusatzsilo**

Wenn dem Hauptbrennstoff – wie bei den durchgeführten Versuchen der Fall war – aus einem separaten Silo ein schwierig zu verbrennender Zusatzbrennstoff zugemischt wird, muss gewährleistet sein, dass

- der Betreiber das Mischverhältnis im Bereich“ keine Zumischung – maximal zulässiges Mischverhältnis“ auf einfache Art einstellen kann

- das Mischverhältnis „Zusatzbrennstoff/Hauptbrennstoff“ bei betrieblichen Schwankungen Störungen nicht grösser werden kann als das eingestellte Mischverhältnis; d.h., der Anteil Zusatzbrennstoff darf nie grösser sein als vorgesehen.
- vor der Beschickung des Mischbrennstoffes auf den Rost eine gute Vermischung der beiden Brennstoffe stattfindet.
- es bei der Austragung aus dem Zusatzbrennstoff zu keinen Verpressungen kommt. Dieses Problem könnte mit dem Einbau einer Dosierwalze gelöst werden.

Von diesen Bedingungen war bei der Durchführung der Versuche einzig die Bedingung „gute Vermischung“ erfüllt. Diese Bedingung wird allein mit der Dosierschnecke erfüllt, welche den Mischbrennstoff vom Mischschacht zum Fallschacht befördert.

Die anderen, oben aufgeführten Bedingungen waren bei der Durchführung der Versuche nicht erfüllt. Es war daher nicht möglich, die Brennstoff-Mischungen über mehrere Tage problemlos zu fahren. Die Gründe waren:

- Bei der realisierten Lösung kann das Mischverhältnis nur durch einen Servicetechniker der Firma verändert werden.
- Da die Drehgeschwindigkeit der Querförderschnecken einen grossen Einfluss auf die Einstellung des Mischverhältnisses hat, müsste diese aufgrund des ermittelten Mischverhältnisses angepasst werden können (entsprechenden Motor einsetzen).
- Wegen der Probleme mit der Schubbodenaustragung war die Querförderschnecke aus dem Hauptsilo oft nur teilweise oder gar nicht belegt. Bei der bei der Anlage Villiger realisierten Lösung müsste sichergestellt sein, dass die Querförderschnecke des Zusatzbrennstoffes nur dann Brennstoff in den Mischschacht bringt, wenn die Querförderschnecke des Hauptsilos soweit bedeckt ist, dass vom Hauptbrennstoff die volle Menge gefördert werden kann.  
Bei einer neuen Anlage könnte das Mischproblem mit Zwischenbehältern gelöst werden.
- Eine Dosierwalze ist nicht vorhanden.

### **7.3 Eignung des Feuerungssystems für die Verbrennung schwieriger Biomasse**

Es hat sich gezeigt, dass die Feuerung der Anlage Villiger geeignet ist für die Verbrennung eines Brennstoffgemisches mit schwierig zu verbrennender Biomasse. Trotz tiefem Ascheschmelzpunkt konnte – wenn Verbrennungsparameter der Feuerung richtig eingestellt waren – keine unzulässige Schlackenbildung und auch keine Anbackungen festgestellt werden. Sogar mit dem schwer zu verbrennenden Pilzkompost konnte – allerdings mit erhöhtem Aufwand zur Ermittlung der geeigneten Verbrennungsparameter – eine konstant gute Verbrennungsqualität erreicht werden.

Um eine optimale Verbrennung mit schwieriger Biomasse zu erreichen, ist ein erhöhter Aufwand für die Ermittlung der optimalen Steuer- und Regelparameter erforderlich. Auch die Ermittlung des optimalen Mischverhältnisses braucht einen erhöhten Aufwand. «Optimal» heisst, dass soviel Zusatzbrennstoff wie möglich zugemischt werden soll; aber nur soviel, dass ein sicherer Dauerbetrieb gewährleistet werden kann. Pro Brennstoffgemisch musste ein Tag für die Einregulierung und Ermittlung der Parameter aufgewendet werden.

Ein gekühlter Rost ist unumgänglich, wenn die in den Versuchen verwendeten Zusatzbrennstoffe eingesetzt werden sollen. In den meisten Versuchen wurde die Aussage von Schmid AG bestätigt, dass der maximale Wassergehalt auf maximal 50% beschränkt werden sollte. Im Versuch mit der Pferdemit/Getreidemischung konnte allerdings auch bei einem Wassergehalt im Bereich von 55% eine gute Verbrennungsqualität erreicht werden. Für einen Dauerbetrieb müsste aber der Anteil Getreideabgang erhöht werden, was auch in diesem Fall einen Wassergehalt des Gemisches von max. 50% ergeben würde.

### **7.4 Eignung des Elektrofilters**

Bei allen Versuchen mit Verwendung von schwieriger Biomasse hat sich gezeigt, dass mit dem bei der Anlage Villiger eingesetzte Elektrofilter der erforderliche Abscheidegrad nicht erreicht wird. Er liegt im Bereich von 50% ist somit viel tiefer, als in der Literatur angegeben wird. Die Gründe dafür sind nicht klar. Aufgrund von Literaturangaben [4] könnten folgende Gründe zur ungenügenden Abscheideleistung führen:

- Der Elektrofilter ist für solchen Feinstaub zu klein dimensioniert, so dass bei der Durchströmung des Filters sich nur ein Teil an den Platten anlagern kann.

- Die Partikel haben eine so tiefe Kondensationstemperatur, dass die Kondensation erst im Filter selber abgeschlossen wird und daher die Ionisation der Partikel ungenügend ist.
- Die Partikel sind so fein und so leicht, dass sie bei der periodischen Abreinigung (bei welcher die abgeklopften Partikel in den Abgasstrom fallen) vom Abgasstrom mitgerissen werden.
- Die statische Aufladung ist zu gering oder die Weglänge für die Ablenkung der Partikel (Plattenlänge) ist zu kurz.

Im Rahmen der auf der Anlage Villiger durchgeführten Versuche war es nicht möglich, den Gründen für die ungenügende Wirkung des Elektrofilters nachzugehen. Dazu wären Parallelmessungen vor und nach dem Elektrofilter nötig, und die nicht abgeschiedenen Partikel müssten im Detail untersucht werden.

Solange der Grund für die ungenügende Abscheidung des Elektrofilters nicht bekannt ist und unklar ist, ob und unter welchen Bedingungen eine genügende Abscheidung erreicht werden könnte, ist eine korrekte Auslegung einer Abgasreinigung für die Verbrennung der untersuchten Brennstoffsart nicht gewährleistet. Bei Verwendung eines Gewebefilters sind die erforderlichen Betriebsbedingungen bei Brennstoffen mit einem hohen Wassergehalt (d.h. hohem Anteil an Wasserdampf im Abgas) nur schwer einzuhalten.

Die Emissionsmessungen der Anlage Düdingen zeigen, dass mit dem dort eingesetzten Gewebefilter eine sehr gute Staubabscheidung erreicht werden kann. Dies mit einem Brennstoff „Getreideabgang“, bei welchem bei den Versuchen auf der Anlage Villiger eine ungenügende Abreinigung gemessen wurde.

## 7.5 Pferdemist als Brennstoff

Die Versuche führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Pferdemist ist ein geeigneter Zusatzbrennstoff zu einer entsprechend ausgerüsteten Hackschnitzelfeuerung.
- Es muss ein Feuerungssystem mit gekühltem Rost eingesetzt werden.
- Da der Wassergehalt bei einem gekühlten Rost beschränkt ist, der Wassergehalt bei Pferdemist aber sehr hoch sein kann, wird eine Verbrennung von Pferdemist (mit Hobelspänen als Einstreu) allein, ohne Zumischung eines trockenen Brennstoffes, kaum möglich sein.
- Zur Reduktion des Feinstaubes im Abgas ist das bei der Anlage Villiger eingesetzte Elektrofilter nicht geeignet. Ob mit einem anders ausgelegten Elektrofilter eine genügende Abscheidung erreicht werden könnte, ist offen. Diese Frage könnte nur mit zusätzlichen Untersuchungen beantwortet werden.
- Ein Vergleich mit den Daten der Anlage Düdingen zeigt, dass mit grosser Wahrscheinlichkeit mit einem Gewebefilter ein genügend hoher Abscheidegrad erreicht werden könnte.
- Eine Dosierwalze ist bei der Siloaustragung erforderlich.

## 7.6 Getreideabgang als Brennstoff

Die Versuche führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Der bei den Getreidesammelstellen und Getreidelagern anfallende Reinigungsabgang ist ein geeigneter Brennstoff für eine entsprechend ausgerüstete Rostfeuerung.
- Es muss ein Feuerungssystem mit gekühltem Rost eingesetzt werden.
- Getreideabgang kann allein oder als Zusatzbrennstoff eingesetzt werden. Es ist vor allem ein geeigneter Zusatzbrennstoff für Brennstoffe wie z.B. Pferdemist, welchen wegen zu hohem Wassergehalt ein trockener Zusatzbrennstoff beigemischt werden muss.
- Zur Reduktion des Feinstaubes im Abgas ist das bei der Anlage Villiger eingesetzte Elektrofilter nicht geeignet. Ob mit einem anders ausgelegten Elektrofilter ein genügender Abscheidegrad erreicht werden könnte, ist offen. Diese Frage könnte nur mit zusätzlichen Untersuchungen beantwortet werden.
- Ein Vergleich mit den Daten der Anlage Düdingen zeigt, dass mit einem Gewebefilter ein genügend hoher Abscheidegrad erreicht wird. Dabei ist aber zu beachten, dass hier nur trockener Brennstoff eingesetzt wird.

## 7.7 Pilzkompost als Brennstoff

Die Versuche führen zu folgenden Erkenntnissen:

- Pilzkompost ist in einer für Hackschnitzel ausgelegten Anlage ein schwierig zu fördernder und zu verbrennender Brennstoff. Mit geeigneter Einstellung der Steuer- und Regelparameter kann wohl eine gute Verbrennungsqualität erreicht werden. Die Gefahr von Betriebsstörungen wegen Brücken- und Klumpenbildung ist aber hoch.
- Die SO<sub>2</sub> und HCl Emissionen sind sehr hoch und liegen wesentlich über den in der LRV festgelegten Grenzwerten. Da der zulässige Massenstrom für HCl schon bei einer Leistung unter 500 kW überschritten wird, wären Massnahmen zur Abscheidung von HCl unumgänglich. Aufgrund der hohen SO<sub>2</sub> Emissionen ist zu erwarten, dass die für eine Betriebsbewilligung zuständige Behörde auch Massnahmen zur Reduktion von SO<sub>2</sub> verlangen würde.
- Eine ausreichende SO<sub>2</sub>- und HCl-Abscheidung könnte eventuell mit einem Gewebefilter erreicht werden, welchem Zuschlagsstoffe zur Absorption beigemischt werden. Ob und wie die Einsatzbedingungen für ein Gewebefilter erfüllt werden können, ist aber offen.
- Pilzkompost ist als Zusatzbrennstoff für eine Hackschnitzelfeuerung ungeeignet, auch wenn diese mit einer zusätzlichen Abgasreinigung mit Gewebe- oder Elektrofilter ausgerüstet ist.

## 8. Schlussfolgerungen

Die im Frühjahr auf der Anlage Villiger durchgeführten Versuchen zur Verbrennung schwieriger Biomasse brachten wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen. So konnte gezeigt werden:

- Pferdemist (mit Hobelspänen als Einstreu) ist ein geeigneter Zusatzbrennstoff für Rostfeuerungen mit gekühltem Rost, wenn der zweite zu verwendende Brennstoff einen Wassergehalt wesentlich unter 50% aufweist.
- Getreideabgang von Getreidesammelstellen ist ein geeigneter Brennstoff für eine Rostfeuerung mit gekühltem Rost. Dieser Brennstoff eignet sich sowohl als Alleinbrennstoff, als auch als Zusatz zu einem Brennstoff mit hohem Wassergehalt und tiefem Ascheschmelzpunkt, wie das z.B. bei Pferdemist der Fall ist.
- Die Anlage Villiger erfüllt noch nicht alle Forderungen für einen störungsarmen Dauerbetrieb. Dazu sind Ergänzungsmassnahmen notwendig.
- Der eingesetzte Elektrofilter erfüllt die Anforderungen nicht. Ob und allenfalls wie mit einem Elektrofilter die Anforderungen erfüllt werden könnte, ist offen. Dazu sind zusätzliche Untersuchungen notwendig.
- Pilzkompost ein schwieriger Zusatzbrennstoff. Ob mit einem Gewebefilter mit Beimischung von Zuschlagstoffen die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können ist offen. Zudem ist unsicher, ob mit dem hohen Wassergehalt von Pilzkompost die Betriebsbedingungen für ein Gewebefilter eingehalten werden können.
- Die Anlage Villiger eignet sich für die Durchführung weiterer Versuche mit schwieriger Biomasse wie Ernterückstände, Landschaftspflegematerial, weitere Arten von Getreideabfall (z.B. mykotoxinbelastetes Getreide, bei der Ernte anfallende Rückstände), Pferdemist auf Strohbasis etc. Bei diesen Versuchen könnte auch die Problematik des Elektrofilters vertieft untersucht werden.  
Ohne einige kleinere Nachrüstungen wird aber ein störungsarmer, unbeaufsichtigter Dauerbetrieb nur beschränkt möglich sein.

## 9. Ausblick

Es ist vorgesehen, im Winter/Frühjahr 2006 weitere Verbrennungsversuche mit schwieriger Biomasse durchzuführen. Vorher muss sichergestellt sein, dass die in diesem Bericht beschriebenen Mängel an der Anlage behoben werden.

Als Brennstoffe der Versuchsserie 2006 sind bisher vorgesehen:

### – **Pferdemist auf Strohbasis**

Viele Besitzer von Pensionärpferden fordern, dass für ihr Pferd weiterhin Stroh als Einstreu verwendet wird. Daher wird auch in Zukunft ein grosser Teil der Reitzentren Stroh als Einstreu verwenden wollen. Die Verwertung in der Landwirtschaft stösst aber auch bei diesem Pferdemist an Grenzen. Das Potential dieses Pferdemistsortimentes ist mindestens so gross wie von Pferdemist auf Holzspänebasis, d.h. mindestens 250'000 MWh/a.

– **Getreideabgang bei der Ernte**

Dieser Getreideabgang fällt während der Erntezeit bei den Getreidesammelstellen an. Aufgrund der seit Mai 2005 geltenden Verordnung bezüglich Mykotoxinbelastung dürfen diese Rückstände den Bauern nicht mehr zurückgegeben werden. Der bei der Ernte 2005 angefallene Abfall musste zu Preisen bis zu 100 Fr./t entsorgt werden.

Dieser Getreideabgang dürfte ähnliche Verbrennungseigenschaften aufweisen wie der in den Frühjahrsversuchen eingesetzte Reinigungsabgang. Die Zusammensetzung und damit das Ascheschmelzverhalten, aber auch die Emissionen könnten doch deutlich abweichen.

Das Potential dieses Brennstoffsorbitimentes beträgt ca. 20'000 t/a und entspricht damit einer Energiemenge von ca. 80'000 MWh/a.

– **Minderwertiges Getreide**

Dieses Getreide fällt in Form loser Körner an. Auch dieser Brennstoff wird wahrscheinlich ähnliche Verbrennungseigenschaften aufweisen wie der in den Frühjahrsversuchen 2005 eingesetzte Reinigungsabgang. Der Anteil des inneren Teils des Kornes wird aber wesentlich höher sein, was sich auf den Aschegehalt, das Ascheschmelzverhalten und auf die Emissionen auswirken könnte.

Dieses minderwertige Getreide könnte teilweise mykotoxinbelastet, welches nicht mehr dem Tierfutter zugegeben werden darf. Die Menge, welche in Zukunft als Brennstoff zur Verfügung stehen könnte, ist noch sehr unsicher und dürfte im Bereich von 20'000 t/a liegen, was einer Energie von ca. mind. 100'000 kWh/a entsprechen würde.

– **Landschaftspflegematerial aus Naturschutzflächen**

Nach [5] beläuft sich die Fläche von Naturschutzgebieten, die sich ausserhalb der Landwirtschaftszone befinden auf rund 40'000 ha. Dabei steht nicht die ganze Fläche als energetisch nutzbares Potenzial zur Verfügung. Der jährliche Materialanfall wird einerseits durch den Pflegebedarf wie auch durch die Verwendbarkeit (z.B. für Einstreu in der Tierhaltung) beeinflusst. Es kann davon ausgegangen werden, dass die heute kompostierte Menge sowie ein Teil der Einstreu für die thermische Nutzung verfügbar wäre. Geht man davon aus, dass dies rund 20% der Gesamtmasse entspricht, sind dies rund 20'000 t TS/a oder rund 80'000 kWh/a. Für eine allfällige Versuchsfortsetzung könnte schilfartiges Material aus dem Maschwanderried als Referenzbrennstoff dienen.

– **Naturbelassene Abfallsortimente aus der Nahrungs- und Genussmittelindustrie**

Als mögliche Sortimente stehen z.B. Kaffeeröstabfälle, Tabakrippen, Nussschalen, Kerne, Trester etc. zur Verfügung.

– **Feststoffe aus der Separierung von Gärsubstraten von Biogasanlagen**

Gärsubstrat, welches aus der Vergärung von Speise- oder Nahrungsmittelabfällen entsteht, kann entweder kompostiert oder ebenfalls als Brennstoff eingesetzt werden. Diese nicht landwirtschaftlichen Feststoffe sind mit separierten Mist vergleichbar. Bei der derzeit ersten Versuchsanlage, die auch vom Bundesamt für Energie unterstützt wird, fallen bis 1'000 t TS Feststoffe pro Jahr an. Deren Verwertung via Verbrennung ergäbe rund 4'000 kWh/a Wärme. Die interessante Fragestellung bei diesem Brennstoff liegt bei der Verwertung der Asche und der Möglichkeit, Schwermetalle aus dem Umweltkreislauf auszuschleiden.

Im Rahmen dieser Versuchsserie ist vorgesehen, das Problem «schlechter Abscheidegrad des Elektrofilters» zu untersuchen. Dazu sind u.a. Parallelmessungen des Staubgehaltes vor und nach dem Elektrofilter vorgesehen.

## 10. Literatur

- [1] Hersener, J.L. et al.: Schlussbericht Projekt „Energiegras/Feldholz, FAT Tänikon, 1997
- [2] Hersener, J.L.; Bühler, R.: *Energetische Nutzung von Hofdünger*. Energetische Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Band 2, Bundesamt für Energie, Bern 1998
- [3] Delcarte, J.; Hersener, J.L.; Bühler, R.; Jenni, A.; Terry, S.; Delcarte, E.; Schenkel, Y.: *Cooled Grate Enhances the Co-Combustion Efficiency of a Kitchen Wood Waste / Manure Mixture in Grate Furnace*. Proceedings of Twelfth European Biomass Conference, 2002 ETA-Florence and WIP Munich, 2002
- [4] von Turegg, R.: *Richtige und effiziente Staubabscheidung – Technologien und Potentiale*. Thermische Biomassenutzung \_ Technik und Realisierung. VDI Berichte 1319, S. 167-198. VDI Verlag, Düsseldorf 1997, ISBN 3-18-0913 19-3
- [5] Hersener, J.L.; Meier, U.: Energetisch nutzbares Biomassepotential in der Schweiz sowie Stand der Nutzung in ausgewählten EU-Staaten und den USA, Bundesamt für Energie, Bern 1999

# Anhang A Beispiel einer Emissionsmessung mit dem Emissionsmessgerät «MAD»

| Test   |                       | Datum   |           |          | 10.6.2005   |  | Tloft |  |
|--|-----------------------|---------|-----------|----------|-------------|--|-------|--|
| Messungen  |                       |         |           |          |             |  |       |  |
| Ziel Intervall                                     |                       | 60 sek. |           |          |             |  |       | Bei dir immer 60 sek                   |
| Total Holzmenge                                    |                       |         |           |          |             |  |       |  |
|  | Mh                    | Holz kg | Anz. Stk. | Druck Pa | Bemerkungen |  |       |  |
| Randdaten von Mad in Rohdatentabelle hier kopieren |                       |         |           |          |             |  |       |  |
| Mittelwerte  |                       |         |           |          |             |  |       |  |
| von  | mh.                   | 10      | 10        | 10       |             |  |       | nur in den gelben Zellen Wert eingeben |
| bis  | mh.                   | 70      | 90        | 120      |             |  |       |  |
| Abgas Temperatur                                   | °C                    | 289     | 298       | 298      |             |  |       |  |
| Kohlenstoff  | Vol%                  | 10.4    | 9.8       | 9.7      |             |  |       |  |
| Kohlenmonoxid                                      | mg/m <sup>3</sup> 13% | 20      | 198       | 249      |             |  |       |  |
| Feuerungstechnischer Wirkungsgrad                  | %                     | 80.8    | 79.7      | 79.0     |             |  |       |  |

  

10.6.2005

— CO2 Vol%

— CO mon (13%) mg/m<sup>3</sup>

  

10.6.2005

— Zug Pa

— Wirkungsgrad %

— TRG 10

## Anhang B Auszug aus den Messprotokollen von T. Wehrli

### B.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel) vom 11.4.05

#### Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1996 (Stand Mai 2001).

Messstelle: Staub:EMPA-Stutzen am Kamin, Rest 8mm-Loch am Rauchrohr

|   |              |                            |          |             |                          |          |
|---|--------------|----------------------------|----------|-------------|--------------------------|----------|
| Abgaskanal:   | rund         | Durchmesser/Selbtlänge [m] | 0.35     | 0.00        | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:   | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte  |          | Baro [mbar] | 953                      |          |
| Messung Nr.   | 1            | 2                          | 3        |             |                          |          |
| Lastangabe [%]  | 70           | 70                         | 70       |             |                          |          |
| Start Messung   | 11:00        | 12:27                      | 13:39    |             |                          |          |
| Ende Messung  | 11:20        | 12:47                      | 13:59    |             |                          |          |
| O <sub>2</sub> [%]  | 10.3         | 10.6                       | 10.9     |             |                          |          |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                                     | 10.3         | 10.0                       | 9.7      |             |                          |          |
| Temp. Rauchgas [°C]   | 154          | 145                        | 144      |             |                          |          |
| Geschw. [m/s]   | 8.2          | 8.1                        | 8.1      |             |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 1555         | 1576                       | 1582     |             |                          |          |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                                       | 850±123      | 837±121                    | 814±117  |             |                          |          |
| Abgasverlust [%]  | 10.5±1.0     | 10.2±1.0                   | 10.4±1.0 |             |                          |          |
| Kesselleistung [kW]   | 760±131      | 752±131                    | 730±126  |             |                          |          |
| <b>Resultate bez. 11% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,</b> |              |                            |          |             |                          |          |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                    | 29           | 40                         | 42       |             |                          |          |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                       | 110          | 175                        | 191      |             |                          |          |
| SO <sub>x</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                          | 9            | 8                          | 7        |             |                          |          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]      | 428          | 422                        | 434      |             |                          |          |
| HC als C (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                 | 3            | 3                          | 6        |             |                          |          |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | < 2          | < 2                        | < 2      |             |                          |          |
| CL'-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                | < 4          | < 4                        | < 4      |             |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 1664         | 1637                       | 1593     |             |                          |          |

## B.2 Emissionsmessung mit Pferdemist-Holz-Mischung vom 21.4.05

### Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1986 (Stand Mai 2001).

Messstelle: Staub:EMPA-Stutzen am Kamin, Rest 8mm-Loch am Rauchrohr

|   |              |                            |          |      |                          |          |
|---|--------------|----------------------------|----------|------|--------------------------|----------|
| Abgaskanal:   | rund         | Durchmesser/Sabellänge [m] | 0.35     | 0.00 | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:   | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte  |          |      | Baro [mbar]              | 945      |
| Messung Nr.   | 1            | 2                          | 3        |      |                          |          |
| Lastangabe [%]  | 70           | 70                         | 70       |      |                          |          |
| Start Messung   | 15:00        | 15:25                      | 16:45    |      |                          |          |
| Ende Messung  | 15:20        | 15:45                      | 17:05    |      |                          |          |
| O <sub>2</sub> [%]  | 11.5         | 11.0                       | 9.5      |      |                          |          |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                                     | 9.1          | 9.6                        | 11.0     |      |                          |          |
| Temp. Rauchgas [°C]   | 148          | 151                        | 130      |      |                          |          |
| Geschw. [m/s]   | 3.9          | 3.5                        | 3.5      |      |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 683          | 604                        | 619      |      |                          |          |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                                       | 305±44       | 284±41                     | 335±48   |      |                          |          |
| Abgasverlust [%]  | 14.8±1.0     | 14.6±1.0                   | 11.2±1.0 |      |                          |          |
| Kesselleistung [kW]   | 260±41       | 242±39                     | 297±50   |      |                          |          |
| <b>Resultate bez. 11% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,</b> |              |                            |          |      |                          |          |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                    | 184          | 167                        | 248      |      |                          |          |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                       | 57           | 114                        | 107      |      |                          |          |
| SO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                          | 80           | 181                        | 68       |      |                          |          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]      | 250          | 247                        | 176      |      |                          |          |
| HC als C (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                 | 19           | 15                         | 12       |      |                          |          |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | 9            | 6                          | 5        |      |                          |          |
| CL-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                 | 26           | 33                         | 22       |      |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 648          | 602                        | 711      |      |                          |          |

### B.3 Emissionsmessung mit Pferdemit/Getreideabgang vom 18.5.05

#### Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1996 (Stand Mai 2001).

Messstelle: Staub:EMPA-Stutzen am Kamin, Rest 8mm-Loch am Rauchrohr

|  |              |                            |       |       |                          |          |
|--|--------------|----------------------------|-------|-------|--------------------------|----------|
| Abgaskanal:  | rund         | Durchmesser/Selenlänge (m) | 0.35  | 0.00  | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:  | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte  |       |       | Baro [mbar]              | 950      |
| Messung Nr.  | 1            | 2                          | 3     | 4     | 5                        |          |
| Lastangabe [%]   | mod.         | mod.                       | mod.  | mod.  | mod.                     |          |
| Start Messung  | 12:18        | 12:39                      | 13:32 | 14:10 | 14:25                    |          |
| Ende Messung   | 12:37        | 13:11                      | 13:57 | 14:20 | 14:35                    |          |
| O <sub>2</sub> [%]   | 11.6         | 10.6                       | 9.9   | 10.1  | 9.7                      |          |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                                    | 9.0          | 10.0                       | 10.7  | 10.5  | 10.9                     |          |
| Temp. Rauchgas [°C]  | 156          | 159                        | 184   | 175   | 171                      |          |
| Geschw. [m/s]  | 7.8          | 7.9                        | 9.0   | 8.0   | 8.0                      |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                   | 1400         | 1375                       | 1480  | 1341  | 1338                     |          |
| <b>Resultate bez. 11% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken</b> |              |                            |       |       |                          |          |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                   | 105          | 60                         | 318   | 222   | 302                      |          |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                      | 55           | 47                         | 33    | 52    | 39                       |          |
| SO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                         | < 2          | < 2                        | < 2   | ----- | -----                    |          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]     | 355          | 317                        | 253   | 238   | 229                      |          |
| HC als C (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                | < 2          | < 2                        | < 2   | ----- | -----                    |          |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]  | 4            | < 1                        | 5     | ----- | -----                    |          |
| CL <sup>-</sup> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]  | 13           | 11                         | 28    | ----- | -----                    |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                   | 1313         | 1432                       | 1645  | 1458  | 1519                     |          |

E-Filter ausgeschaltet

## B.4 Emissionsmessung mit Getreideabgang (100%) vom 20.5.05

### Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1995 (Stand Mai 2001).

Messstelle: Staub:EMPA-Stutzen am Kamin, Rest 8mm-Loch am Rauchrohr

|   |              |                             |         |          |          |                          |          |
|---|--------------|-----------------------------|---------|----------|----------|--------------------------|----------|
| Abgaskanal:   | rund         | Durchmesser/Seitenlänge [m] |         | 0.35     | 0.00     | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:   | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte   |         |          |          | Baro [mbar]              | 953      |
| Messung Nr.   | 1            | 3                           | 5       | 2        | 4        | 6                        | 7        |
| Lastangabe [%]  | mod.         | mod.                        | mod.    | mod.     | mod.     | mod.                     | mod.     |
| Start Messung   | 11:09        | 12:01                       | 13:18   | 11:35    | 12:48    | 14:09                    | 14:30    |
| Ende Messung  | 11:27        | 12:21                       | 13:36   | 11:45    | 12:58    | 14:19                    | 14:45    |
| O <sub>2</sub> [%]  | 10.9         | 10.3                        | 9.0     | 9.5      | 10.3     | 11.0                     | 9.8      |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                                     | 9.7          | 10.3                        | 11.6    | 11.1     | 10.3     | 9.6                      | 10.7     |
| Temp. Rauchgas [°C]   | 160          | 154                         | 159     | 160      | 153      | 153                      | 157      |
| Geschw. [m/s]   | 4.7          | 4.6                         | 5.2     | 4.7      | 4.6      | 5.2                      | 5.2      |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 878          | 880                         | 968     | 868      | 881      | 991                      | 976      |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                                       | 452±65       | 480±69                      | 593±86  | 510±74   | 480±69   | 504±73                   | 557±80   |
| Abgasverlust [%]  | 11.3±1.0     | 10.3±1.0                    | 9.6±1.0 | 10.0±1.0 | 10.2±1.0 | 11.0±1.0                 | 10.1±1.0 |
| Kesselleistung [kW]   | 401±68       | 430±75                      | 536±95  | 459±80   | 431±75   | 449±77                   | 501±88   |
| <b>Resultate bez. 11% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,</b> |              |                             |         |          |          |                          |          |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                    | 231          | 425                         | 241     | 227      | 419      | 356                      | 172      |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                       | 25           | 72                          | 46      | 20       | 38       | 172                      | 46       |
| SO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                          | 221          | 251                         | 212     |          |          |                          |          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]      | 255          | 193                         | 203     | 269      | 277      | 277                      | 280      |
| HC als C (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                 | < 2          | < 2                         | < 2     |          |          |                          |          |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | < 2          | < 2                         | < 2     |          |          |                          |          |
| CL-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                 | 8            | 10                          | 8       |          |          |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 886          | 940                         | 1162    |          |          |                          |          |

ohne EF

mit E-Füller  
"EIN" Abklopfen "EIN"

mit E-Füller  
Abklopfen "Aus"

## B.5 Emissionsmessung mit Pilzkompost/Holz-Mischung vom 10.6.05

### Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1996 (Stand Mai 2001).

Messstelle: Staub:EMPA-Stutzen am Kamin, Rest 8mm-Loch am Rauchrohr

|   |              |                             |          |      |      |                          |          |
|---|--------------|-----------------------------|----------|------|------|--------------------------|----------|
| Abgaskanal:   | rund         | Durchmesser/Seitenlänge [m] |          | 0.35 | 0.00 | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:   | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte   |          |      |      | Baro [mbar]              | 953      |
| Messung Nr.   | 1            | 2                           | 3        |      |      |                          |          |
| Lastangabe [%]  | 50           | 50                          | 50       |      |      |                          |          |
| Start Messung   | 11:33        | 11:59                       | 12:28    |      |      |                          |          |
| Ende Messung  | 11:52        | 12:19                       | 12:48    |      |      |                          |          |
| O <sub>2</sub> [%]  | 8.2          | 9.1                         | 9.5      |      |      |                          |          |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                                     | 12.3         | 11.5                        | 11.1     |      |      |                          |          |
| Temp. Rauchgas [°C]   | 172          | 167                         | 165      |      |      |                          |          |
| Geschw. [m/s]   | 5.6          | 5.6                         | 5.6      |      |      |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 928          | 944                         | 952      |      |      |                          |          |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                                       | 569±82       | 540±78                      | 526±76   |      |      |                          |          |
| Abgasverlust [%]  | 12.5±1.0     | 12.7±1.0                    | 12.9±1.0 |      |      |                          |          |
| Kesselleistung [kW]   | 498±82       | 472±77                      | 458±75   |      |      |                          |          |
| <b>Resultate bez. 11% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,</b> |              |                             |          |      |      |                          |          |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                    | 265          | 259                         | 258      |      |      |                          |          |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                       | 123          | 38                          | 45       |      |      |                          |          |
| SO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                          | 939          | 999                         | 990      |      |      |                          |          |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ]      | 111          | 161                         | 144      |      |      |                          |          |
| HC als C (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                 | < 2          | < 2                         | < 2      |      |      |                          |          |
| NH <sub>3</sub> -Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | < 1          | < 1                         | < 1      |      |      |                          |          |
| CL-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                 | 55           | 53                          | 70       |      |      |                          |          |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]                    | 1187         | 1128                        | 1097     |      |      |                          |          |

**Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · [office@bfe.admin.ch](mailto:office@bfe.admin.ch) · [www.admin.ch/bfe](http://www.admin.ch/bfe)