



# **THERMISCHE NUTZUNG VON ANSPRUCHSVOLLEN BIOMASSEBRENNSTOFFEN**

## **VERSUCHE HERBST 2006**

### **Schlussbericht**

Ausgearbeitet durch

**Ruedi Bühler, Umwelt + Energie**

Bühlstrasse 11, 8933 Maschwanden, rbuehler@mus.ch

**Jean-Louis Hersener, Ingenieurbüro Hersener**

Untere Frohbergstr.1, 8542 Wiesendangen, hersener@agrenum.ch

**Andres Jenni, ardens GmbH**

Munzachstrasse 38, 4410 Liestal, ardens@datacom.ch

**Norbert Klippel, Verenum**

Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich, norbert.klippel@verenum.ch

**Mitarbeit:**

Schmid AG, Eschlikon

Aerob-Beth Filtration GmbH, Lübeck

A. Villiger, Sins

T. Wehrli, Möriken

**Impressum**

Datum: 30. Oktober 2007

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiter: Daniel Binggeli, [daniel.binggeli@bfe.admin.ch](mailto:daniel.binggeli@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 100973

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Zusammenfassung .....   | 4  |
| Abstract.....   | 5  |
| 1. Ausgangslage .....   | 6  |
| 1.1 Anspruchsvolle Biomassebrennstoffe als Zusatzbrennstoff.....                | 6  |
| 1.2 Ergebnisse der Verbrennungsversuche im Frühjahr 2005.....                   | 7  |
| 2. Ziel der Verbrennungsversuche Herbst 2006 .....                              | 7  |
| 3. Versuchsanlage .....   | 8  |
| 3.1 Beschreibung der Anlage .....   | 8  |
| 3.2 Mischung von Hauptbrennstoff und Zusatzbrennstoff.....                      | 9  |
| 4. Brennstoffe der Versuchreihe «Herbst 2006» .....                             | 10 |
| 4.1 Brennstoffe .....   | 10 |
| 4.2 Brennstoffkombinationen.....  | 11 |
| 5. Versuchsprogramm.....  | 11 |
| 5.1 Verbrennungsversuche .....  | 11 |
| 5.2 Untersuchungen Elektrofilter .....  | 12 |
| 5.3 Eignung der Asche als Dünger.....   | 12 |
| 6. Durchführung der Versuche.....   | 12 |
| 6.1 Vorbereitungsarbeiten.....  | 12 |
| 6.2 Zusatzauswertung der Versuche 2005 zum Elektrofilter .....                  | 13 |
| 6.3 Reduktion des Versuchsprogramms.....  | 13 |
| 6.4 Materialbeschaffung und Herstellung der Brennstoffmischungen .....          | 14 |
| 7. Versuchsergebnisse .....   | 15 |
| 7.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel) .....               | 15 |
| 7.2 Versuche mit Mischung aus Riedstreu + Waldhackschnitzel .....               | 17 |
| 7.3 Versuch mit der Mischung Pferdemit + Hackschnitzel + Riedstreu .....        | 18 |
| 7.4 Ergebnisse der Untersuchungen zum Elektrofilter.....                        | 19 |
| 7.5. Untersuchungen der Rostasche .....   | 20 |
| 8. Erkenntnisse aus den Versuchen .....   | 21 |
| 8.1 Eignung des Feuerungssystems für die Verbrennung schwieriger Biomasse ..... | 21 |
| 8.2 Einsatz von loser Riedstreu.....  | 21 |
| 8.3 Zumischung von schwierig zu verbrennender Biomasse aus Zusatzsilo .....     | 22 |
| 9. Schlussfolgerungen .....   | 22 |
| 10. Literatur.....  | 23 |
| Anhänge .....   | 24 |
| Anhang A: Aufzeichnungen SPS-Daten des Holzkessels.....                         | 24 |
| Anhang B: Messprotokolle der Emissionsmessungen von T. Wehrli .....             | 26 |
| Anhang C: Messung des spezifischen Staubwiderstandes .....                      | 29 |

## 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.

Als Weiterführung der im Jahr 2005 auf der Anlage Villiger durchgeführten Verbrennungsversuche (Beschreibung der Anlage und Versuchsergebnisse in [1]), sollen mit weiteren Verbrennungsversuchen das Verbrennungsverhalten weiterer, anspruchsvoller Biomassebrennstoffen untersucht werden.

Aus verschiedenen Gründen konnte nur ein Teil des vorgesehenen Versuchsprogramms durchgeführt werden. Im November und Dezember 2006 wurden Versuche mit den Brennstoffsportimenten «Riedstreu + Hackschnitzel» und «Pferdemist + Hackschnitzel + Riedstreu» durchgeführt.

Die Versuche zeigen, dass unter optimalen Bedingungen die beiden Brennstoffsportimente mit tiefen Emissionen und ohne wesentliche Schlackenbildung energetisch genutzt werden können. Ein optimaler, stabiler Betrieb konnte aber nur schwer erreicht werden. Mit der automatischen Regelung allein konnte kein stabiler Verbrennungszustand gehalten werden. Manuelle Eingriffe (wiederholte Anpassung der Regelparameter) während der Versuche waren unumgänglich. Trotzdem konnte Lochfrass und ungenügende Rostbelegung nicht immer verhindert werden. Zudem musste bei beiden Brennstoffsportimenten während der ganzen Versuchszeit ein Mitarbeiter die Austragung aus dem Silo, die Querverförderung und die Mischung im Mischschacht überwachen und immer wieder händisch eingreifen. Auf den im Versuchsplan vorgesehenen unüberwachten mehrtägigen Dauerbetrieb musste daher verzichtet werden.

Die Folgerungen aus den Verbrennungsversuchen mit schwieriger Biomasse sind:

- Bei einem Dauerbetrieb muss die Regelung der Holzfeuerung in der Lage sein, die auftretenden Schwankungen in den Verbrennungsbedingungen auszugleichen. Dies ist aber nur in einem beschränkten Schwankungsbereich der Verbrennungsbedingungen möglich.

Wenn schwierig zu verbrennende Biomasse als Zusatzbrennstoff zu Holz in einer Holzfeuerung eingesetzt werden soll, so ist ein Dauerbetrieb nur möglich, wenn der Anteil der schwierigen Biomasse nie grösser als 1/4 ist.

- Dabei müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Das Mischen des Zusatzbrennstoffes darf die Stückigkeit der Hackschnitzel nicht reduzieren. Der Holzanteil sollte bei der Beschickung des Rostes noch in grober Form vorhanden sein. Wenn möglich sollten Hackschnitzel mit der Stückgrösse von mindestens P63 eingesetzt werden, die ihre Stückigkeit bis zur Beschickung auf dem Rost beibehalten.

Das Vormischen in der Mischart des Futtermischers ist nicht geeignet. Eine Lösung könnte das abwechselnde Einbringen und gleichmassige Verteilen von groben Hackschnitzeln und Riedstreu (oder anderen halmartigen Brennstoffen) sein.

- Die Transporteinrichtungen müssen für die spezielle Form der Brennstoffe geeignet sein.
  - Die Mischeinrichtung von Zusatzbrennstoff mit dem Hauptbrennstoff muss so ausgelegt und dimensioniert sein, dass eine Brückenbildung vermieden wird. Ein gewünschtes Mischverhältnis kann nicht auf volumetrischer Basis (z.B. mittels Verhältnis von Schneckenlaufzeiten) erreicht werden. Die Brennstoffmenge im geförderten Volumen kann schwanken und daraus können grosse Schwankungen in der Brennstoffzusammensetzung resultieren. Eine Lösungsmöglichkeit wäre, dass die zugeführte Brennstoffmenge gewogen wird und das Mischverhältnis auf Gewichtsbasis eingestellt werden kann.
- Die Versuche haben gezeigt, dass bezüglich des Einsatzes und der Wirksamkeit des Elektrofilters nicht nur beim Verbrennen von schwieriger Biomasse noch viele Fragen offen sind, sondern auch beim Einsatz von Holz als Brennstoff. Um diese Fragen zu klären, sind weitergehende, systematische Untersuchungen erforderlich.

## 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.

As continuation of the test performed in 2005 at the plant of Villiger (Description of the plant in [1]), further test with challenging biomass were planned for 2006. For different reasons, only part of the anticipated test program could be accomplished. In November and December 2006 tests with the fuel mixtures «sedge + chipped wood» and «horse manure + sedge + chipped wood» were conducted.

The tests show that with optimal conditions, these fuel mixtures can be used as biomass fuel, leading to low emissions and neglectable slagging. But stable combustion conditions very difficult to achieve. Automatic control alone was not sufficient for stable combustion conditions. Manual intervention (repeated adjustment of the control parameters) was necessary. Nevertheless, burning of holes in the combustion bed and insufficient cover of the grate could not always be avoided. In addition, manual intervention in the feeding and mixing devices was necessary. Therefore the planned unattended duration test of several days was not possible.

The conclusions of the tests are:

- For continuous operation, the automatic control system of the wood boiler has to balance the fluctuations in combustion conditions. This is only possible in a limited range.  
If one wants to add challenging biomass as described above to woody biomass in a wood boiler, and operate the plant unattended, then maximum  $\frac{1}{4}$  of this material can be added.
- Thereby, the following conditions have to be fulfilled:
  - Mixing of the fuel must not decrease the size of the woodchips. The size of the woodchips preferably should be of P63 and maintain this size up to the grate.  
Mixing with the mixing trolley used in the test is not applicable. Another solution could be to charge the two different fuels in intervals and spread it equally in the silo.
  - The transport systems have to be appropriate to the special shape of the fuel
  - The mixing of the fuel components has to be designed that bridging is avoided. A mixing system, which operates on a volumetric basis, is not applicable. A possible solution could be to define the mixing ration on weight basis.
- As regards the application of an electrical precipitator, the test showed that many questions are still open, also for applications for woody biomass. To answer these questions, further systematic investigations are necessary.

# 1. Ausgangslage

## 1.1 Anspruchsvolle Biomassebrennstoffe als Zusatzbrennstoff

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:

- Halmgutartiges Landschaftspflegematerial aus Naturschutzflächen
- Gräser, Chinaschilf
- 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 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 Hofdünger» [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 Luftreinhaltung 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. Dies 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.

## 1.2 Ergebnisse der Verbrennungsversuche im Frühjahr 2005

In einer ersten Versuchsserie wurden von Mitte April bis Mitte Juni 2005 auf der Anlage Villiger Verbrennungsversuche mit folgenden Brennstoffmischungen untersucht [3]:

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

Die Versuche führten zu folgenden Erkenntnissen:

- Pferdemist (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 Pferdemist der Fall ist.
- 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 erfüllt noch nicht alle Forderungen für einen störungsarmen Dauerbetrieb. Dazu sind Ergänzungsmaßnahmen notwendig.
- Das 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.
- Die Anlage Villiger eignet sich für die Durchführung weiterer Versuche mit schwieriger Biomasse wie Ernterückstände, Landschaftspflegematerial, weitere Arten von Getreideabfall Pferdemist auf Strohbasis etc. Bei diesen Versuchen könnte auch die Problematik des Elektrofilters vertieft untersucht werden.

Im Weiteren haben diese Versuche die folgenden Annahmen bestätigt:

- Im Vergleich zu Holz stellen diese Brennstoffe höhere Anforderungen an eine zuverlässige, emissionsarme Nutzung. Der tiefere Ascheschmelzpunkt erfordert einen gekühlten Rost.
- Den Biomassebrennstoffen mit einem Wassergehalt über 50% kann trockener Brennstoff zugemischt werden, so dass eine einwandfreie Verbrennung auch auf einem gekühlten Rost erreicht werden kann.

Abklärungen mit möglichen Lieferanten von Biomassebrennstoffen haben gezeigt, dass der Bedarf besteht, noch weitere, schwierig zu verbrennende Biomassebrennstoffe energetisch zu nutzen. Die für die Versuchsserie vom Herbst 2006 sinnvollen Brennstoffe und Brennstoffkombinationen wurden in [5] zusammengestellt und beschrieben. Aus der grossen Zahl möglicher Brennstoffe und Brennstoffkombinationen wurden in Absprache mit dem Bundesamt für Energie die Brennstoffsportimente für die Versuche vom Herbst 2006 ausgewählt.

## 2. Ziel der Verbrennungsversuche Herbst 2006

Mit Verbrennungsversuchen auf der Anlage Villiger sollen in einer Serie von weiteren Verbrennungsversuchen die folgenden Brennstoffkombinationen untersucht werden:

- Riedstreu + Waldhackschnitzel
- Gärsubstrat aus nichtlandwirtschaftlichen Biogasanlagen + Ernterückstände Getreide

- schlecht vergärbare Grüngut + Restholz aus der Holzverarbeitung
- Pferdemist + Riedstreu.

Mit pro Brennstoff einwöchigen Versuchen sollen pro Brennstoffsortiment folgende Ziele erreicht werden:

- Kenntnisse bezüglich Emissionen und Dauerverhalten im Betrieb.
- Eruiere optimaler ökonomischer und ökologischer Brennstoffmischungen bezüglich
  - Emissionen
  - Betriebssicherheit und technischer Anforderungen
  - Wirtschaftlichkeit.

Bei den unbelasteten Brennstoffsorimenten

- Riedstreu + Waldhackschnitzel
- Gärsubstrat + Getreide
- Pferdemist + Riedstreu

soll untersucht werden, ob und in welcher Form die Asche in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt werden kann.

Mit Zusatzuntersuchungen und Messungen soll herausgefunden werden, warum in den Versuchen vom Frühjahr 2005 das bei der Villiger-Anlage eingesetzte Elektrofilter die bei der Verbrennung von schwieriger Biomasse entstehenden Partikel viel schlechter abscheidet als die Partikel aus der Holzverbrennung.

## 3. Versuchsanlage

### 3.1 Beschreibung der Anlage

Die Versuchsanlage auf dem Landwirtschaftsbetrieb der Familie Villiger ist in [4] detailliert beschrieben. Die Hauptmerkmale sind:

- 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.
- Hauptbrennstoff sind Hackschnitzel von Baurestholz und Restholz aus der Holzverarbeitung (Spanplattenabschnitte), welche im Hauptsilo gelagert werden.  
Restholz von Baustellen wird mit Inkrafttreten der revidierten Luftreinhalte-Verordnung seit dem 1. Sept. 2007 dem Altholz zugeordnet. In diesem Bericht wird diese Klassifizierung übernommen.

Abbildung 1 zeigt das Brennstofflager der Anlage Villiger. Abbildung 3 zeigt den bei der Anlage Villiger eingesetzten Holzkessel.



*Abbildung 1: Brennstofflager der Anlage Villiger. Links das Silo für den Hauptbrennstoff «. Rechts das Silo für den Zusatzbrennstoff, welcher dem Hauptbrennstoff zugemischt werden kann. Auf dem Bild wird als Zusatzbrennstoff Pferdemist verwendet.*



Abbildung 2: Schmid Rostfeuerung UTSW mit gekühltem Rost und Seitenwänden

### 3.2 Mischung von Hauptbrennstoff und Zusatzbrennstoff

Die Schubböden des Haupt- und des Zusatzsilos schieben den Brennstoff in die zugehörige Queraustragung (siehe Abbildung 3). Die Queraustragungsschnecken fördern den Brennstoff in den gemeinsamen Mischschacht (siehe Abbildung 4). 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 3: 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 4: *Blick von oben in den Mischschacht. Links die Schnecke, gefüllt mit Pferdemist; rechts die Queraustragung des Hauptbrennstoffes Hackschnitzel.*

## 4. Brennstoffe der Versuchreihe «Herbst 2006»

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

### 4.1 Brennstoffe

#### – Pferdemist mit Stroheinstreu

Neben Hobelspänen als Einstreu wird in vielen Reitzentren weiterhin Stroh als Einstreu verwendet. Da in den meisten Regionen der Deutschschweiz in der Landwirtschaft ein Nährstoffüberangebot besteht, stösst dieser Entsorgungsweg auch bei Pferdemist mit Stroheinstreu auf zunehmende Schwierigkeiten.

Stroh als Einstreu könnte im Vergleich mit Hobelspänen als Einstreu die Verschlackungsproblematik verstärken.

#### – Rückstände der Getreideernte

Diese Rückstände bestehen aus Bruchkörnern, Spelzen, Strohteilchen, Unkrautsamen etc. Sie fallen während der Getreideernte bei den Getreidesammelstellen an. Bis Mai 2005 konnten diese Rückstände den Bauern zur Entsorgung zurückgegeben werden. Wegen möglicher Mykotoxinbelastungen dürfen diese Rückstände von den Bauern nicht mehr zurückgenommen werden. Ein möglicher und aus toxikologischer Sicht sicherer Entsorgungsweg wäre die Verbrennung.

Es ist nicht sicher, dass sich diese Rückstände bei der Verbrennung gleich verhalten wie der Reinigungsabgang bei der Getreideumlagerung (Brennstoff bei den Verbrennungsversuchen 2005), da die Zusammensetzung unterschiedlich ist (z.B. höherer Anteil an Spelzen).

#### – Schnitt von Riedflächen

Riedflächen aus Naturschutzgebieten und auch Schilfflächen müssen einmal jährlich geschnitten werden. Damit die Eutrophierung und Verlandung vermieden werden kann, muss dieses Material weggeführt werden. Getrocknet findet dieses Material als Einstreu Verwendung. Vor allem die schlechten Qualitäten (hoher Schilffanteil, feuchte Einschlüsse, Sand und anderes Fremdmaterial

von Überflutungen) können heute kaum noch abgesetzt werden. Die Entsorgung über die Nutzung als Brennstoff bietet eine neue Möglichkeit.

– **Gärsubstrat**

Bei der Vergärung von Speiseabfällen werden nach der Vergärung die Feststoffe mittels Siebpressschnecke oder Dekanter abgetrennt. Dieses Gärsubstrat (ca. 30% TS) kann in der Landwirtschaft als schlecht kalkulierbarer Dünger eingesetzt werden oder muss aufgrund seiner Eigenschaften ggf. anderweitig entsorgt werden und könnte somit als Brennstoff verwendet werden.

– **Feststoffe von Grüngutsammlungen**

Separat gesammeltes Grüngut kann in Vergärungsanlagen energetisch genutzt werden. Die energetische Umsetzung ist aber bei vielen Grüngutsortimenten (z.B. verholzte Grünabfälle, Stroh, Gras, Rasenschnitt) eingeschränkt. Diese Grüngutsortimente könnten auch als Brennstoff – zusammen mit einem trockenen Brennstoff – verwertet und dort zu 100% energetisch genutzt werden. Vorabklärungen haben gezeigt, dass Gemeinden des aargauischen Freiamtes an diesem Entsorgungsweg interessiert sind.

## 4.2 Brennstoffkombinationen

– **Riedstreu + Waldhackschnitzel**

Für die energetische Verwertung von Riedstreu ist dies eine nahe liegende Brennstoffkombination. Wenn die Emissionen dieser Brennstoffkombination mittels Einsatz eines Feinstaubfilters tief gehalten werden können, könnte das Riedgras in entsprechend ausgerüsteten Schnitzelheizungen verwertet werden.

– **Gärsubstrat + Rückstände Getreideernte**

Eine völlig neue Brennstoffkombination. Wenn Holz als Strukturmaterial notwendig ist, so sollten wenn möglich naturbelassene Waldhackschnitzel zugemischt werden. Dies würde eine unbelastete Asche ergeben. Da der Wassergehalt des Substrates aber im Bereich von 70% liegt, müsste das Strukturmaterial evtl. einen tieferen Wassergehalt aufweisen als Waldhackschnitzel.

– **Pferdemist mit Stroheinstreu + Riedstreu**

Eine völlig neue Brennstoffkombination. Wenn Holz als Strukturmaterial notwendig ist, so sollten wenn möglich naturbelassene Waldhackschnitzel zugemischt werden. Dies würde eine unbelastete Asche ergeben.

– **Grüngut + Restholz aus der Holzverarbeitung**

Schlecht vergärbares Grüngut könnte zusammen mit trockenem Restholz aus der Holzverarbeitung (und evtl. auch mit Altholz) in den dafür geeigneten Anlagen verwendet werden. Interesse an diesen Versuchen haben Unternehmen und Gemeinden, welche Grüngut sammeln und auf die energetisch sinnvollste und kostengünstigste Art entsorgen wollen.

## 5. Versuchsprogramm

### 5.1 Verbrennungsversuche

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

- Abgastemperatur
- Abgasgeschwindigkeit
- Sauerstoff
- Kohlenmonoxid
- Feststoffe (mit Rückstellproben für eventuell spätere Bestimmung des Schwermetallgehaltes)
- Stickoxid
- Chlor

Die Versuche vom Frühjahr 2005 haben gezeigt, dass die SO<sub>x</sub>-Emissionen für die Beurteilung der Verbrennungsversuche dieser Biomassebrennstoffe von untergeordneter Bedeutung sind. Auf die entsprechende, ergänzende Messung wurde daher verzichtet.

Neben den Einstellwerten des Holzkessels wird mit der SPS des Holzkessels auch die mit dem Wärmezähler gemessene Leistung erfasst. Die erfassten Daten werden mit einem Laptop ausgelesen und mittels einer EXCEL-Tabelle grafisch dargestellt (siehe Anhang A).

Nach der Emissionsmessung soll die Brennstoffmischung mehrere Tage im Dauerversuch gefahren werden.

## 5.2 Untersuchungen Elektrofilter

In Zusammenarbeit mit Produzenten von Elektrofiltern und dem E-Filter-Experten N. Klippel wird untersucht, was die Gründe für den schlechten Abscheidegrad des Elektrofilters bei den Messungen im Frühjahr 2005 sein könnten. Aufgrund der Ergebnisse dieser Abklärungen wird das Versuchs- und Messprogramm angepasst und erweitert, u.a. durch Parallelmessungen des Partikelgehaltes vor und nach dem Elektrofilter. Es soll gezeigt werden, ob und allenfalls wie der Abscheidegrad des Elektrofilters bei der Verbrennung schwieriger Biomasse verbessert werden kann.

## 5.3 Eignung der Asche als Dünger

Um beurteilen zu können, ob und in welcher Form die Asche in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt werden kann, werden die Aschen von den Brennstoffsportimenten

- Riedstreu + Waldhackschnitzel
- Gärsubstrat + Getreide
- Pferdemist + Riedstreu

nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Anteil der Düngestoffe, vor allem Kalium und Phosphor
- Löslichkeit
- Schwermetallgehalt
- Pflanzenverfügbarkeit (ohne Gefässversuche).

Dazu werden pro Brennstoffsportiment 4 Proben von Rostasche gezogen. Je eine Probe der Zyklonasche und der Elektrofilterasche sollen auf ihren Schwermetallgehalt untersucht werden.

In Kapitel 7 wird gezeigt, dass die Versuche nicht in vollem Umfang so durchgeführt werden konnten wie geplant. Dies beeinflusste die Qualität der Rostasche wesentlich, weshalb es keinen Sinn machte, alle oben aufgeführten Untersuchungen durchzuführen.

# 6. Durchführung der Versuche

## 6.1 Vorbereitungsarbeiten

### Reinigung des Elektrofilters

Vor Beginn der ersten Versuchsserie im Frühjahr 2005 war das Elektrofilter erst wenige Wochen in Betrieb. Abklärungen bei der Detailplanung der zweiten Versuchsserie im Herbst 2006 zeigten, dass das Elektrofilter stark verschmutzt sein könnte. Ein aussagefähiger Vergleich mit den Messungen der ersten Serie könnte dadurch stark beeinträchtigt werden. Im Auftrag und auf Kosten des Projektteams wurde daher das Elektrofilter durch die Herstellerfirma Aerob-Beth gereinigt und auf seine Funktionsfähigkeit überprüft.

Die Inspektion zeigte aussergewöhnlich hohe Staubablagerungen. Am Durchführungsisolator waren Spuren von Überschlügen erkennbar. Die Einspeisung der Hochspannung wurde erneuert. Nach Abschluss der Inspektion wurde das Filter gereinigt und die Staubablagerungen wurden beseitigt.

### Kühler für die Wärmeabfuhr

Wegen einem starken Abnahmerückgang von getrockneten Apfelwürfeln hat A. Villiger im Jahr 2006 die Produktion von Apfelwürfeln eingestellt. Zudem wurde der Trockner für Apfelringe ausgebaut und

an einem neuen Standort wieder aufgebaut. Daher stand für die Durchführung der Versuche kein ausreichender Wärmeabnehmer zur Verfügung. Mit viel Glück konnte ein im Moment nicht benötigter Rückkühler mit einer Wärmeabnahme von ca. 300 kW gefunden und für die Dauer der Versuche gemietet werden. Abbildung 5 zeigt den behelfsmässig installierten Wärmeabnehmer.



*Abbildung 5 Behelfsmässig installierter Rückkühler (im Vordergrund), um die bei den Verbrennungsversuchen produzierte Wärme abzuführen. Im Hintergrund die Rostfeuerung, auf welcher die Versuche durchgeführt wurden*

## 6.2 Zusatzauswertung der Versuche 2005 zum Elektrofilter

Bei der Reinigung des Elektrofilters wurden von den **Staubablagerungen Proben gezogen**. Ebenso waren bei den Versuchen von 2005 (bei der Verbrennung von Pilzkompost) Proben der Elektrofilter-Abscheidungen gezogen worden. Von diesen beiden Proben wurde von der Universität Dortmund der spezifische Staubwiderstand sowie der spezifische Strom in Funktion der Temperatur bestimmt.

Die Messergebnisse bezüglich Staubabscheidung werden im separaten Kapitel 7.4 behandelt.

## 6.3 Reduktion des Versuchsprogramms

### **Grüngut + Restholz aus der Holzverarbeitung**

Die unter 6.1 aufgeführten, im Projektbudget nicht vorgesehenen Vorbereitungsarbeiten führten zu hohen zusätzlichen Kosten. Schon vor Versuchsbeginn war daher klar, dass mit dem vorhandenen Budget nicht alle Versuche durchgeführt werden können. Nach Überprüfung der Prioritäten entschloss sich das Projektteam, auf die Durchführung der Versuche mit Grüngutabfällen zu verzichten.

### **Gärsubstrat + Rückstände Getreideernte**

Im Spätsommer 2006 wurden von einer Getreidesammelstelle die Rückstände aus der Getreideernte übernommen und in Big-bags eingelagert. Es war vorgesehen, das Gärsubstrat von Speiseabfällen von einer Biogasanlage zu beziehen, welche im Herbst 2006 in Betrieb genommen wurde. Im Herbst 2006 stand aber noch nicht genügend Gärsubstrat zur Verfügung. Deshalb waren diese Versuche für April 2007 geplant.

Kurz vor dem Start zu den Verbrennungsversuchen fiel auf der Biogasanlage in Schwellbrunn, welche die entsprechenden Feststoffe liefern sollte, die Fest-Flüssig-Trennung aus. Dies hatte zur Folge, dass die Feststoffe nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung standen. Der Einsatz eines Ersatz-Gärsubstrates musste ausgeschlossen werden, da z.Zt. keine vergleichbare Anlage vorhanden ist. Damit stand dieser vorgesehene Brennstoff für die Versuche im Frühjahr 2007 nicht zur Verfügung. In Absprache mit dem Bundesamt für Energie entschied das Projektteam, die Versuchsserie ohne Versuche mit der Brennstoffmischung Gärsubstrat + Rückstände Getreideernte abzuschliessen.

## 6.4 Materialbeschaffung und Herstellung der Brennstoffmischungen

Das für die Verbrennungsversuche benötigte Material wurde bereits zum jeweiligen Erntezeitpunkt beschafft und in ausreichenden Mengen für die Versuche aufbereitet und eingelagert. Die Riedstreu wurde in Rundballen angeliefert (siehe Abbildung 6). Die Hackschnitzel wurden vom örtlichen Forstbetrieb ab Brennstofflager bezogen. Der auf Stroheinstreu basierende Pferdemist wurde vom Reitstallbetrieb des Nachbardorfes bezogen.



Abbildung 6 Riedstreu, angeliefert als Rundballen

Vorabklärungen haben gezeigt, dass Riedstreu allein auf dem Schubboden nicht gefördert werden kann und daher mit den anderen Brennstoffsportimenten vorgängig zu den Versuchen zusammengesetzt werden muss. Die Mischung erfolgte in einem Futtermischwagen (Abbildung 7). Folgende Mischungen wurden erstellt:

- Riedstreu + Hackschnitzel

Gewichtsmässig ca. 1/3 Riedstreu und 2/3 Hackschnitzel. Es war nicht möglich, mit dem Futtermischwagen einen höheren Anteil an Riedstreu als ca. 1/3 beizumischen. Wassergehalt Riedstreu ca. 15 - 20%, Hackschnitzel ca. 40 - 45%, Mischung ca. 30 - 35%.

Die ungeöffneten Ballen wurden zusammen mit den Hackschnitzeln im Futtermischwagen intensiv gemischt. Dabei wurde nicht nur die Riedstreu zerkleinert, sondern in erheblichem Mass auch die Hackschnitzel. Diese waren in der Brennstoffmischung kaum mehr zu erkennen.

- Pferdemist + Hackschnitzel + Riedstreu

Gewichtsmässig ca. 37% Pferdemist, 26% Hackschnitzel und 37% Riedstreu. Wassergehalt Pferdemist ca. 65 - 70%, Mischung ca. 45 - 50%.



Abbildung 7 Herstellung der Brennstoffmischungen im Futtermischwagen

Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe im Vergleich zu anderen Biomassebrennstoffen.

|              |        | Literatur und Brennstoffe der Versuche 2005 |       |                      |                    | Brennstoffe der Versuche vom Herbst 2006 |                 |                       |         |                           |
|--------------|--------|---|-------|----------------------|--------------------|--|-----------------|-----------------------|---------|---------------------------|
|              |        | Gras  | Stroh | Pferdemist 1998/2005 | Holzschnitzel (HS) | Riedstreu (RS)                           | Pferdemist (PM) | HS+RS Brst. am 28.11. | HS+PM   | HS+RS +PM, Brst. am 5.12. |
| Wassergehalt | Gew.-% | 5-20  | 5-20  | 63-69                | 43 <sup>1)</sup>   | 17                                       | 69              | 34-37                 | 58 - 60 | 47                        |
| Aschegehalt  | Gew.-% | 6-12  | 4-8   | -                    | 0.1-1              | 8.9                                      | -               | 6.0                   | 8.4     | Keine relevanten Daten    |
| N            | Gew.-% | 1.9   | 0.54  | 0.48                 | 1.31/0.08          | 0.649                                    |                 | 0.666                 | 0.586   | 0.630                     |
| C            | Gew.-% | 46  | 46    | 48                   | 51                 | 44.8                                     |                 | 47.0                  | 45.3    | 23.9                      |
| P            | ppm    | -   | 720   | 1900                 | -                  | 370                                      |                 | 390                   | 1260    | 690                       |
| K            | ppm    | 24501                                       | 11900 | 21800                | 1100               | 1480                                     |                 | 1940                  | 18'430  | 3120                      |
| S            | ppm    | 200   | 1400  | 2100/900             | 100                | 811                                      |                 | 717                   | 1'075   | 682                       |
| Cl           | ppm    | 4400  | 3700  | 1'800                |                    | 708                                      |                 | 311                   | 4'278   | 491                       |
| Pb           | ppm    | 0.7   | 0.5   | -                    | 0.97               | -  | -               | -                     | -       | -                         |
| Zn           | ppm    | 38  | 7     | 109                  | 11                 | -  | -               | -                     | -       | -                         |
| Cu           | ppm    | -   | 2.9   | 38                   | -                  | -  |                 | 6.42                  | 6.34    | -                         |
| Cd           | ppm    | 0.1   | 0.09  | <0.1                 | <0.1               | <0.5                                     |                 | <0.5                  | <0.5    | <0.5                      |
|              |        |   |       |                      |                    |  |                 |                       |         |                           |
|              |        |   |       |                      |                    |  |                 |                       |         |                           |
|              |        |   |       |                      |                    |  |                 |                       |         |                           |

Tabelle 1: Zusammensetzung der eingesetzten Brennstoffmischungen und Vergleich mit Literaturwerten und Verbrennungsversuchen vom Frühjahr 2006

Quellen:

- Brennstoffe 2006: Analysen Reckenholz
- Literatur und Brennstoffe der Versuche 2005: [6] Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, China-schilf, Hanf und Stroh; [2] Energetische Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse, Band 2; [4] Schlussbericht der Versuche vom Frühjahr 2005

<sup>1)</sup> Analyseergebnis der bei den Versuchen Herbst 2006 eingesetzten Hackschnitzel

Werte der Versuche von Herbst 2006

## 7. Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

### 7.1 Emissionsmessung mit Referenzbrennstoff (Hackschnitzel)

#### Brennstoffeigenschaften

Beim Hauptbrennstoff Holz der Anlage Villiger handelt es sich grösstenteils um Restholz aus der Holzverarbeitung (Spanplattenabschnitte), Restholz von Baustellen (neu als Altholz klassifiziert) und teilweise auch Altholz (gemäss früherer Klassifizierung).

#### Emissionsmessung

Im Gegensatz zur Messung vom Frühjahr 2005 war die Anlage vorgängig nicht vom Kesselhersteller einreguliert worden. Die Resultate zeigen, dass die Verbrennungsqualität bei dieser Messung wesentlich schlechter war und die LRV Anforderung für CO für das eingesetzte Brennstoffsoriment nicht erfüllt ist.

Dank dem Elektrofilter unterschreitet auch der Staubgehalt den bis zum 1. September 2007 zulässigen Staubgrenzwert von 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Der Abscheidegrad liegt aber mit 56 – 74% weit unter den Erwartungen. Die Messergebnisse bezüglich Staubabscheidung werden im separaten Kapitel 7.4 behandelt.

|                                     |   | Vilig-1<br>11.4.05     | PM <sub>Holz</sub> + Ge-<br>treideabgang<br>18.5.05 | PM <sub>Holz</sub> +<br>Vilig-1<br>21.4.05 | Getreide<br>100%<br>20.5.05     | Pilzkompost +<br>Vilig-1<br>10.6..05 | Vilig-2<br>23.11.06    | HS+RS+<br>Brst. am<br>28.11.06 | PM <sub>Stroh</sub><br>+RS+HS+<br>Vilig-2<br>5.12.06 |
|-------------------------------------|---|------------------------|---|--|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------|--|
| Kesselleistung<br>aus Emissionmess. | kW  | 730-760                | 550-660   | 242-297                                    | 401-536                         | 458-498                              | 317-433                | 386-527                        | 263 <sup>8)</sup> -510                               |
| CO                                  | mg/Nm <sup>3</sup>                        | 110-191                | 33-55   | 57-114                                     | 20-172                          | 939-999                              | 254-1'459              | 13-142                         | 128-2'066 <sup>8)</sup>                              |
| Staub vor E-Filter                  | mg/Nm <sup>3</sup>                        | –                      | 222 -302 <sup>1)</sup>                              | –  | 227-419 <sup>1)</sup>           | –                                    | 74-103                 | 41-55                          | 76-218   |
| Staub nach E-Filter                 | mg/Nm <sup>3</sup>                        | 29-42                  | 60-318  | 167-248                                    | (172) <sup>3)</sup> 231-<br>425 | 258-265                              | 27-40                  | 8-11                           | 32-79  |
| Abscheidung E-<br>Filter            | %   | –                      | 38 <sup>2)</sup>                                    | –  | 10 <sup>2)</sup>                | –                                    | 56-74                  | 78-82                          | 56-78  |
| Elektr. Filterdaten                 | kV / mA<br>26-28 /<br>33-35 <sup>5)</sup> |                        |   |  |                                 |                                      |                        | 25-33/12-18                    | 28-40 /<br>12-23 <sup>6)</sup> 7)                    |
| Spez. Staubwider-<br>stand          | Ohm cm                                    | (2.10E7) <sup>4)</sup> | –   | –  | –                               | 6.10E11                              | (2.10E7) <sup>4)</sup> | 2.10E11                        | 1.10E11  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> | mg/Nm <sup>3</sup>                        | 422-434                | 229-355   | 176-250                                    | 193-280                         | 11-161                               | –                      | 241 - 287                      | 234 - 280  |
| Cl-(HCl)-Wert tr.                   | mg/Nm <sup>3</sup>                        | <4                     | 13-28   | 22-33                                      | 8-10                            | 53-70                                |                        | 7 - 9                          | 7 – 12   |

**Tabelle 2** Messwerte der Verbrennungsversuche vom Herbst 2006 im Vergleich mit den Messungen im Frühjahr 2005

1) gemessen nach dem E-Filter, aber mit ausgeschaltetem E-Filter

2) Quotient gebildet aus Mittelwerten von E-Filter EIN und E-Filter AUS

3) E-Filter eingeschaltet, aber Mechanismus zum Abklopfen der Platten ist ausgeschaltet

4) Staubablagerungen am E-Filter bei der Reinigung vom 6.10.06, E-Filter vorgängig während längerer Betriebszeit ausgeschaltet

5) nach Filterüberprüfung am 6.10.2006 durch Aerob – Beth

6) während der Messungen

7) Wert kurz nach Abschluss der Messungen: 28 kV / 5 mA, mit Zittern der Zeiger

8) Grund für den hohen CO-Wert von 2'066 mg/m<sup>3</sup>: beschleunigtes Abbrennen des Brennstoffes mit nachträglichem Leistungseinbruch und hohen Emissionen, siehe Kap.7.3



Werte der Versuche von Herbst 2006

Erklärung der Abkürzungen: Vilig-1

PM<sub>Holz</sub> + Getreideabgang

PM<sub>Holz</sub> + Vilig-1

Getreide 100%

Pilzkompost + Vilig-1

Vilig-2

HS+RS

PM<sub>Stroh</sub> +RS+HS+ Vilig-2

Brennstoff aus dem Hauptsilo im Frühjahr 2005

Pferdemist mit Holz als Einstreu + Getreideabgang

Pferdemist mit Holz als Einstreu + Brennstoff aus dem Hauptsilo im Frühjahr 2005

100% Getreideabgang

Pilzkompost + Brennstoff aus dem Hauptsilo im Frühjahr 2005

Brennstoff aus dem Hauptsilo im Herbst 2006

Hackschnitzel + Riedstreu + Brennstoff aus dem Hauptsilo im Herbst 2006

Pferdemist mit Stroh als Einstreu + Hackschnitzel + Riedstreu Brennstoff aus dem Hauptsilo im Herbst 2006

## 7.2 Versuche mit Mischung aus Riedstreu + Waldhackschnitzel

### Brennstoffeigenschaften

Aus den Untersuchungen im Rahmen des Projektes Energiegras und auch aus Praxiserfahrungen ist bekannt, dass halmartige Brennstoffe (u.a. Energiegras und Stroh) einen tieferen Ascheschmelzpunkt aufweisen als Holz. Sollen diese Brennstoffe (allein oder als grosser Anteil in einer Mischung mit Hackschnitzeln) eingesetzt werden, muss im Rostbereich eine Kühlung stattfinden. Die bei Villiger eingesetzte Rostfeuerung erfüllt diese Bedingungen.

Bei der Planung der Versuche wurde eine Mischung von 50% Riedstreu und 50% Hackschnitzel (bezogen auf den Energieinput) vorgesehen. Beim Erstellen der Mischung zeigte sich, dass im Mischwagen gewichtsmässig nur ca. 1/3 Riedstreu beigemischt werden konnte.

Die im Futtermischwagen erstellte Mischung von 1/3 Riedstreu und 2/3 Hackschnitzel wurde in das Zusatzsilo eingebracht.

### Förderung und Beschickung

Die Austragung aus Brennstoffmischung aus dem Silo mittels Schubboden ergab Probleme. Um Verpressungen zu vermeiden, musste die Austragung manuell (mit Gabel) unterstützt werden. Die Austragung in die Querförderrinne musste zudem von einem Mitarbeiter überwacht werden.

Ein weiteres Problem ergab sich bei der Förderung mit der Schnecke in der Querförderrinne. Wenn die Förderschnecke vollständig mit Brennstoff bedeckt war, führte dies zu Verpressungen unter der Förderschnecke. Diese wurde dadurch angehoben und verkeilte sich in der Niederhaltung.

Im Mischschacht (Abbildung 4) kam es immer wieder zu Brückenbildungen. Diese konnte nur verhindert werden durch händisches Stochern im Mischschacht.

Fazit: Während der ganzen Versuchszeit musste ein Mitarbeiter die Austragung aus dem Silo, die Querförderung und den Mischschacht überwachen. In kurzen Abständen musste händisch eingegriffen werden. Auf den im Versuchsplan vorgesehenen unüberwachten Dauerbetrieb musste daher verzichtet werden. Die Transporteinrichtung müsste grosszügiger dimensioniert werden.

### Einregulierungen der Feuerung

Mit einer optimalen Einregulierung der Feuerung soll ein stabiler, emissionsarmer Dauerbetrieb erreicht werden. Dies erfordert ein stabiles Brennstoffbett.

Die Versuche zeigten, dass ein stabiler Betrieb nur schwer erreicht werden konnte. Mit der automatischen Regelung allein konnte kein stabiler Verbrennungszustand erreicht werden. Manuelle Eingriffe (wiederholte Anpassung der Regelparameter) während der Versuche waren unumgänglich. Trotzdem konnte Lochfrass und ungenügende Rostbelegung nicht immer verhindert werden.

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten (Anhang A) zeigt, dass während der Messzeit der Sollwert der Leistung konstant auf 30% gehalten wurde. Die mit dem Wärmezähler gemessene Istleistung schwankte aber zwischen 175 kW und 400 kW. Die aus den Abgaswerten berechneten Mittelwerte der Leistung (Anhang B) ergeben für die Leistung einen um ca. 50% höheren Wert. Diese Schwankungen wie auch die Schwankungen der weiteren Messwerte dokumentieren die oben erwähnten Beobachtungen, dass trotz aller Bemühungen kein stabiles Brennstoffbett erreicht werden konnte.

### Emissionsmessung

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit der Mischung «Holz + Riedstreu» in den gemessenen Versuchsphasen trotz der Schwierigkeiten eine gute Verbrennungsqualität erreicht werden konnte.

Völlig entgegen den Erwartungen sind die Staubemissionen viel tiefer als in den Verbrennungsversuchen mit schwieriger Biomasse im Frühjahr 2005. Die Rohgasbelastung (vor dem E-Filter) ist wesentlich tiefer als die Reingasbelastung in den Versuchen vom Frühjahr 2005. Der Grund ist nicht klar. Mögliche Gründe könnten sein:

- Einfluss der anderen Brennstoffzusammensetzung. Der Hauptunterschied gegenüber 2005 ist der Einsatz von Riedstreu.
- die erhöhten Anforderungen, um ein stabiles Brennstoffbett zu erreichen und zu halten führten dazu, dass eine bessere «Low-particle Bedingung» geschaffen wurde.

Die gemessenen Werte für NO<sub>x</sub> und Cf entsprechen den Erwartungen. Das Abscheidverhalten des E-Filters wird in Kapitel 7.4 behandelt.

## **7.3 Versuch mit der Mischung Pferdemist + Hackschnitzel + Riedstreu**

### **Brennstoffeigenschaften**

Bei der Planung der Versuche wurde eine Mischung von 40% Riedstreu, 40% Pferdemist und 20% Hackschnitzeln (bezogen auf den Energieinput) vorgesehen. Beim Mischen mit dem Futtermischwagen ergab sich folgende gewichtsmässige Aufteilung: 37% Riedstreu, 37% Pferdemist und 26% Hackschnitzel. Berücksichtigt man den unterschiedlichen Energieinhalt, entsprach die Mischung ungefähr dem geplanten Verhältnis.

Die im Futtermischwagen erstellte Mischung wurde in das Zusatzsilo eingebracht.

### **Förderung und Beschickung**

Bei der Austragung aus dem Silo ergaben sich dieselben Probleme wie bei der Mischung «Riedstreu + Hackschnitzel». Um Verpressungen zu vermeiden, musste die Austragung manuell (mit Gabel) unterstützt werden. Die Austragung in die Querförderrinne musste von einem Mitarbeiter überwacht werden.

Auch bei der weiteren Förderung und Beschickung traten dieselben Probleme auf wie bei der Mischung «Riedstreu + Hackschnitzel»: Verpressungen unter der Förderschnecke der Queraustragung. Um ein möglichst stabiles Brennstoffbett zu erreichen, mussten Restholz-/Altholz-Hackschnitzel aus dem Hauptsilo zugemischt werden. Trotzdem gab es immer wieder Brückenbildungen im Mischschacht. Auch das Fazit ist dasselbe: Wie bei der Mischung «Holz + Riedstreu» musste während der ganzen Versuchszeit ein Mitarbeiter die Austragung aus dem Silo, die Querförderung und die Mischung im Mischschacht überwachen und immer wieder händisch eingreifen. Auf den im Versuchsplan vorgesehenen unüberwachten Dauerbetrieb musste daher verzichtet werden. Auch hier gilt, dass die Transporteinrichtung grosszügiger dimensioniert werden müsste.

### **Einregulierungen der Feuerung**

Mit einer optimalen Einregulierung der Feuerung soll ein stabiler, emissionsarmer Dauerbetrieb erreicht werden. Dies erfordert ein stabiles Brennstoffbett.

Auch bei dieser Mischung zeigte sich, dass ein stabiler Betrieb nur schwer erreicht werden konnte. Mit der automatischen Regelung allein konnte kein stabiler Verbrennungszustand erreicht werden. Manuelle Eingriffe (wiederholte Anpassung der Regelparameter) während der Versuche waren unumgänglich. Trotzdem konnte Lochfrass und ungenügende Rostbelegung nicht immer verhindert werden. Bei einer der Messphasen gelang es trotzdem nicht, ein einigermaßen stabiles Brennstoffbett zu halten. Dies ist aus den im nächsten Abschnitt diskutierten Messergebnissen ersichtlich.

Die Auswertung der aufgezeichneten Daten (Anhang A) zeigt, dass wie beim Versuch mit Riedstreu und Hackschnitzeln der Sollwert der Leistung während der Messzeit konstant auf 30% gehalten wurde. Bei diesem Versuch war die Messung des Wärmezählers defekt. Ein Vergleich der Abgastemperatur mit den Werten der Messung vom 28.11.07 zeigt, dass die Leistung bei beiden Messungen im gleichen Bereich lag. In der zweiten Messphase (11:42 bis 11:56) sank die Verbrennungstemperatur gegenüber der ersten Messphase um nahezu 200°C gegen 400°C. Dass sich dies negativ auf die Verbrennungsqualität auswirkt, zeigen die gemessenen CO-Werte (siehe nächster Abschnitt). In der dritten Messphase konnte der Zustand der ersten Messphase nahezu wieder erreicht werden.

Die Schwankungen Messwerte dokumentieren die oben erwähnten Beobachtungen, dass trotz aller Bemühungen kein stabiles Brennstoffbett erreicht werden konnte.

### **Emissionsmessung**

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) zeigen, dass mit der Mischung «Holz + Riedstreu + Pferdemist + Villiger-Brennstoff» teilweise eine gute Verbrennungsqualität erreicht werden konnte. Bei einer der drei Messphasen war die Verbrennung allerdings sehr schlecht. Trotz fortwährende Überwachung der Feuerung und Anpassung der Regelparameter ergab sich ein Betriebszustand, in welchem der Brennstoff sehr schnell abbrannte, was in der Folge zu einem Leistungseinbruch, einer schlechten Rostbelegung und zu den hohen CO-Emissionen von 2'066 mg/m<sup>3</sup> führte.

Die Staubemissionen waren auch bei dieser Brennstoffmischung wesentlich tiefer als in den Verbrennungsversuchen mit schwieriger Biomasse im Frühjahr 2005. Die Rohgasbelastung liegt im gleichen Bereich, wie er bei der Verbrennung von naturbelassenen Hackschnitzeln zu erwarten ist.

Die gemessenen Werte für NO<sub>x</sub> und Cl entsprechen den Erwartungen. Das Abscheidverhalten des E-Filters wird in Kapitel 7.4 behandelt.

## **7.4 Ergebnisse der Untersuchungen zum Elektrofilter**

Bei allen Verbrennungsversuchen im Frühjahr 2005 mit 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% und ist somit viel tiefer, als in der Literatur angegeben wird.

Um die Messergebnisse besser beurteilen zu können, wurde bei mehreren Proben von E-Filter Abscheidungen gezogen. Von diesen Proben wurde von der Universität Dortmund der spezifische Staubwiderstand sowie der spezifische Strom in Funktion der Temperatur bestimmt.

Die Messergebnisse (siehe Tabelle 2) wurden vom E-Filter-Experten N. Klippel analysiert. Darauf basierend können folgende vorläufige Aussagen gemacht werden:

- Die Ergebnisse des Versuches vom 28.11.06 zeigen, dass mit diesem Brennstoff ein für ein Klein-Elektrofilter guter Abscheidegrad von ca. 80% erreicht werden kann. Bei einem Staubwiderstand von 2-mal 10E11 Ohm cm ist das Abscheidverhalten noch nicht kritisch (kein oder nur wenig Rücksprühen) und entspricht den Erwartungen.
- Die schlechte Abscheidung am 10.6.2005 ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf Rücksprühen wegen eines - für dieses Filter - zu hohen Staubwiderstands zurückzuführen. Die Grenze für das Einsetzen von Rücksprühen liegt aufgrund der vorliegenden Daten im Bereich zwischen 2- bis 6-mal 10E11 Ohm cm.
- Die schlechte Abscheidung bei dem Versuch vom 5.12.2006 kann aufgrund der vorliegenden Staubwiderstandsmessung nicht mit Rücksprühen erklärt werden. Andererseits hat Pferdemist bekanntermassen einen hohen Anteil an Ammoniak. Aus anderen Prozessen ist bekannt, dass Ammoniumsalze ultrafeine Partikel bilden, die zu einer Unterdrückung des Corona-Stroms durch Raumladungseffekte führen. Es wird daher vermutet, dass die schlechtere Abscheidung beim Brennstoff Pferdemist auf eine Corona-Strom-Unterdrückung (Corona-Quenching) zurückzuführen sein könnte. Die relativ hohen Spannungsablesungen bei kleinen Strömen im Vergleich zu den Werten nach der Filterprüfung am 6.10.2006 könnten ein Hinweis auf Corona-Quenching sein. Für eine sichere Beurteilung braucht es jedoch in jedem Fall ergänzende systematische Aufzeichnungen der elektrischen Kenndaten.
- Aus der Theorie der Elektrofilter ist bekannt, dass Rücksprühen oberhalb eines bestimmten Staubwiderstands einsetzt. Unterhalb dieses Schwellenwerts gibt es einen Bereich über mehrere Größenordnungen von Staubwiderständen, in dem die Abscheidung nicht nachteilig beeinflusst wird. Dies gilt auch für den unteren Wert von 2-mal 10E7 Ohm cm, der bei unvollständiger Verbrennung des von Villiger üblicherweise verwendeten Brennstoffes gemessen wurde. Der relativ geringe Widerstand ist wahrscheinlich auf grosse Mengen an unverbranntem Kohlenstoff zurückzuführen (der Staub war dunkelgrau).
- Grundsätzlich wird bei noch tieferem Staubwiderstand irgendwann ein Wert erreicht, der zu schlechterer Abscheidung führt. Die Ursache für einen solchen – hier noch nicht beobachteten – Rückgang der Effizienz liegt darin, dass gut leitende Partikel ihre Ladung an der Abscheideplatte rasch abgeben und dann keine elektrischen Haltekräfte mehr erfahren. Als Folge davon werden gut leitende Partikel zwar zunächst abgeschieden, danach aber wieder in den Gasstrom eingetragen und gelangen letztlich ins Abgas. Es ist zu erwarten, dass bei sehr schlechtem Ausbrand mit hohem Kohlenstoffanteil die Abscheidung durch diesen Effekt merklich beeinträchtigt werden kann. Aus diesem Grund wird im Grossanlagenbau der zulässige Anteil an unverbranntem Kohlenstoff vom Filterhersteller spezifiziert und vertraglich abgesichert.

Während der Einfluss des überhöhten Staubwiderstands bei einem der Versuche deutlich ist, handelt es sich bei der Interpretation „Corona-Quenching“ um eine Hypothese, die mit den vorliegenden Daten noch nicht belegt ist und erst mit ergänzenden Versuchsreihen überprüft werden kann. Hierzu ist eine systematische Strom- und Spannungsmessung unerlässlich.

## 7.5. Untersuchungen der Rostasche

Die schwierig zu verbrennenden Biomassen aus der Landwirtschaft haben fast durchwegs einen hohen Ascheanteil (siehe Tabelle 3). Da Riedstreu – als Teil von Kuhmist oder Kuhgülle – und Pferdemit als Dünger eingesetzt werden, sollte auch die bei der Verbrennung entstehende Asche als Dünger eingesetzt werden können.

Bei der Planung des Projektes wurde davon ausgegangen, dass die Versuche während mehrerer Tage mit reinen Mischungen von schwieriger Biomasse – ohne Beimischung von Rest- und Altholz aus dem Hauptsilo – gefahren werden können. Leider war ein unbeaufsichtigter Dauerbetrieb nicht möglich. In der Nacht vor dem Versuchstag musste daher immer der von Villiger üblicherweise verwendete Brennstoff aus dem Hauptsilo eingesetzt werden. Bei den Versuchen mit der Pferdemitmischung musste dieser Brennstoffmischung zudem noch Restholz/Altholz aus dem Hauptsilo zugemischt werden.

Wegen der kurzen Versuchszeit war die Rostasche immer mit Asche des Brennstoffes aus dem Hauptsilo vermischt. Da dieser Brennstoff nicht nur Restholz aus der Möbelproduktion, sondern auch belastetes Baurestholz (ab 2008 dem Altholz zugeordnet) und Altholz enthält, ist zu erwarten, dass

- der Anteil an gewünschten Düngestoffen (vor allem Phosphor und Kalium) tiefer und
- der Schwermetallanteil höher

ist als bei ist als bei Aschen von halmartigen Brennstoffen.

Die Ergebnisse der Elementaranalysen der Aschen entsprechen den Erwartungen:

- Der Gehalt an den gewünschten Düngestoffen Phosphor und Kalium ist eine Grössenordnung tiefer als bei halmartigen Brennstoffen und noch wesentlich tiefer als bei naturbelassenem Holz. Im Vergleich zu Altholz ist der Gehalt wesentlich höher.
- Die Schwermetallbelastung mit Blei ist höher als bei halmartigen Brennstoffen. Der Gehalt an Zink ist höher als der Zinkgehalt von halmartigen Brennstoffen und auch von naturbelassenem Holz. Er entspricht dem Zinkgehalt in Altholz asche.

| Gehalt in der Asche | Altholz | Hasler 1996                  |                         |                        | Vock 2003                              |                                 | Versuche Herbst 2006  |  |
|---------------------|---------|------------------------------|-------------------------|------------------------|--|---------------------------------|-----------------------|--|
|                     |         | Gras-artig Hasler Mittelwert | Stroh Hasler Mittelwert | Holz Hasler Mittelwert | Restholz+ Landsch. pflege Vock von bis | Waldhack-schnitzel Vock Von bis | HS+RS Brst. am 28.11. | HS+RS+PM+ Brst.Villiger Brst. am 5.12. |
| P [g/kg TS]         | 0.080   | 30                           | 12                      | 9.4                    | -                                      | -                               | 4.91                  | 3.92                                   |
| K [g/kg TS]         | 0.960   | 166                          | 132                     | 66.1                   | -                                      | -                               | 16.05                 | 18.86                                  |
| Cl [g/kg TS]        | 1.4     | 0.0024                       | 0.0037                  | -                      | -                                      | -                               | 0.311                 | 0.204                                  |
| Pb [g/kg TS]        | 1.9     | 0.002                        | 0.002                   | 0.018                  | 0.0005-0.060                           | 0.0006-0.082                    | 0.008                 | 0.016                                  |
| Zn [g/kg TS]        | 1.7     | 0.079                        | 0.023                   | 0.377                  | 0.011-0.250                            | 0.020-0.681                     | 1.68                  | 1.02                                   |
| Cu [g/kg TS]        | 0.016   | 0.080                        | 0.057                   | 0.208                  | 0.093-0.241                            | 0.014-0.309                     | >0.2                  | 0.103                                  |
| Cd [g/kg TS]        | 0.0022  | 0.0003                       | 0.0005                  | 0.0022                 | 0.0001-0.011                           | 0.00006-0.025                   | <0.005                | <0.005                                 |

Tabelle 3

Elementargehalt in verschiedenen Aschen

Quellen: Brennstoffe 2006: Analysen Reckenholz. Altholz: [7] Mohn, J.: Emissionen und Stoffflüsse von (Rest)-Holzfeuerungen, EMPA Bericht Nr. 880'002/1, Februar 2000. Übrige: [6] Hasler, Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf und Stroh; [8] Vock, W: Entsorgung von Asche aus Grossfeuerungen für naturbelassenes Holz

Werte der Versuche von Herbst 2006

Wie zu erwarten war, ist durch das Vermischen der Rostasche mit dem Hauptbrennstoff von Villiger die Düngerqualität der Asche der Verbrennungsversuche vom Herbst 2006 wesentlich schlechter als von naturbelassenem Holz. In der überarbeiteten Düngerbuch-Verordnung ([9], Seite 313) wurde Holzasche im Teil 5 des Anhanges 1 gestrichen. Holzasche wird nur noch in den Verkehr gebracht werden können, wenn die Schadstoffgrenzwerte eingehalten werden und Holzasche aus bestimmten Verbrennungsanlagen als Dünger bewilligt wird.

Da Holzasche aus naturbelassenem Holz nicht mehr als Dünger zugelassen ist und die Qualität der Rostasche aus den Verbrennungsversuchen schlechter ist als bei naturbelassenem Holz, erübrigen sich die vorgesehenen, weitergehenden Untersuchungen bezüglich Eignung als Dünger.

Ob eine genügende Düngerqualität erreicht werden kann, wenn schwierige Biomasse nur mit naturbelassenem Holz gemischt wird, kann aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht beurteilt werden. Chancen bestehen allerdings nur dann, wenn der Anteil Holz wesentlich kleiner ist als bei den Versuchen vom Herbst 2006. Die Ergebnisse des Verbrennungsverhaltens auf dem Rost zeigen allerdings, dass dies kaum möglich sein wird.

## **8. Erkenntnisse aus den Versuchen**

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

Die Versuche vom Herbst 2006 bestätigen weitgehend die Erkenntnisse aus den Versuchen vom Frühjahr 2005.

Die Feuerung der Anlage Villiger ist geeignet für die Verbrennung eines Brennstoffgemisches mit schwierig zu verbrennender Biomasse. Bei einzelnen Versuchen wurde allerdings trotz Kühlung des Rostes und des Feuerraumes Schlackenbildung festgestellt. Dies war wahrscheinlich dann der Fall, wenn die Regelparameter zeitweise nicht optimal eingestellt waren. Trotz tiefem Ascheschmelzpunkt konnte – wenn Verbrennungsparameter der Feuerung richtig eingestellt waren – zum grössten Teil keine unzulässige Schlackenbildung und auch keine Anbackungen festgestellt 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.

Bei den Versuchen vom Herbst 2006 war der Anteil der schwierigen Biomasse zu hoch. Trotz grossem Aufwand war es nicht möglich, ohne dauernde Überwachung und Anpassung der Regelparameter einen stabilen Dauerbetrieb zu erreichen.

### **8.2 Einsatz von loser Riedstreu**

Die nachfolgenden geschilderten Erkenntnisse beziehen sich auf den Einsatz von loser Riedstreu. Sie gelten wahrscheinlich ohne wesentliche Einschränkungen auch für andere halmartige Brennstoffe.

Riedstreu allein kann auf einem Schubboden nicht gefördert werden. Soll Riedstreu in grösseren Mengen in einer Holzschnitzelfeuerung verbrannt werden, muss bei der Einlagerung in das Brennstoffsilos eine Vermischung stattfinden. Das Mischen darf aber nicht so intensiv sein, wie dies mit dem Futtermischwagen erfolgte, denn durch das intensive Mischen werden die Hackschnitzel so zerkleinert, dass die Struktur verloren geht. Eine genügend grobe Struktur ist erforderlich für die Förderung, die Beschickung und das Verbrennen auf dem Rost. Eine den Anforderungen entsprechende Mischung könnte vielleicht erreicht werden, wenn Hackschnitzel und Riedstreu alternativ ins Silo eingebracht und schichtweise verteilt würden.

### 8.3 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» bis «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 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.
- im Mischbehälter eine Brückenbildung vermieden wird.

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 unüberwacht über mehrere Tage problemlos zu fahren.

## 9. Schlussfolgerungen

Wegen den im Bericht beschriebenen, geänderten Rahmenbedingungen musste das Projektteam Prioritäten setzen und das Versuchsprogramm entsprechend anpassen. Dies hatte unter anderem zur Folge, dass der Brennstoff «Gärssubstrat» im Versuchsprogramm nicht berücksichtigt werden konnte. Dies ist aber weiterhin ein interessanter Brennstoff. Aus logistischen Gründen (Anlieferung, Mischung, Beschickungsmöglichkeiten) wäre jedoch eine andere Versuchsanlage vorzuziehen.

Die Folgerungen aus den Verbrennungsversuchen mit schwieriger Biomasse sind:

- Das Feuerungssystem der Pilotanlage (gekühlter Rost und gekühlte Seitenwände im Rostbereich) hat sich für den Einsatz von schwierig zu verbrennender Biomasse bewährt. Die Förderung und Mischung erfüllte die Anforderungen nicht.
- Bei einem Dauerbetrieb muss die Regelung der Holzfeuerung in der Lage sein, die auftretenden Schwankungen in den Verbrennungsbedingungen auszugleichen. Dies ist aber nur in einem beschränkten Schwankungsbereich der Verbrennungsbedingungen möglich.

Wenn schwierig zu verbrennende Biomasse als Zusatzbrennstoff zu Holz in einer Holzfeuerung eingesetzt werden soll, so ist ein Dauerbetrieb nur möglich, wenn der Anteil der schwierigen Biomasse nie grösser als 1/4 ist. Dies gilt nicht für getrockneten Pilzkompost und trockenen Getreideabgang. Bei diesen Brennstoffen kann der Anteil höher sein.

- Beim Einsatz schwieriger Biomasse müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Das Mischen des Zusatzbrennstoffes darf die Stückigkeit der Hackschnitzel nicht reduzieren. Der Holzanteil sollte bei der Beschickung des Rostes noch in grober Form vorhanden sein. Wenn möglich sollten Hackschnitzel mit der Stückgrösse von mindestens P63 eingesetzt werden, die ihre Stückigkeit bis zur Beschickung auf dem Rost beibehalten.

Das Vormischen in der Mischart des Futtermischers ist nicht geeignet. Eine Lösung könnte das abwechselnde Einbringen und gleichmassige Verteilen von groben Hackschnitzeln und Riedstreu (oder anderen halmartigen Brennstoffen) sein.

- Die Transporteinrichtungen müssen für die spezielle Form der Brennstoffe geeignet sein.
- Die Mischeinrichtung von Zusatzbrennstoff mit dem Hauptbrennstoff muss so ausgelegt und dimensioniert sein, dass eine Brückenbildung vermieden wird. Ein gewünschtes Mischverhältnis kann nicht auf volumetrischer Basis (z.B. mittels Verhältnis von Schneckenlaufzeiten) erreicht werden. Die Brennstoffmenge im geförderten Volumen kann schwanken und daraus können grosse Schwankungen in der Brennstoffzusammensetzung resultieren. Mögliche Lösungen

- könnten sein: volumetrische Bestimmung in einem Behälter oder gewichtsmässige Bestimmung. Vor allem die zweite Variante ist nur mit grossem technischem Aufwand zu realisieren.
- Die Versuche haben gezeigt, dass bezüglich des Einsatzes und der Wirksamkeit des Elektrofilters nicht nur beim Verbrennen von schwieriger Biomasse noch viele Fragen offen sind, sondern auch beim Einsatz von Holz als Brennstoff. Um diese Fragen zu klären, sind weitergehende, systematische Untersuchungen erforderlich.

## 10. Literatur

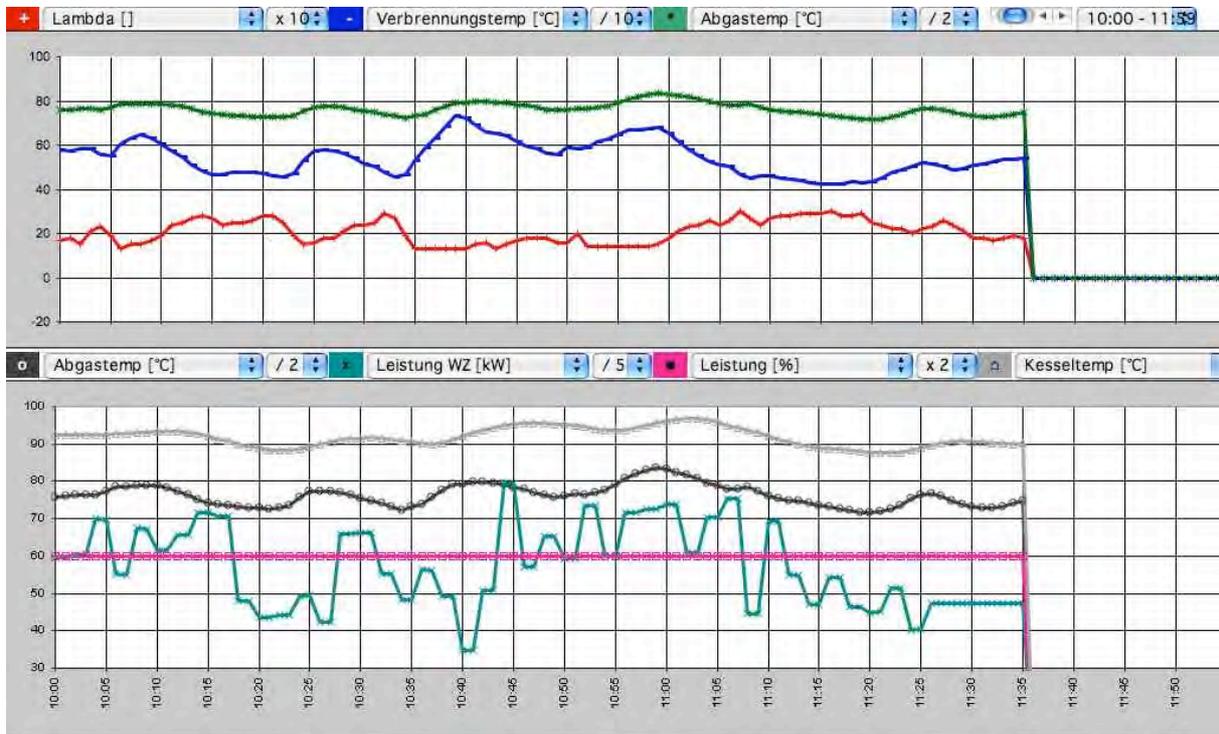
- [1] Hersener, J.L. et al.: Schlussbericht Projekt „Energiegras/Feldholz, FAT Tänikon, 1997
- [2] Hersener, J.L.; Bühler, R.: *Energetische Nutzung von Hofdünger*. Energetische Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Band 2, Bundesamt für Energie, Bern 1998
- [3] Delcarte, J.; Hersener, J.L.; Bühler, 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] Bühler, R.; Hersener J.L.; Jenni, A.: *Thermische Nutzung von anspruchsvollen Biomassebrennstoffen; Verbrennungsversuche Frühjahr 2005*, Bundesamt für Energie, Bern Dezember 2005
- [5] Arbeitsgemeinschaft Biomasse: Versuchsserie zum Emissions- und Betriebsverhalten, Herbst 2006. Interner Bericht z.H. des Bundesamtes für Energie, Februar 2006
- [6] Hasler, Ph.; Nussbaumer, Th.: *Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf und Stroh*; Schlussbericht zum Projekt Energiegras Bern 1996
- [7] Mohn, J.: *Emissionen und Stoffflüsse von (Rest)-Holzfeuerungen*, EMPA Bericht Nr. 880'002/1, Februar 2000
- [8] Vock, W: *Entsorgung von Asche aus Grossfeuerungen für naturbelassenes Holz*, Schlussbericht, BAFU (Vertrag Nr.: WN 05/02, Maschwanden 2003
- [9] Bundesamt für Landwirtschaft: *Ausführungsbestimmungen zur Agrarpolitik 2011: Erstes Verordnungs paket*, Anhörung, Bern, 29. Juni 2007

# Anhänge

## Anhang A: Aufzeichnungen SPS-Daten des Holzkessels

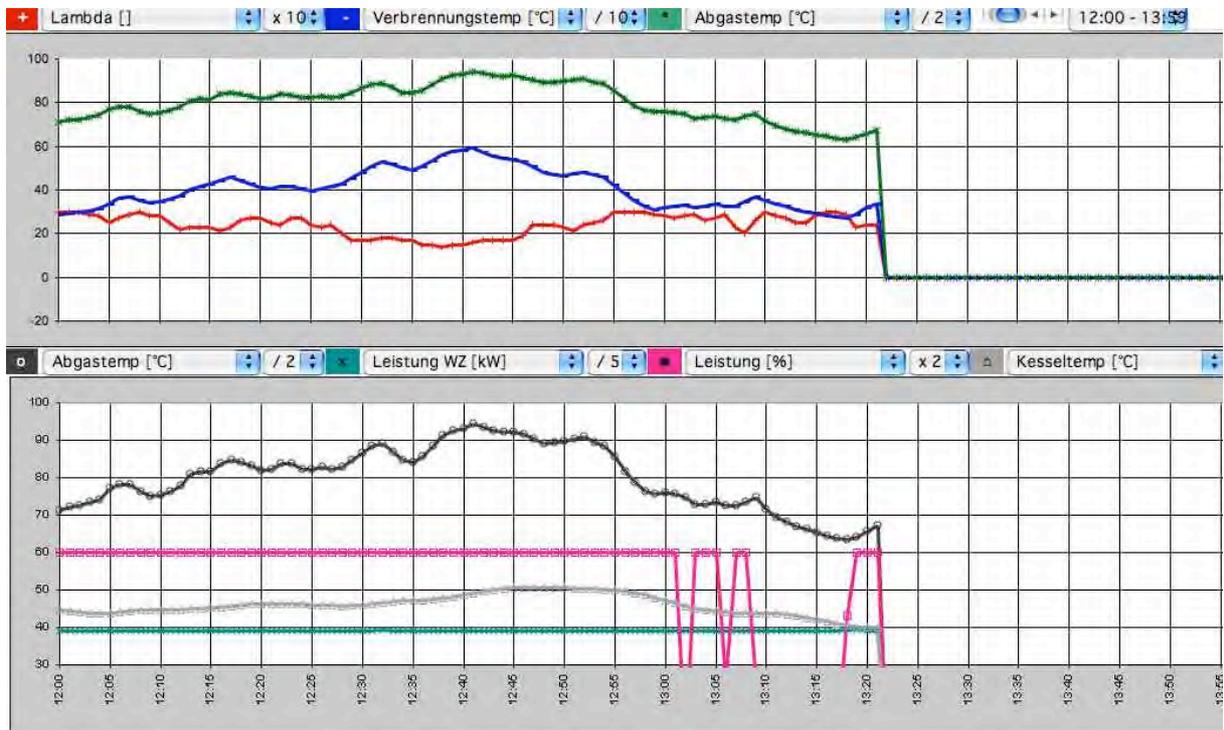
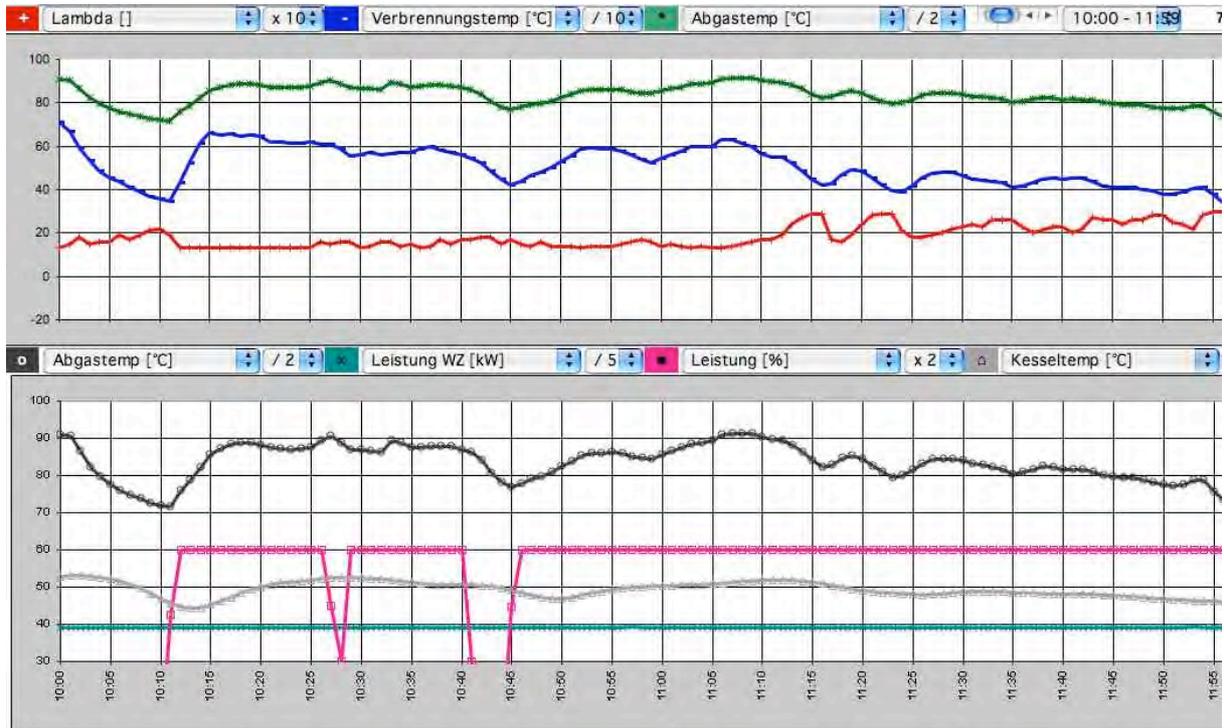
### A.1 Aufzeichnungen vom 28.11.2006

Messphasen der Emissionsmessung: 10:35 – 10:50, 11:11 – 11:26, 11:35 – 12:02



**A.2 Aufzeichnungen vom 5.12. 2006**

Messphasen der Emissionsmessung: 10:58 – 11:13, 11:42 – 11:55, 12:34 – 12:47



Bei diesem Versuch war der Wärmehähler defekt.

# Anhang B: Messprotokolle der Emissionsmessungen von T. Wehrli

## B.1: Messung vom 23.11. 2006, Brennstoff: Holz

Tino Wehrli  
Emissionsmessungen

Holzfeuerung

27.11.06 / HOLZ-E06-A

villiger.sin/3031

### Datenblatt Abgasmessung Kessel 1

|                       |             |                   |               |               |  |
|-----------------------|-------------|-------------------|---------------|---------------|--|
| <b>Anlageadresse:</b> |             | Messdatum         | 23.11.06      | Kanton:       |  |
| Name                  | Villiger    |                   |               |               |  |
| Strasse               | Holderstock | Tel-/Fax-Nummer   | 044 767 15 16 | 044 767 15 54 |  |
| PLZ/Ort               | 5643 Sins   | Sachbearbeiter/in | Herr          | Bühler        |  |

|                      |   |           |                 |             |               |      |
|----------------------|---|-----------|-----------------|-------------|---------------|------|
| <b>Kessel</b>        | Fabrikat                                | Schmid    | Typ             | UTSW 700.32 | Baujahr       | 2004 |
|                      | Fabr.-Nr.                               | 54107120  | Wärmeträger     | Wasser      | Temp. [°C]    | 80   |
| Beschickung          | Vorschubrost                            | Steuerung | Pyrotronic      |             |               |      |
| Zusatzinstallationen | M-Zyklon + E-Filter Wärmeleistung 700kW |           |                 |             |               |      |
| <b>Brenner</b>       | Fabrikat                                |           | 0 Typ           |             | 0 Baujahr     | 0    |
|                      | Fabr.-Nr.                               |           | 0 Leistung [kW] |             | 0 Anz. Stufen | 0    |

|                    |              |   |              |          |                          |   |                              |   |
|--------------------|--------------|---|--------------|----------|--------------------------|---|------------------------------|---|
| <b>Brennstoffe</b> | Holzqualität | B | Feuchtigkeit | 04613297 | BHZ <sub>(Tot)</sub> [h] | 0 | BHZ <sub>(&gt;60%)</sub> [h] | 0 |
| HEL                | Zähler       |   | h            |          |                          |   |                              |   |

#### Messergebnisse

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

Messstelle: Nach E-Filter: EMPA-Stutzen am Rauchrohr, vor E-Filter: 8mm-Loch Rauchrohr

|                    |              |                             |      |      |                          |          |
|--------------------|--------------|-----------------------------|------|------|--------------------------|----------|
| <b>Abgaskanal:</b> | rund         | Durchmesser/Seitenlänge [m] | 0.35 | 0.00 | Fläche [m <sup>2</sup> ] | 0.096211 |
| Probenahme:        | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte   |      |      | Baro [mbar]              | 930      |

| Messung Nr.                                    | 1        | 2        | 3        |
|--|----------|----------|----------|
| Lastangabe [%]                                 | 40       | 40       | 40       |
| Start Messung                                  | 11:10    | 12:10    | 12:34    |
| Ende Messung                                   | 11:25    | 12:25    | 12:49    |
| O <sub>2</sub> [%]                             | 14.4     | 11.3     | 11.9     |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                  | 6.4      | 9.4      | 8.8      |
| Temp. Rauchgas [°C]                            | 159      | 158      | 160      |
| Geschw. [m/s]                                  | 6.7      | 6.1      | 6.6      |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 1225     | 1072     | 1156     |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                    | 398±57   | 505±73   | 510±74   |
| Abgasverlust [%]                               | 20.5±1.0 | 14.2±1.0 | 15.3±1.0 |
| Kesselleistung [kW]                            | 317±48   | 433±70   | 432±68   |

#### Resultate bez. 13% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken.

|  |      |      |      |
|--|------|------|------|
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] vor Filter      | 103  | 95   | 74   |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] nach Filter     | 27   | 40   | 32   |
| Wirkungsgrad E-Filter [%]                      | 74   | 58   | 56   |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                    | 1459 | 254  | 338  |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 1016 | 1305 | 1316 |

**Besonderheiten:** Keine

27.11.06

Messverantwortlicher: .....

**B.2: Messung vom 28.11. 2006, Brennstoff Holz + Riedstreu**

Tino Wehrli  
Emissionsmessungen

**Holzfeuerung**

04.12.06 / HOLZ-E06-B

villiger.sin/3031

**Datenblatt Abgasmessung Kessel 1**

|                |             |                   |               |               |  |
|----------------|-------------|-------------------|---------------|---------------|--|
| Anlageadresse: |             | Messdatum         | 28.11.06      | Kanton:       |  |
| Name           | Villiger    |                   |               |               |  |
| Strasse        | Holderstock | Tel-/Fax-Nummer   | 044 767 15 16 | 044 767 15 54 |  |
| PLZ/Ort        | 5643 Sins   | Sachbearbeiter/in | Herr          | Bühler        |  |

|                      |                     |               |                 |             |              |      |
|----------------------|---------------------|---------------|-----------------|-------------|--------------|------|
| <b>Kessel</b>        | Fabrikat            | Schmid        | Typ             | UTSW 700.32 | Baujahr      | 2004 |
|                      | Fabr.-Nr.           | 54107120      | Wärmeträger     | Wasser      | Temp. [°C]   | 80   |
| Beschickung          | Vorschubrost        | Steuerung     | Pyrotronic      |             |              |      |
| Zusatzinstallationen | M-Zyklon + E-Filter | Wärmeleistung | 700kW           |             |              |      |
| <b>Brenner</b>       | Fabrikat            |               | 0 Typ           |             | 0 Baujahr    | 0    |
|                      | Fabr.-Nr.           |               | 0 Leistung [kW] |             | 0 Anz Stufen | 0    |

|                    |              |      |              |      |                        |   |                          |   |
|--------------------|--------------|------|--------------|------|------------------------|---|--------------------------|---|
| <b>Brennstoffe</b> | Holzqualität | div. | Feuchtigkeit | 20 % | BHZ <sub>tot</sub> [h] | 0 | BHZ <sub>c-60%</sub> [h] | 0 |
| HEL                | Zähler       |      | h            |      |                        |   |                          |   |

**Messergebnisse**

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

Messstelle: Nach E-Filter: EMPA-Stutzen am Rauchrohr, vor E-Filter: 8mm-Loch Rauchrohr

|             |              |                             |      |      |             |          |
|-------------|--------------|-----------------------------|------|------|-------------|----------|
| Abgaskanal: | rund         | Durchmesser/Seitenlänge [m] | 0.35 | 0.00 | Fläche [m²] | 0.096211 |
| Probenahme: | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte   |      |      | Baro [mbar] | 950      |

| Messung Nr.                                    | 1       | 2        | 3       |
|--|---------|----------|---------|
| Lastangabe [%]                                 | mod.    | mod.     | mod.    |
| Start Messung                                  | 10:35   | 11:11    | 11:35   |
| Ende Messung                                   | 10:50   | 11:26    | 12:02   |
| O <sub>2</sub> [%]                             | 7.9     | 11.5     | 9.4     |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                  | 12.6    | 9.1      | 11.2    |
| Temp. Rauchgas [°C]                            | 141     | 134      | 139     |
| Geschw. [m/s]                                  | 4.6     | 4.5      | 4.5     |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 867     | 898      | 879     |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                    | 574±83  | 430±62   | 515±74  |
| Abgasverlust [%]                               | 8.2±1.0 | 10.2±1.0 | 9.0±1.0 |
| Kesselleistung [kW]                            | 527±100 | 386±67   | 469±85  |

**Resultate bez. 13% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,**

|  |      |      |      |
|--|------|------|------|
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] vor Filter                    | 55   | 51   | 41   |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] nach Filter                   | 10   | 11   | 8    |
| Wirkungsgrad E-Filter [%]                                    | 82   | 78   | 80   |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                  | 13   | 40   | 142  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ] | 287  | 265  | 241  |
| Cl(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]       | 7    | 9    | 7    |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]               | 1420 | 1064 | 1273 |

**½-Stundenmittelwerte**

|  |       |     |     |
|--|-------|-----|-----|
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                               | ----- | 11  | 8   |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                  | ----- | 27  | 142 |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ] | ----- | 276 | 241 |
| Cl(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]       | ----- | 8   | 7   |

**½-Stundenmittelwerte Massenstrom [g/h]**

|  |       |      |      |
|--|-------|------|------|
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | ----- | 1242 | 1273 |
| Staub-Wert trocken [g/h]                       | ----- | 13   | 10   |
| CO-Wert trocken [g/h]                          | ----- | 33   | 181  |
| NO <sub>x</sub> -Wert trocken [g/h]            | ----- | 343  | 307  |
| Cl(HCl)-Wert trocken [g/h]                     | ----- | 10   | 9    |

| Höchster ½-Stundenmittelwert                           | Grenzwerte | Prov. Beurteilung |
|--|------------|-------------------|
| Staub-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | 11±2       | 150 eingehalten   |
| CO-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]      | 142±14     | 500 eingehalten   |
| NO <sub>x</sub> -trocken [g/h]                         | 343±34     | 2500 eingehalten  |
| Cl(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 8±2        | 30 eingehalten    |

**Besonderheiten:** Messung 3: 12 Minuten Unterbruch wegen Neueinstellungen

04.12.06

Messverantwortlicher: .....

Tino Wehrli

**B.3: Messung vom 5.12. 2006, Brennstoff Holz + Riedstreu + Pferdemit + Brennstoff aus Hauptsilo**

Tino Wehrli  
Emissionsmessungen

**Holzfeuerung**

09.12.06 / HOLZ-E06-C

villiger.sin/3031

**Datenblatt Abgasmessung Kessel 1**

|                       |             |                          |               |                |  |
|-----------------------|-------------|--------------------------|---------------|----------------|--|
| <b>Anlageadresse:</b> |             | <b>Messdatum</b>         | 05.12.06      | <b>Kanton:</b> |  |
| Name                  | Villiger    |                          |               |                |  |
| Strasse               | Holderstock | <b>Tel-/Fax-Nummer</b>   | 044 767 15 16 | 044 767 15 54  |  |
| PLZ/Ort               | 5643 Sins   | <b>Sachbearbeiter/in</b> | Herr          | Bühler         |  |

|                             |                     |               |                 |             |              |      |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------|-------------|--------------|------|
| <b>Kessel</b>               | Fabrikat            | Schmid        | Typ             | UTSW 700.32 | Baujahr      | 2004 |
|                             | Fabr.-Nr.           | 54107120      | Wärmeträger     | Wasser      | Temp. [°C]   | 80   |
| <b>Beschickung</b>          | Vorschubrost        | Steuerung     | Pyrotronic      |             |              |      |
| <b>Zusatzinstallationen</b> | M-Zyklon + E-Filter | Wärmeleistung | 700kW           |             |              |      |
| <b>Brenner</b>              | Fabrikat            |               | 0 Typ           |             | 0 Baujahr    | 0    |
|                             | Fabr.-Nr.           |               | 0 Leistung [kW] |             | 0 Anz.Stufen | 0    |

|                    |              |      |              |      |                          |   |                          |   |
|--------------------|--------------|------|--------------|------|--------------------------|---|--------------------------|---|
| <b>Brennstoffe</b> | Holzqualität | div. | Feuchtigkeit | 20 % | BHZ <sub>Total</sub> [h] | 0 | BHZ <sub>0-60%</sub> [h] | 0 |
| HEL                | Zähler       |      | h            |      |                          |   |                          |   |

**Messergebnisse**

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

Messstelle: Nach E-Filter: EMPA-Stutzen am Rauchrohr, vor E-Filter: 8mm-Loch Rauchrohr

|                    |              |                             |      |      |             |          |
|--------------------|--------------|-----------------------------|------|------|-------------|----------|
| <b>Abgaskanal:</b> | rund         | Durchmesser/Seitenlänge [m] | 0.35 | 0.00 | Fläche [m²] | 0.096211 |
| <b>Probenahme:</b> | innenliegend | Netzmessung, 2 Messpunkte   |      |      | Baro [mbar] | 940      |

| Messung Nr.                                    | 1       | 2        | 3        |
|--|---------|----------|----------|
| Lastangabe [%]                                 | mod.    | mod.     | mod.     |
| Start Messung                                  | 10:58   | 11:42    | 12:34    |
| Ende Messung                                   | 11:13   | 11:55    | 12:47    |
| O <sub>2</sub> [%]                             | 8.6     | 14.2     | 10.0     |
| CO <sub>2</sub> berechnet [%]                  | 11.9    | 6.5      | 10.6     |
| Temp. Rauchgas [°C]                            | 160     | 145      | 164      |
| Geschw. [m/s]                                  | 5.0     | 4.6      | 5.0      |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 905     | 899      | 907      |
| Feuerungswärmeleistung [kW]                    | 566±82  | 314±45   | 504±73   |
| Abgasverlust [%]                               | 9.9±1.0 | 16.5±1.0 | 11.5±1.0 |
| Kesselleistung [kW]                            | 510±90  | 263±41   | 447±75   |

**Resultate bez. 13% O<sub>2</sub>, 0°C, 1013 mbar, trocken,**

|  |      |      |      |
|--|------|------|------|
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] vor Filter                    | 76   | 179  | 218  |
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ] nach Filter                   | 32   | 79   | 49   |
| Wirkungsgrad E-Filter [%]                                    | 58   | 56   | 78   |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                  | 128  | 2066 | 305  |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ] | 234  | 277  | 280  |
| Cr(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]       | 7    | 12   | 7    |
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]               | 1399 | 762  | 1244 |

**½-Stundenmittelwerte**

|  |       |      |      |
|--|-------|------|------|
| Staub (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                               | ----- | 54   | 64   |
| CO (N) [mg/m <sup>3</sup> ]                                  | ----- | 1028 | 1186 |
| NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> (N) [mg/m <sup>3</sup> ] | ----- | 254  | 278  |
| Cr(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]       | ----- | 9    | 10   |

**½-Stundenmittelwerte Massenstrom [g/h]**

|  |       |      |      |
|--|-------|------|------|
| Abgasstrom, tr. [m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | ----- | 1103 | 1003 |
| Staub-Wert trocken [g/h]                       | ----- | 59   | 64   |
| CO-Wert trocken [g/h]                          | ----- | 1134 | 1189 |
| NO <sub>x</sub> -Wert trocken [g/h]            | ----- | 280  | 279  |
| Cr(HCl)-Wert trocken [g/h]                     | ----- | 10   | 10   |

| Höchster ½-Stundenmittelwert                           | Grenzwerte | Prov. Beurteilung |
|--|------------|-------------------|
| Staub-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]   | 64±6       | 150 eingehalten   |
| CO-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]      | 1186±119   | 500 überschritten |
| NO <sub>x</sub> -Wert trocken [g/h]                    | 280±28     | 2500 eingehalten  |
| Cr(HCl)-Wert trocken [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ] | 10±2       | 30 eingehalten    |

**Besonderheiten:** Keine

09.12.06

Messverantwortlicher: \_\_\_\_\_

Tino Wehrli

## Anhang C: Messung des spezifischen Staubwiderstandes

### C.1 Filterabreinigung des Versuches mit Pilzkompost, 10.6.2005

mechanische verfahrenstechnik

Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen  
Universität Dortmund



Dortmund, 22.11.2006

Spezifischer Staubwiderstand "Probe II, 10.06.06" (unter Luftatmosphäre mit Wassertauunkt 54,5°C)

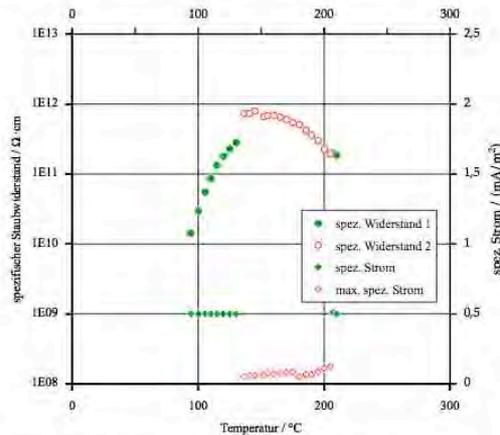


Abbildung: Spezifischer Staubwiderstand sowie spez. Strom vs. Temperatur

**Anmerkungen:**

Staubschicht-Dicke zwischen den 10 cm<sup>2</sup> Platten: 2,49 mm.

Die Messungen erfolgten bei ansteigender Temperatur anfänglich bei einem spezifischen Strom von 0,5 mA/m<sup>2</sup> (spez. Widerstand 1). Der Strom wurde dabei über die Messspannung geregelt. Ab 136 °C begann die Stromanzeige infolge Rücksprühens zu fluktuieren. Um dies zu vermeiden musste der spezifische Strom im weiteren Verlauf (spez. Widerstand 2) deutlich zurückgenommen werden. Ab 207 °C wurden wieder 0,5 mA/m<sup>2</sup> möglich.

### C.2 Filterablagerungen an Filterplatten, Probenahme vom 6.10.2006

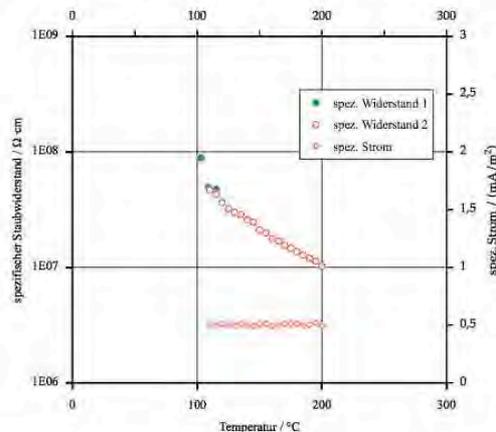
mechanische verfahrenstechnik

Fachbereich Bio- und Chemieingenieurwesen  
Universität Dortmund



Dortmund, 16.11.2006

Spezifischer Staubwiderstand "Probe I vom 06.10.2006" (unter Luftatmosphäre mit Wassertauunkt 48 °C)



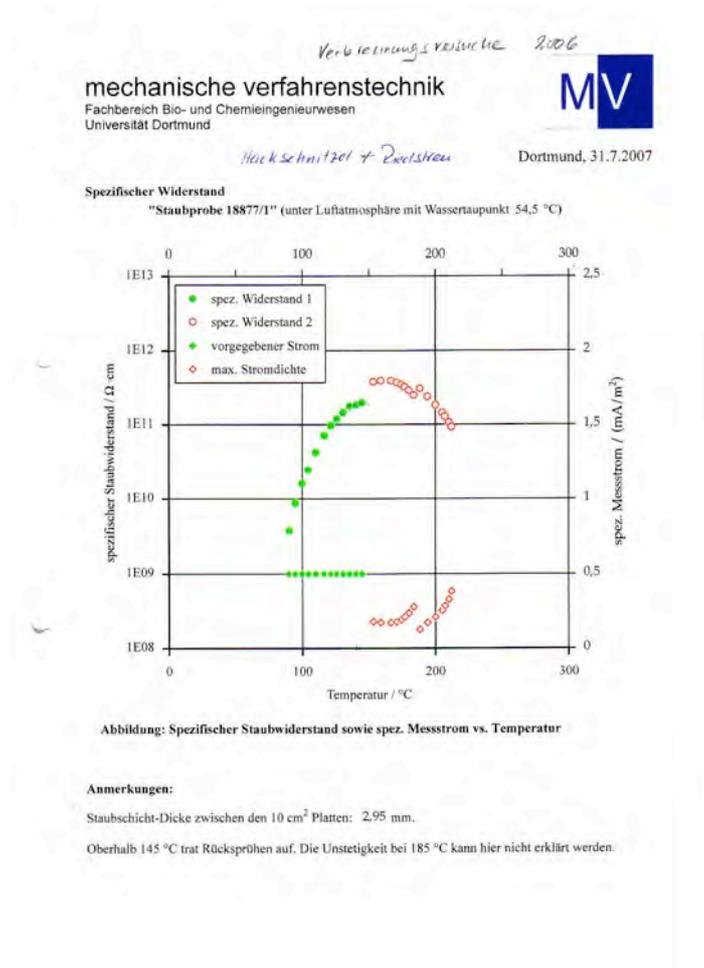
Figur: Spezifischer Staubwiderstand sowie spez. Strom vs. Temperatur

**Anmerkungen:**

Staubschicht-Dicke zwischen den 10 cm<sup>2</sup> Platten: 2,75 mm bzw. 2,33 mm.

Die ersten 3 Messungen (spez. Widerstand 1) erfolgten bei hohen spezifischen Strömen zwischen 4,5 und 8,4 mA/m<sup>2</sup>. Dabei war die Stromanzeige instabil. Zur Reduzierung wurde die Spannungsversorgung ausgetauscht, wobei die aufliegende Elektrode bewegt wurde. Die Nachmessung der Schichtdicke ergab den reduzierten Wert von 2,33 mm, der für die Ermittlung des spezifischen Widerstandes 2 Verwendung fand.

C.3 Filterabreinigung des Versuches mit Hackschnitzel + Riedstreu, 28.11.2006



C.4 Filterabreinigung des Versuches mit Hackschnitzel + Riedstreu + Pferdemist, 28.11.2006

