

Heizen mit Getreide II

- Emissionsmessungen -

Heizen mit Getreide II 0.4 Seite 735

Thorben Holsteiner

Heizen mit Getreide II**- Emissionsmessungen -****Februar 2005**

Thorben Holsteiner hat im Rahmen einer Masterarbeit bei Prof. Isensee am Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Universität Kiel, Olshausenstr. 40-60, 24098 Kiel, Emissionen verschiedener Brennstoffe und Heizkessel untersucht. Die Messungen wurden in enger Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Walter Eggersgluß, Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Bereich Land- und Umwelttechnik an der DEULA Schleswig-Holstein durchgeführt.

Gliederung	Seite
1.	Einleitung 737
2.	Grundlagen zur Anwendung biogener Energieträger 738
2.1	Technische und physikalische Grundlagen..... 738
2.1.1	Systematik der festen Bioenergieträger..... 738
2.1.2	Technische Möglichkeiten der Handhabung der Brennstoffe. 739
2.1.3	Energetische Umwandlung von Festbrennstoffen von Verbrennungsanlagen..... 744
2.1.4	Grundlagen der Aschezusammensetzung und deren Nutzung 746
2.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen 748
2.2.1	Grundlagen des BimSchG 748
2.2.2	Richtlinien der TA-Luft und der Feuerungsverordnung..... 749
2.3	Ökonomische Rahmenbedingungen 750
2.3.1	Kosten der Energiebereitstellung 750
2.3.2	Bewertung der einzelnen Brennstoffe in ihrer technischen Handhabbarkeit 752
3.	Ausgestaltung der Fragestellung und des Versuchs..... 753
3.1	Beschreibung der drei Kessel 753
3.1.1	Passat-Kessel 753
3.1.2	Veto-Kessel 755
3.1.3	Reka-Kessel 756
3.2	Beschreibung und Durchführung des Versuchs 757
3.2.1	Versuchsbeschreibung..... 757
3.2.2	Versuchsdurchführung..... 760
3.2.2.1	Verbrennung von Holzpellets 760
3.2.2.2	Verbrennung von Holzhackschnitzeln..... 763
3.2.2.3	Verbrennung von Gerste 766
3.2.2.3.1	Verbrennung von Weizen 769
3.2.2.3.2	Verbrennung von Roggen 772
3.2.2.3.2.1	Verbrennung von Strohpellets 775
3.2.2.4	Verbrennung von GNP-Pellets 778
3.3	Bewertung der Ascheproben 781
4	Zusammenfassung der Ergebnisse 783
5.	Fazit 786
6.	Literatur 786
7.	Anlagen 787

1 Einleitung

Gelöscht: ¶

„Heizen mit Weizen“; mit diesem Werbeslogan weisen einige Heizungsanlagenhersteller provokativ auf einen Sachverhalt hin, der für einige Bürger beunruhigend wirken mag: Getreideverbrennung kann ökonomisch sinnvoll sein.

Brennt Getreide denn überhaupt? Ist Getreideverbrennung für mich sinnvoll?
Darf man das überhaupt?

Im Rahmen öffentlicher Diskussionen zum Thema Brennstoffe aus fester Biomasse stehen diese Fragen häufig im Mittelpunkt. In den skandinavischen Ländern werden schon seit langem feste Biomasse verbrannt. Man ist dort von den historischen Holzheizungen ausgehend nah an den natürlichen Brennstoffen geblieben und hat Getreideabfälle mit in diesen Kesseln verbrannt. Durch den im Zuge der Neustrukturierung der europäischen Agrarpolitik einsetzenden Preisverfall bei Getreide wurde dieser Brennstoff relativ vorzüglicher, gleichzeitig wurden fossile Brennstoffe immer günstiger.

In Dänemark gibt es einen ausgeprägten Markt für feste Biobrennstoffe wie Getreide. Einige Abfallprodukte, die nicht als Futtermittel eingesetzt werden, werden nach Dänemark exportiert. Es stellt sich die Frage, warum diese Brennstoffe nicht auch vor Ort genutzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit sollen die genehmigungsrechtlichen sowie ökonomischen Rahmenbedingungen betrachtet werden. Es findet eine Klassifizierung der Brennstoffe statt und eine Auswahl dieser Brennstoffe wird im empirischen Teil der Arbeit in verschiedenen Kesseln verbrannt. Bei dieser Verbrennung werden die Einhaltung der genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen sowie die Handhabung der Brennstoffe betrachtet. In dem Versuch werden in drei Kesseln unterschiedlicher Hersteller sieben verschiedene feste Biobrennstoffe verfeuert. Darunter befinden sich drei Getreidearten, Roggen Weizen und Gerste, drei Pelletsformen, Stroh, Holz und GNP-Pellets, sowie der Brennstoff Holzhackschnitzel. Es stellt sich die Frage, welches Potenzial in diesen Brennstoffen liegt.

2 Grundlagen zur Anwendung biogener Energieträger

2.1 Technische und physikalische Grundlagen

2.1.1 Systematik der festen Bioenergieträger

Die festen Bioenergieträger werden durch vier Eigenschaften gekennzeichnet. Sie sind „fest“, also weder flüssig noch gasförmig klar. Der Zusatz „Bio“ lässt die Herkunft des Energieträgers ableiten, er besteht aus organischer Masse.

Der Begriff „Energie“ wird laut Gabler Wirtschaftslexikon wie folgt definiert: Fähigkeit, physikalische Arbeit zu leisten und damit Veränderungen in und am Stoff zu bewirken (Gabler 2000).

Unter dieser Definition des festen Bioenergieträgers kann man die Systematik weiterführen und die einzelnen Stoffe einordnen (Abb. 1).

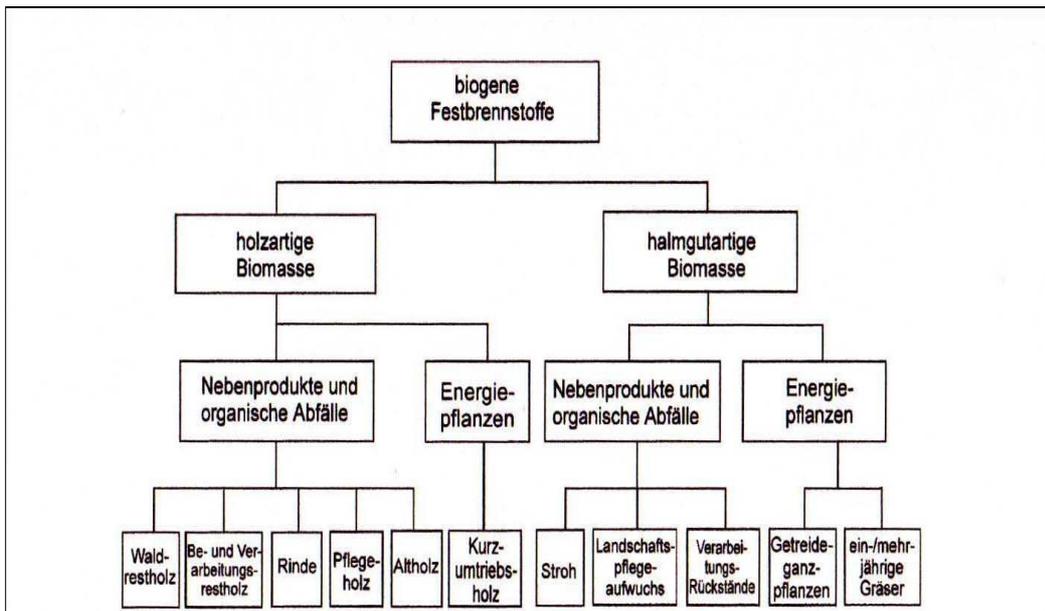


Abbildung 1: Systematik der biogenen Festbrennstoffe
(Quelle: nach Kaltschmidt, 2002)

2.1.2 Technische Möglichkeiten der Handhabung der Brennstoffe

Die Bereitstellung von Biomasse lässt sich in Abb. 2 an Hand der Herkunft und der technischen Umwandlungsform schematisch darstellen.

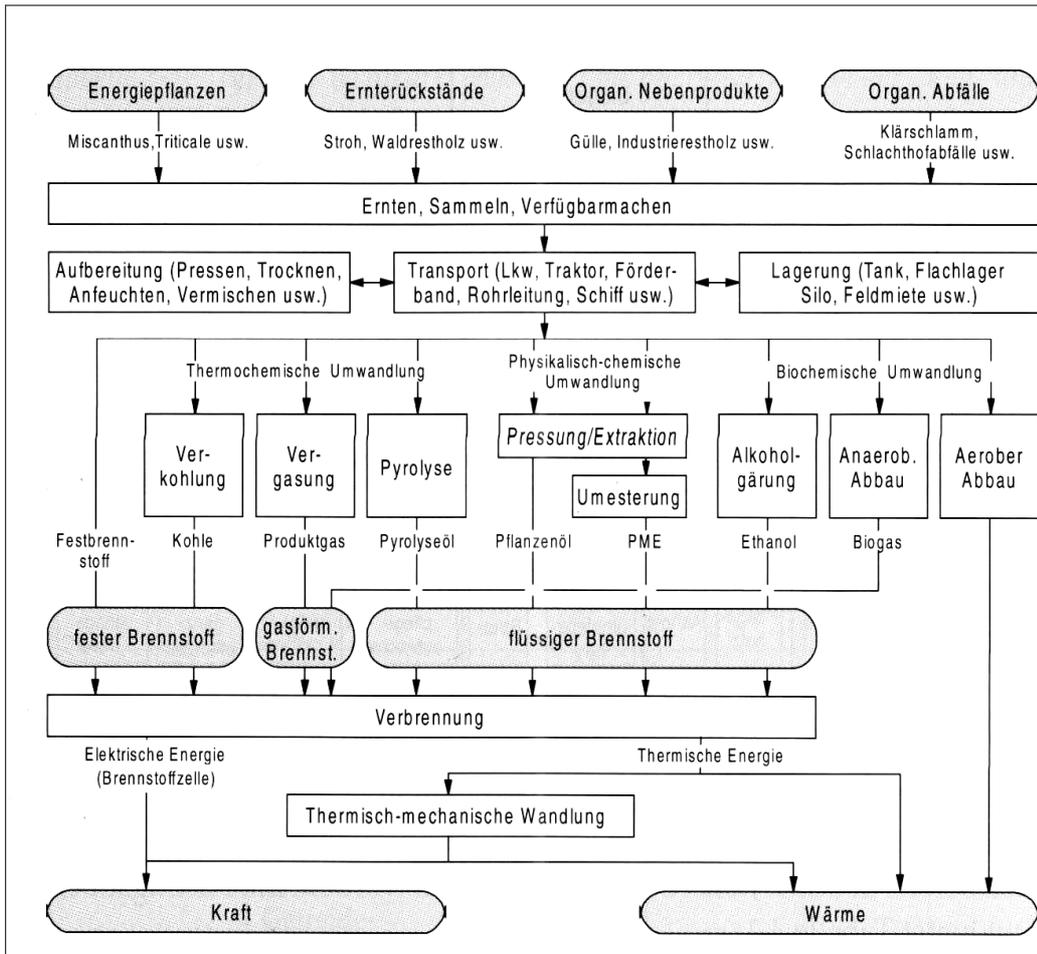


Abbildung 2: Verfahrensvarianten zur End- bzw. Nutzenergiebereitstellung aus Biomasse (Quelle: Hartmann und Kaltschmidt, 2002)

Die jeweilige Form des Brennstoffes wird entscheidend durch die Feuerungstechnik bestimmt. Die Anlagengröße hat somit einen entscheidenden Einfluss auf die Aufbereitung des jeweiligen Brenngutes. In größeren Einheiten lassen sich aufwendigere technische Anlagen einfacher wirtschaftlich darstellen, als in Kleinanlagen. Diesem Umstand zur Folge werden an die Brennstoffqualität in Kleinanlagen besondere Ansprüche gestellt. Werden diese Anlagen in Privathaushalten betrieben, sind die Probleme durch z.B. Staubbelastung oder Geruchsbelästigung weitaus problematischer einzustufen, als in industriellen Großanlagen, wo die technischen Möglichkeiten zur Immissionsminderung sich wirtschaftlich darstellen lassen.

Des Weiteren ergeben sich aus der Inhomogenität der Brennstoffe Probleme bei der Kalkulation und Organisation der Brennstoffbereitstellung.

Diesen Problemen versucht man durch eine Normung der Brennstoffe Rechnung zu tragen. Um sich als Anlagenbetreiber, der seine Investition auf 10-15 Jahre ausrichtet, gegen eventuelle Preisrisiken abzusichern, bedarf es einer genauen Prüfung der entsprechenden Biobrennstoffe. Die fehlende Infrastruktur bei der Bereitstellung von Biomasse im Vergleich zu fossilen Brennstoffen wird hier auf viele Anwender abschreckend wirken. Es gibt im Bereich der Biobrennstoffe nur Nischenmärkte, die einzelnen Anwendern preisgünstige Brennstoffe zur Verfügung stellen können. Für viele Heizungsbetreiber ist an dieser Stelle auch die fehlende Vergleichbarkeit von Biobrennstoffen ein Problem, da es nur Branchenkennern möglich ist, z.B. eine Partie Holzhackschnitzel mit einer Partie Strohpellets bezüglich ihres Heizwertes zu vergleichen. Die administrativen Kosten für Probennahme und Heizwertberechnung können den Kostenvorteil der festen Bioenergieträger gegenüber fossilen Energieträgern bei Kleinanlagen aufzehren. An dieser Stelle setzen verschiedene Initiativen unterschiedlicher Verbände an, um eine Normung von einheitlichen Brennstoffen wie z.B. Holzpellets oder Holzhackschnitzel zu erreichen. Hier wird auf europäischer Ebene an einer Norm CEN/ TC 335 für „Solid biofuels“ gearbeitet, in der definierte Bedingungen zu den einzelnen Stoffeigenschaften wie Abrieb oder Wassergehalt usw. gearbeitet wird. Diese Bestrebungen sind von Seiten der Nutzer solcher Brennstoffe zu begrüßen, da sie für eine Vergleichbarkeit der Brennstoffe sorgen.

In der folgenden Abbildung werden schematisch die stofflichen Qualitätsmerkmale aufgelistet nach chemischen sowie physikalischen Eigenschaften.

Zu den chemischen Eigenschaften zählen nach STREHLER (2003) der Elementgehalt (vor allem Cl, N, S, K und Schwermetalle) sowie der Gehalt an Asche, Wasser und Pilzsporen. Daneben gehören auch der Heizwert und das Ascheerweichungsverhalten zu dieser Gruppe (Abb. 3).

Die physikalischen Eigenschaften werden durch die Parameter Abmessungen, Schüttdichte, Teilchen- oder Presslingsdichte, Feinanteil, Größenverteilung und Abriebsfestigkeit beschrieben. Diese Eigenschaften stehen in hoher Wechselwirkung zueinander.

Qualitätsmerkmal	wichtigste Auswirkung
<i>chemisch-stoffliche Merkmale:</i>	
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung
Heizwert	Brennstoffausnutzung, Anlagenauslegung
Elementgehalte:	
Cl	HCl-, PCDD/F-Bildung, Hochtemperaturkorrosion
N	NO _x -, HCN- und N ₂ O-Emissionen
S	SO _x -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
K	Hochtemperaturkorrosion, Ascheerweichungsverhalten
Mg, Ca, P	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission, zum Teil katalytische Wirkung bei PCDD/F-Bildung
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung
Ascheerweichungspunkt	Anlagenbetriebssicherheit, Niveau des Schadstoffausstoßes
Pilzsporen	Gesundheitsrisiken
<i>physikalische Merkmale:</i>	
Lagerungsdichte	Transport- und Lageraufwendungen, Logistikplanung
Teilchendichte	Feuerungseigenschaften (spezifische Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate)
Größenverteilung	Rieselfähigkeit, Brückenbildungsneigung, Trocknungseigenschaften, Staubbildung
Feinanteil	Lagerdichte, Lagerfähigkeit, Staubbildung
Abriebfestigkeit	Entmischung, Verluste

Abbildung 3: Qualitätsmerkmale biogener Festbrennstoffe und ihre wichtigsten Auswirkungen (Strehler 2003)

Der Wassergehalt eines Stoffes ist die wesentliche Einflussgröße für den Heizwert. Der Heizwert ist wie folgt definiert:

$$H_v(w) = \frac{H_v(wf) * (100 - W) - 2,441W}{100}$$

$H_v(w)$ = Heizwert des Holzes in MJ/kg

W = Wassergehalt

$H_v(wf)$ = Heizwert der Holzsubstanz im wasserfreien Zustand

Die Konstante 2,441 ist die Verdampfungswärme des Wassers in MJ/kg bezogen auf 25°C (siehe Verlauf in Abb. 4).

Der Wassergehalt eines Brennstoffes beeinflusst neben dem Heizwert auch die Lagerungseigenschaften der Biomasse. Hohe Wassergehalte über 16 % führen bei längerer Lagerung zu Schimmelbildung und Fäulnis. Pilzliches Wachstum kann eine Anreicherung mit Lignin zur Folge haben.

Der Heizwert wird beim Vergleich von zwei trockenen Brennstoffen stark durch die stoffliche Zusammensetzung beeinflusst. Cellulose (trocken) hat z.B. einen

Heizwert von ca. 17,3 MJ/kg während Lignin einen höheren Heizwert von 28,8 MJ/kg hat. Noch höher liegen Holzextraktstoffe (Öle und Harze), nämlich bei 35,9 MJ/kg, Holzpolyosen (früher Hemicellulosen: Polysacharide mit geringem Polymerisationsgrad) hingegen haben nur einen Heizwert von 16,2 MJ/kg. Ölhaltige Brennstoffe, wie z.B. Rapspresskuchen, haben einen Heizwert von ca. 36 MJ/kg. An Hand dieser Beispiele lässt sich ein Überblick über die Varianz der Heizwerte gewinnen.

Der Brennwert ist als die Wärmemenge definiert, die verfügbar wird, wenn auch die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wasserdampfes zurück gewonnen wird. Die Brennwerttechnik erlaubt eine bessere Ausnutzung der in der Biomasse gespeicherten Energie, dies trifft besonders bei feuchten Brennstoffen zu.

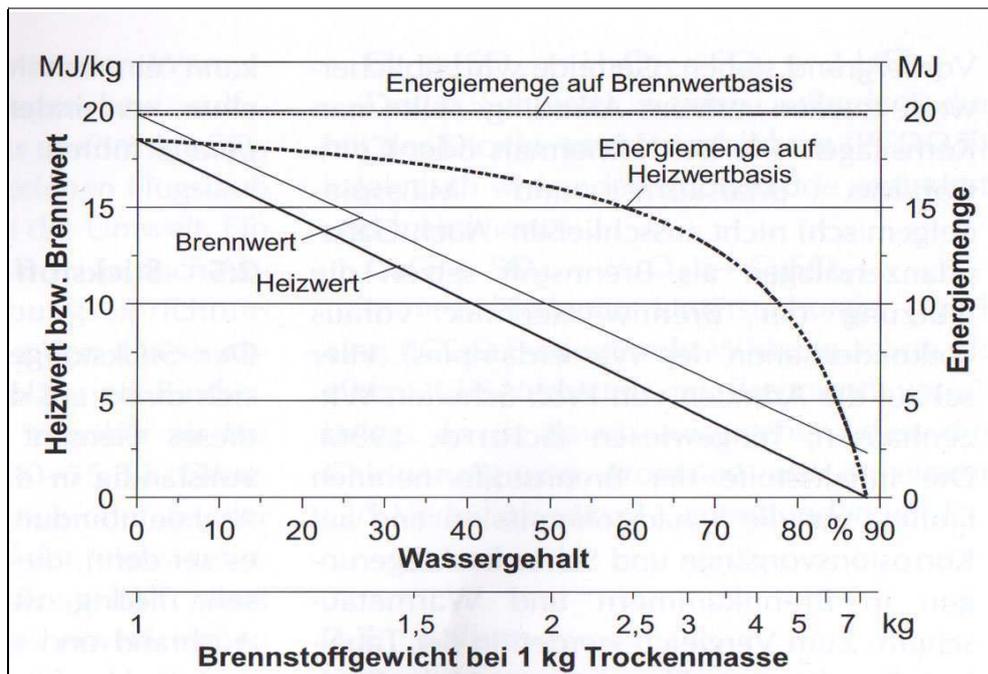


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Heiz- und Brennwert und dem Wassergehalt (Quelle: Strehler 2003)

Die Energiemenge auf Brennwertbasis kann erst durch Rekondensation der Rauchgase erschlossen werden und wird erst nach völliger Abkühlung dieser verfügbar.

Die Energiemenge, die als Heizwert zur Verfügung steht, ist, wie in der obigen Abbildung 4 deutlich wird, stark vom Wassergehalt abhängig. Erst ab Wassergehalten von über 30% ist eine schlechtere Verfügbarkeit der Energie zu erkennen.

Bei der Brennwerttechnik ist das Trocknen nur sinnvoll, um Fäulnis oder Pilze zu vermindern. Auf die Energieausbeute hat die Feuchte bei der Brennwerttechnik keinen Einfluss.

2.1.3 Energetische Umwandlung von Festbrennstoffen in Verbrennungsanlagen

Festbrennstoffe enthalten sowohl brennbare als nichtbrennbare Bestandteile (Abb. 5). Die brennbaren Bestandteile sind Kohlenwasserstoffverbindungen, die mit dem Luftsauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser sowie einigen weiteren chemischen Substanzen reagieren, die besonders bei der Betrachtung der Emissionen diskutiert werden.

Es werden bei den brennbaren Substanzen zwei Gruppen unterschieden: die flüchtigen und die nicht flüchtigen Bestandteile. Die flüchtigen Bestandteile ergeben das Brenngas und sorgen für die Flambildung, während die nicht flüchtigen Bestandteile in Koks überführt werden.

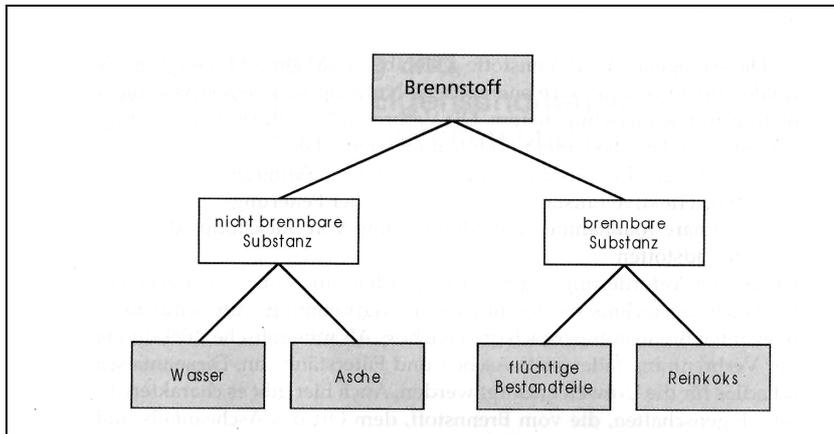


Abbildung 5: Zusammensetzung fester Brennstoffe (Schulze und Marutzky 2003)

Der Wirkungsgrad in Verbrennungsanlagen hängt auf der einen Seite entscheidend von der Brennstoffart und Zusammensetzung ab, auf der andern Seite auch von den jeweiligen Verbrennungstechnologien.

Nach OBERNBERGER können folgende Verbrennungstechnologien unterschieden werden:

Festbettverbrennung
Wirbelschichtverbrennung

Staubverbrennung

Die Festbettverbrennungssysteme setzen sich zusammen aus Unterschubfeuerungen und Rostfeuerungen. Die Luftzuführung bei den jeweiligen Systemen wird unterschieden in Primärluft, die durch das Brenngut hindurchgeleitet wird, und für die Brennstofftrocknung, die Vergasung und den Holzkohlenausbrand beeinflusst. Die Zufuhr der Sekundärluft erfolgt in einer separaten Nachbrennzone im Kessel und führt zur Oxidation der Brenngase.

In Wirbelschichtfeuerungen wird der Brennstoff in einer Suspension aus Bettmaterial und brennbaren Gasen verbrannt. Die Zuführung der Primärluft erfolgt von unten durch einen Lochboden und sorgt für einen Schwebezustand des Brennstoff-Bettmaterial-Gemisches. Die Sekundärluft wird in den Bereich über dem Bett eingeblasen und sorgt dort für eine Verbrennung der Brenngase. Die Asche wird zusammen mit den Rauchgasen ausgetragen und über einen Zyklon abgeschieden.

Wirbelschichtfeuerungen sind auf Grund der erforderlichen technischen Ausstattung erst ab einer Ablagengröße von 15-20 MW wirtschaftlich.

Staubfeuerungen sind für biogene Brennstoffe mit Korngrößen von unter 2mm geeignet. Der Brennstoff wird mit Primärluft vermischt in die Feuerung eingeblasen und verbrennt in Suspension. Der vollständige Ausbrand der brennbaren Gase erfolgt nach Zugabe der Sekundärluft.

Diese Arbeit soll vorrangig die Festbettfeuerungen betrachten. Bei der zu den Festbettfeuerungen gehörenden Unterschubfeuerung wird der Brennstoff von unten in den Feuerraum eingetragen. Dies setzt eine, von den physikalischen Eigenschaft her betrachtet, feinkrümmelige Struktur voraus. Dieses Verfahren ist im Hinblick auf die Probleme bei der Ascheaustragung nur für aschearme Brennstoffe geeignet. Die Unterschubfeuerung ist aufgrund der Brennstoffzufuhr über Förderschnecken technisch auf eine Größe bis zu 6 MW begrenzt. In diesem Bereich sind die Investitionskosten hier niedriger als bei Rostfeuerungen.

Rostfeuerungen zeichnen sich durch eine automatische Beschickung des Feuerrostes mit dem jeweiligen Energieträger aus. Es werden hier verschiedenen Arten der Rostfeuerung an Hand des Vorschubes unterschieden. Man unterscheidet zwischen Vorschubrost, Wanderrost und Vibrationsrost. Die Asche wird meist an der gegenüberliegende Seite zur Befüllung über den Rost hinweg geschoben, und fällt in den Aschekasten oder wird über die Ascheaustragsschnecke aus dem Brennraum entfernt.

Die Primärluftzuführung erfolgt bei Rostfeuerungen durch Schlitze im Rost durch das Brenngut hindurch. Dadurch sind Rostfeuerungen universell einsetzbar, d.h. begrenzend wirkt hier die Schlitzbreite im Rost. Es können nur so feine Materialien verbrannt werden, die bedingt durch ihre Struktur nicht durch den Rost fallen können.

Um eine optimale Verbrennung zu gewährleisten, muss auf eine gleichmäßige Belegung des Rostes mit Brennmaterial geachtet werden. Erfolgt die Beschickung ungleichmäßig, bilden sich Glutnester und die Verbrennung bricht zusammen. Ein weiteres Problem ist die Schlackebildung im Zusammenhang mit dem Ascheerweichungsverhalten der einzelnen Brennstoffe. Schlackebrocken führen hier zur Verstopfung der Primärluftöffnungen und damit zu einem schlechteren Ausbrand und höheren Immissionen. Auf diese Problematik wird im weiteren Verlauf noch eingegangen.

2.1.4 Grundlagen der Aschezusammensetzung und deren Nutzung

Asche lässt sich durch folgende Merkmale bewerten:

- Aschegehalt des Brennstoffs
- Anfallende Aschemenge
- Ort des Ascheanfalls (Rost-, Filter-, und Flugasche)
- Zusammensetzung und Schmelzverhalten der Asche
- Verwertungs- und Beseitigungskriterien
- Biogene Brennstoffe sind durch einen unterschiedlich hohen Ascheanfall im Verbrennungsvorgang gekennzeichnet (Tab. 1).

Tabelle 1: Aschegehalte unterschiedlicher Brennstoffe Quelle: eigene Darstellung nach Marutzky und Schulze (2001)

Brennstoff	Aschegehalt in %
<i>Holz ohne Rinde</i>	<i>0,5 - 1</i>
<i>Gebrauchtholz</i>	<i>0,5 - 10</i>
<i>Stroh</i>	<i>3 - 10</i>
<i>Roggen</i>	<i>2</i>
<i>Weizen</i>	<i>2,7</i>
<i>Triticale</i>	<i>2,1</i>

Der Ascheanfall bei Stroh ist in dieser Betrachtung am höchsten, er variiert jedoch stark in Anhängigkeit vom Ausgangsmaterial. Zusätzlich zur Aschemenge ist zu beachten, in welcher Form, d.h. ob als Grobasche,

Mittelasche oder Feinasche, die jeweilige Asche anfällt. Die Grobasche sammelt sich meist im Brennraumbereich hinter dem Brennrost, die Mittelasche setzt sich in den Zügen der jeweiligen Kessel und im Schornsteinbereich ab, die Feinasche wird als Staub im Abgas mit in den Schornstein und in die Umwelt ausgetragen. Ein Zyklon im Abgasstrom kann diese Emissionen begrenzen. In Anhängigkeit der Fraktionierung unterscheidet sich die Asche auch in der Schadstoffbelastung: In der Grobasche werden die mineralischen und alle weiteren nicht brennbaren Verunreinigungen des Brenngutes gefunden sowie schwerflüchtige Brennstoffbestandteile wie Aluminium-, Chrom-, Eisen-, Kupfer-, Magnesium-, Silizium-, und Titanverbindungen. Flüchtigere Bestandteile wie Arsen-, Blei-, Cadmium-, Halogen- und Zinkverbindungen werden in den Mittel- und Feinaschen angereichert und können dort größere Konzentrationen erreichen. Besonders flüchtige Bestandteile, wie Quecksilber werden nahezu komplett emittiert und sind kaum in den Aschen angereichert (siehe Tab. 2).

Tabelle 2: Aschezusammensetzung einer Holzfeuerung (Quelle: Marutzky und Schulze 2001)

Element	Aschetyp			
	Grob	Mittel	Fein	
<i>Ca</i>	283	215	167	<i>g/kg</i>
<i>Mg</i>	34	34	25	<i>g/kg</i>
<i>K</i>	129	98	76	<i>g/kg</i>
<i>Na</i>	20	18	13	<i>g/kg</i>
<i>P</i>	14	70	28	<i>g/kg</i>
<i>As</i>	---	2	7	<i>mg/kg</i>
<i>Cd</i>	<1	15	63	<i>mg/kg</i>
<i>Cr</i>	69	61	50	<i>mg/kg</i>
<i>Cu</i>	98	90	122	<i>mg/kg</i>
<i>Cl</i>	198	1120	5250	<i>mg/kg</i>
<i>F</i>	68	2100	4860	<i>mg/kg</i>
<i>Hg</i>	---	---	0,05	<i>mg/kg</i>
<i>Pb</i>	3	18	59	<i>mg/kg</i>
<i>Zn</i>	112	816	2920	<i>mg/kg</i>

Ein weiteres Kriterium zur Klassifizierung der Asche ist das Ascheerweichungsverhalten, dies wird nach der amerikanischen Norm ASTM D1857-87 in vier unterschiedliche Temperaturbereiche eingeteilt. In einem Ascheschmelzofen werden Ascheproben unter definierten Bedingungen erhitzt

und das Schmelzverhalten der Asche mit einer Kamera fotografiert, so dass jede Veränderung der Ausformung der Asche verfolgt und abgelesen werden kann.

Den ersten Temperaturbereich bezeichnet man als Initialtemperatur, dort finden erste Veränderungen im Bereich der Asche statt und die Kegelspitze der Asche, die sich beim Abbrand bildet, beginnt sich zu verändern. Der zweite Temperaturbereich wird als Erweichungstemperatur bezeichnet, in diesem Temperaturbereich wird der Aschekegel bereits abgerundet, die Kegelhöhe und Kegelbreite sind gleich groß. Im dritten Temperaturbereich hat der Kegel im Verhältnis zur Höhe die doppelte Breite. Dieser Temperaturbereich wird Halbkugeltemperatur genannt. Der vierte und letzte Temperaturbereich wird Flüssigkeitstemperatur genannt, hier ist der Schmelzverlauf fortgeschritten und die Höhe des Kegels beträgt maximal 1,6 mm.

Die Nutzung der Aschen als organischer Dünger setzt eine geringe Belastung mit Schwermetallen und eine gute Düngewirkung bezüglich der P, K und Ca-Gehalte voraus. Inwieweit diese Bedingungen bei der Verbrennung von Biomassen gegeben sind, hängt extrem vom Brennstoff ab. Langsam wachsende Biomassen haben tendenziell höhere Gehalte an Schwermetallen als einjährige Kulturen wie Getreide oder Flachs. Eine Anwendung als Düngemittel ist demnach nur nach entsprechender Untersuchung möglich.

2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Durch den erhöhten Wärmebedarf, z.B. zum Heizen der Ställe, fallen landwirtschaftliche Betriebe im Bereich der 1.BImSchV in restriktivere Abgasnormen, als kleinere Wohnhäuser (Tab. 3).

2.2.1 Grundlagen des BImSchG

Die Rahmenbedingungen zum Betrieb und zur Genehmigung von Biomassefeuerungen sind im Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (BImSchG) vom 15. März 1974, neugefasst durch Bekanntmachung vom 29. September 2002 festgelegt (Tab. 3).

Maßgebend für die Biomassefeuerungen sind die 1.BImSchV, die für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Feuerungsanlagen, die keiner Genehmigung bedürfen, gilt. Für Anlagen unter 15 kW werden in der 1.BImSchV bestimmte Brennstoffe vorgeschrieben. Bei diesen handelt es sich um Steinkohle, Braunkohle, Torfbriketts, Holzkohle und naturbelassenen Holz. Für Anlagen über 15 kW werden im §3 detaillierte Listen zu den zugelassenen Brennstoffen festgelegt (Anlage 1). Diese betreffen die Anlagen bis zu einer

Leistung von 100 kW. Über 100 kW werden diese Anlagen von der 4.BImSchV erfasst und sind einem gesonderten Genehmigungsverfahren zu unterziehen und unterliegen somit der TA-Luft.

Tabelle 3: Tabellarische Darstellung der Rahmenbedingungen durch 1.- und 4. BImSchV und TA-Luft (Quelle: eigene Darstellung)

0-15 kW	15-100 kW		100 kW-1 MW			
§ 5 1. BImSchV in § 3 Abs. 1 Nr. 1-4 oder 5a genannte Brennstoffe (siehe Anhang)	§ 6 1. BImSchV § 3 Abs. 1 Nr.:1-3a Staub: 150 mg/m ³ bei 8% O ₂ § 3 Abs.1 Nr.: 4-5a oder 8 Staub: 150 mg/m ³ bei 13% O ₂		4. BImSchV diese Anlagen bedürfen einer Genehmigung nach § 10 des Bundes- Immissionsschutzgesetzes für diese ist die TA-Luft entscheidend bezogen auf 11% O ₂ im Abgas			
			Anlagengröße	Staub		
			> 1MW 20 mg/m ³ < 1MW 50 mg/m ³	0,25 g/m ³ Kohlenmonoxid dürfen nicht überschritten werden		
	Nennwärme- leistung in Kilowatt	Massenkonzentration in Kohlenmonoxid in Gramm je Kubikmeter (g/m³)	Anlagengröße	Stickstoffoxide		
	bis 50	4	> 1MW	0,40 g/m ³		
	>50-150	2	< 1MW	0,50 g/m ³		
	>150-500	1				
	>500	0,5				
	abweichend hiervon sind für die unter § 3 Abs.1 Nr.8 genannten Stoffe bis 100 KW Nennleistung eine Massenkonzentration von Kohlenmonoxid im Abgas von 4 g/m ³ bei 13 % O ₂ erlaubt § 3 Abs. 1 Nr. 6 oder 7 Staub 0,15 mg/m ³ bei 13 % O ₂		die entsprechenden Werte ergeben sich daraus für die Anlagen > 1MW			
	Nennwärme- leistung in Kilowatt	Massenkonzentration in Kohlenmonoxid in Gramm je Kubikmeter (g/m³)				
bis 100	0,8					
>100-150	0,5					
>150	0,3					
diese Brennstoffe dürfen nur in Kesseln ab 50 KW und in Holzverarbeitenden Betrieben verfeuert werden						

Anlagen über 50 MW fallen in den Bereich der 13. BImSchV. Für Kleinf Feuerungsanlagen, wie sie im Folgenden betrachtet werden sollen, sind somit die Bestimmungen nach der 1.BImSchV relevant (Anlage 1).

2.2.2 Richtlinien der TA-Luft und der Feuerungsverordnung

Die TA Luft gilt nicht für Kleinf Feuerungsanlage. Die Kleinf Feuerungsanlagen-Verordnung enthält Grenzwerte für CO. Es gibt aber z.B. keine Grenzwerte für Stickoxide, während sie bei Großanlagen, die unter die TA Luft fallen, durchaus vorhanden sind (Tabelle 3).

Zur Problematik des Heizens von Getreidekörnern bleibt festzuhalten, dass eine Genehmigung der Getreidefeuerungsanlagen über 100 kW Leistung möglich ist, da diese Anlagen eine spezifische Prüfung und Abnahme erhalten. Aus ökonomischen Gesichtspunkten ist dies jedoch nur bei einer geringen Anzahl von Anlagen sinnvoll, da die Prüfkosten die meisten Anlagen unter die Wirtschaftlichkeitsschwelle drücken.

Die in der Feuerungsverordnung des Landes Schleswig-Holstein festgelegten Rahmenbedingungen setzen für die Heizungsanlagen von festen Brennstoffen keine besonderen Maßnahmen voraus, außer dass Anlagen mit einer Leistung von über 50 kW in eigenen Heizungsräumen stehen müssen. Die gilt jedoch für die anderen Energieträger genauso. Für feste Brennstoffe ist eine maximal Lagermenge von 15 t pro Gebäude oder Brandabschnitt nicht zu überschreiten.

2.3 Ökonomische Rahmenbedingungen

2.3.1 Kosten der Energiebereitstellung

Die Kosten der Bereitstellung von Wärme aus fester Biomasse hängen entscheidend vom Energiegehalt der Biomasse und dem Wirkungsgrad des Kessels ab. Getreide hat einen Heizwert (H_u) von 4,2 kWh/kg, daraus ergibt sich bei einem Wirkungsgrad von 90% ein effektiver Heizwert von 3,8 kWh/kg.

Als Eckpreis für die Rentabilitätsberechnungen von Biomassekesseln wird in diesem Zusammenhang der Heizölpreis für leichtes Heizöl EL nach DIN41603-01 herangezogen. Heizöl EL hat einen Heizwert H_u von mindestens 42,6 MJ/kg und eine Dichte von 0,86l/kg. Daraus ergibt sich ein Verrechnungssatz Getreide zu Heizöl wie folgt:

1 kg Getreide ~ Heizwert H_u = 3,8 kWh/kg

1 l Heizöl EL ~ 0,86 kg Heizöl EL ~ (42,6 MJ/kg * 0,86 kg/l) ~ 36,6

MJ/l

1 kWh ~ 3,6 MJ

1 l Heizöl EL ~ 10,2 kWh

Diesen Wert von 10,2 kWh muss um den Wirkungsgrad bereinigt werden, der in Heizölkesseln bei ca. 95 % liegt. Daraus ergibt sich ein effektiver Heizwert von 9,69 kWh/l. Da die Marktpreise von Heizöl in ct/l und die Marktpreise von Getreide in €/dt angegeben werden, wird auf eine weitere Umrechnung in kg bzw. l verzichtet.

In der nachfolgenden Tabelle werden die direkten Abhängigkeiten in Bezug auf die verwertbare Energiemenge dargestellt. Bei Preisen unter 9 €/dt kann man von Futter- darüber von Brotgetreide ausgehen.

Tabelle 4: Äquivalenzpreise Heizöl zu Getreide (eigene Berechnungen)

Heizölpreis in ct/l	Äquivalenzpreis Getreide in Euro/dt
25	9,8
26	10,2
27	10,6
28	11,0
29	11,4
30	11,8
31	12,2
32	12,5
33	12,9
34	13,3
35	13,7
Umrechnungsfaktor	2,55

Die in Tabelle 4 dargestellten Preisrelationen beinhalten jedoch nicht die Mehrinvestitionen, die eine Festbrennstoffheizung im Vergleich zu einer Ölheizung nach sich zieht. Diese Mehrinvestitionen beruhen zum einen auf der Kesseltechnik und dem größeren Platzbedarf und zum anderen in dem höheren Wartungsaufwand. Zu berücksichtigen ist in diesem Fall, ob es sich bei der Vergleichsrechnung um einen kompletten Neubau der Anlage handelt, oder ob eine Altanlage erneuert werden soll. Es sollte das Umfeld, in dem die Anlage gebaut werden soll, z. B. ob im Gewerblichen Bereich, auf einem landwirtschaftlichen Betrieb oder im kommunalen Bereich betrachtet werden.

In der Anlage 3 befindet sich eine Modellrechnung nach KEYMER, die den erhöhten Wartungsaufwand und die Mehrinvestitionen berücksichtigt.

Es werden dort zwei Varianten einer Festbrennstoffheizung mit Strohpellets und Energiegetreide mit einer Standardölheizung und einer Ölheizung mit Brennwerttechnik verglichen. Zusätzlich wurden die Förderungen für Festbrennstoffkessel berücksichtigt.

Die Festbrennstoffkessel werden jeweils mit einer unterschiedlichen Ausstattung berechnet, für die Kessel werden Zuschüsse nach den „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien vom 26. November 2003“, erschienen im Bundesanzeiger Nr. 234, mit in die Kalkulation einbezogen. Für die Festbrennstoffkessel wird ein Zuschuss von 60 €/kW Leistung gewährt, bei einem Kesselwirkungsgrad von minimal 88 %. Liegt der Wirkungsgrad über 90 %, erfolgt eine Förderung mit 1.700 €, wenn die Kessel als Zentralheizung betrieben werden.

Bei einem Heizölpreis von 35 ct/l dürfte Energiegetreide 8 €/dt kosten, Strohpellets 10,70 €/dt, um wirtschaftlich zu sein (Anlage 3). Die kWh lässt sich mit Energiegetreide für 5,5 ct erzeugen, während sie bei Heizöl mit 5,6 ct beim Brennwertkessel und 5,7 ct beim Niedertemperaturkessel im gleichen Bereich liegt. Ein Unterschied von 0,2 ct/kWh beläuft sich bei einer Gesamtjahreserzeugung von 60.000 kWh auf 120 €/Jahr. Strohpellets sind bei einem Preis von 10,70 €/dt nicht wirtschaftlich darstellbar, da die höhere Energiedichte in den Strohpellets nicht den Mehrpreis gegenüber Energiegetreide kompensiert. Die kWh aus einem Kilogramm Energiegetreide kostet 2,05 Cent, während sie aus Strohpellets 2,43 Cent kostet. Dies macht das Verheizen von Strohpellets unrentabel, obwohl sie zurzeit zu den zugelassenen Brennstoffen gehören.

Die Ölheizung liegt zwischen 35 und 38% Festkostenbelastung an den Gesamtkosten pro kWh fast um 30% unter dem Wert der Festbrennstoffheizung, die zwischen 60 und 66 % liegt. Diese Tatsache spiegelt wieder, wie stark die Technik in diesem Fall die Kosten dominiert.

2.3.2 Bewertung der einzelnen Brennstoffe in ihrer technischen Handhabbarkeit

Die Heizkessel für Festbrennstoffe wurden in erster Linie auf den Brennstoff Holz ausgelegt. Das Holz kann als Stückholz, Hackschnitzel oder als Pellet vorliegen. Im skandinavischen Raum lassen die gesetzlichen Rahmenrichtlinien z.B. die Verbrennung von Getreide zu. Aus technischer Sicht lassen sich die Öfen mit allen schütffähigen, trockenen Energieträgern beheizen. Im Brennraum kann es durch die vermehrte Schlackebildung z.B. bei

Getreide oder Stroh (Anlage 2 Ascheerweichungsverhalten) zu einem Verstopfen des Brennraumes führen. Dies führt zwangsläufig zu einem schlechteren Ausbrand und schlechten Emissionswerten. Es wurden deshalb die Kühlung des Brennrosts sowie die mechanische Bewegung der Asche eingebaut. Die Verstopfungsgefahr des Brennraumes kann auch aus einem vermehrten Ascheanfall durch die Verbrennung von Strohpellets und Getreidekörnern herrühren. Bei der Entwicklung der Öfen sind diese auf den Brennstoff Holz ausgelegt. Der Ascheanfall bei Holz beträgt ca. 0,5-1% der Ausgangsmasse, während er bei Stroh und Getreidekörnern zwischen ca. 3-10% liegt. Um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten, muss für diese bestimmten Anwendungsbereiche eine Modifikation der Ascheaustragungstechnik auf die erhöhten Aschemengen vollzogen werden. Dies ist jedoch nur mit einem erhöhten Aufwand an Technik, z.B. einer Ascheaustragungsschnecke oder einem größer dimensionierten Aschebehälter möglich. Die meisten Hersteller von Biomassekesseln haben auf diese erhöhten Anforderungen reagiert und sind somit in der Lage, funktionsfähige Anlagen zum Betrieb mit diesen Brennstoffen zur Verfügung zu stellen. Ein weiteres Problem sind die erhöhten CI-Immissionen, die bei einer geringen Abgastemperatur zur Kondensation kommen, und für die Bildung von Salzsäure im Brennraum sorgen. Diese Salzsäure führt zu erhöhter Korrosion und damit zu einer kürzeren Lebensdauer der Kessel. Zur Lösung dieses Problems wurde der Einbau einer Rücklaufemperaturanhebung in den Wasserkreislauf des Kessels empfohlen, um auch im Teillastbetrieb, die Kesseltemperatur nicht unter die Kondensationstemperatur sinken zu lassen.

3 Ausgestaltung der Fragestellung und des Versuchs

Die in dem folgenden Kapitel beschriebenen Versuche sollen einen Einblick in den derzeitigen Stand der Technik geben und die Handhabbarkeit der einzelnen Kessel aufzeigen.

3.1 Beschreibung der drei Kessel

3.1.1 Passat- Kessel

Beim Kessel Compact C4 des Herstellers Passat handelt es sich um einen Magazinkessel, der nach dem Stokerprinzip funktioniert. Der Kessel hat eine Nennwärmeleistung von 42 kW mit Holzpellets und 36 kW mit Getreide. Der

Wassereinhalt des Kessels beträgt 110 Liter. Er hat eine Heizfläche von 4,0 m². Der maximale Betriebsüberdruck beträgt 2,5 bar, der Prüfdruck 4 bar.

Wie in Abbildung 6 zu sehen, ist der Kessel mit einem 0,4 m³ großen Magazin ausgerüstet. Der Kessel wird über eine Schubförderung, die mit einem Elektromotor betrieben wird, mit dem Brennmaterial beschickt. Ausgestattet mit einer Rostverlängerung im Brennraum, soll ein möglichst gleichmäßiger Ausbrand der Brennstoffe erfolgen. Die anfallende Asche wird über den Brennrost hinweg geschoben und in einem Sammelbehälter aufgefangen.

Die Zuführung von Brennstoffen erfolgt aus dem Magazin, das mit einer luftdicht verschlossenen Einfüllluke versehen ist. Der luftdichte Verschluss soll einen Rückbrand in den Magazinraum verhindern, aus diesem Grund ist die Einfüllluke mit einem Kontaktschalter versehen, der beim Öffnen das Gebläse abschaltet und die Zufuhr zum Brennraum mit eine Klappe verschließt, so dass ein Rückbrand ausgeschlossen wird. Des Weiteren ist der Kessel mit einem Temperaturfühler im Brennraum ausgestattet, der bei Erlöschen der Flamme den Kessel abschaltet. Sollte der Kessel über seine Maximalvorlauftemperatur von 90°C hinaus erhitzt werden, schaltet der Sicherheits-Temperaturbegrenzer den Kessel ab und unterbricht die Stromversorgung zum Kessel.

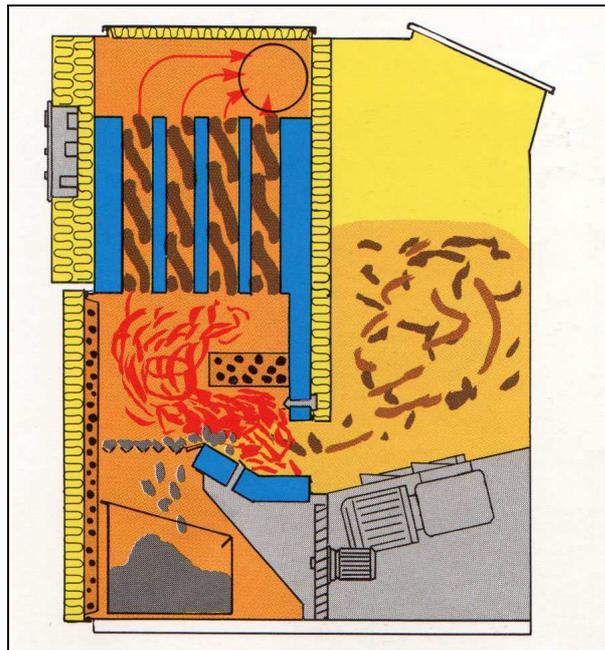


Abbildung 6: Schemazeichnung Passat C4 (Quelle: Passat)

Erst nach Abkühlung und Reset der Anlage kann diese wieder in Betrieb genommen werden. Der Kessel kann zusätzlich mit einer Lambda-Sonde

ausgestattet werden, die die Brennstoffzuführung in Abhängigkeit vom O₂-Gehalt der Rauchgase steuert. Der Versuchskessel war jedoch nicht mit dieser Zusatzausstattung ausgerüstet.

Das Rauchgas wird nach der Verbrennung der Brenngase über stehende Züge in den Schornstein abgeleitet.

Der Standort des Versuchskessels befindet sich auf dem Gelände der DEULA in Rendsburg in der sog. Starrrahmenhalle, Träger der Anlage ist die Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Land- und Umwelttechnik. Angeschlossen an den Kessel sind zwei Wärmetauscher, die es ermöglichen, die Wärme direkt in die Umgebung des Kessels anzugeben. An diesen Wärmetauschern ist eine Erfassung der abgegebenen Wärmemenge möglich. Somit kann dieser Versuchskessel unabhängig von Jahreszeit und Umgebungstemperatur betrieben werden.

3.1.2 Veto-Kessel

Der Kessel wurde von der Firma Ala Talkkari gebaut und der Landwirtschaftskammer S-H, Land- und Umwelttechnik im Rahmen der Baulehrschautagung am 20.02.04 zur Verfügung gestellt. Der Standort des Kessels befand sich in der gleichen Halle. Der Kessel besteht aus der Vorratsbehältereinheit mit angebauter Zuführungsschnecke und Brennkopf und der eigentlichen Kesseleinheit, die mit einer Ascheaustragsschnecke ausgerüstet war (vgl. Abb. 7). Der Kessel hatte eine Nennleistung von 43 kW und einen Wasserinhalt von 290 Litern. Die maximale Betriebstemperatur betrug 100°C, der Vorratsbehälter hatte ein Fassungsvermögen von ca. 2 m³ und war damit recht groß dimensioniert. Die Wärmeabgabe wurde über zwei Wärmetauscher geregelt und in die Umgebung abgegeben. Eine Messung der Wärmemenge war hier nicht möglich. Die Brennstoffzuführung erfolgte über eine Schnecke direkt aus dem Vorratsbehälter in den Brennkopf. Die Windungen der Zuführungsschnecke waren so angelegt, dass der Windungswinkel mit zunehmender Nähe zum Brennkopf immer enger wird und damit eine Verdichtung des Brennstoffes erfolgt. Als Folge kann keine Fremdluft im Brenngut mit in den Brennraum gelangen, so dass die Luftzuführung vereinfacht wird. Als Gebläse dient ein Radialgebläse, das über der Zuführungsschnecke kurz vor dem Brennkopf angeordnet ist, und über das die Primärluft in den Brennkopf und die Sekundärluft zur Verbrennung der Brenngase eingetragen wird (Stokkerprinzip). Die Anordnung des Kessels zum Brennkopf ist beliebig zu gestalten, d.h. der Kessel kann jedem Heizungsraum angepasst werden. In der Versuchsausführung wurde der Brennkopf seitlich in den Kessel eingeführt und war mit einer kurzen Eintragungsschnecke versehen.

Die Steuerung des Kessels wird eine Lambda-Sonde geregelt, so dass der Kessel von Seiten der Steuerung her einfach zu bedienen war. Die Brennstoffmenge konnte über die Zuführungsschnecke individuell variiert werden und war damit auf den jeweiligen Brennstoff gut einzustellen. Für die variierenden Brennstoffe standen in der Bedienungseinheit jeweils voreingestellte Parameter zur Verfügung, die dann jeweils auf die Brennstoffe abgestimmt werden konnten. Das Rauchgas wird nach Verbrennung der Brenngase über liegende Züge aus dem Brennraum abgeleitet.

An den Kessel war zusätzlich ein Filtermodul montiert, in das ein Aluminiumfiltereinsatz eingebaut werden kann. Mit diesem Filtereinsatz sollen vorrangig Staubemissionen auf das Niveau der zulässigen Grenzwerte gesenkt werden.

Für den Zeitraum der Versuche stand der Vertriebsleiter von Alka Talkari für den Norddeutschen Raum für die jeweiligen Einstellungen und Wartungsarbeiten zur Verfügung.

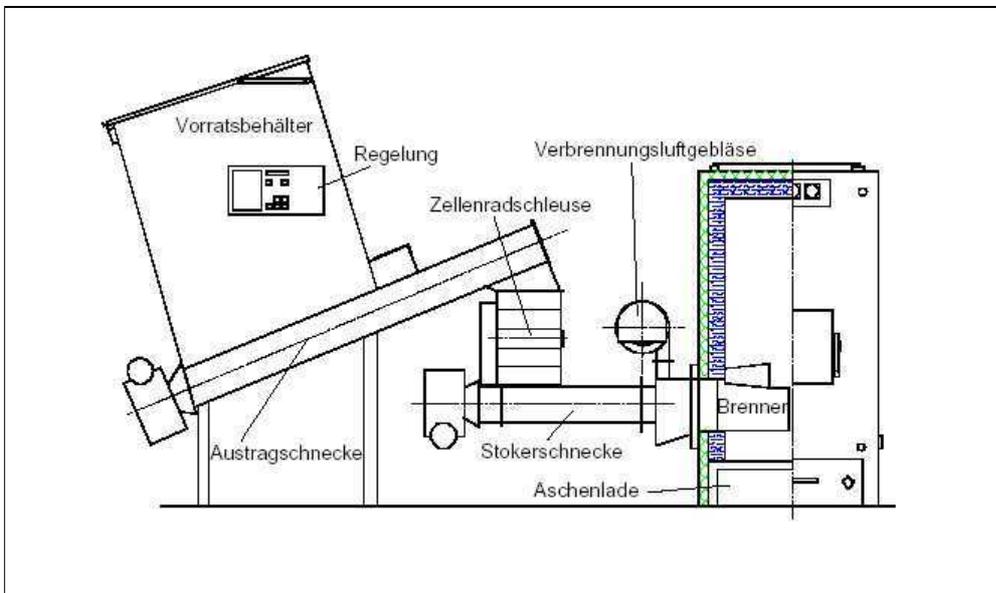


Abbildung 7: Schemazeichnung Veto Kessel

3.1.3 Reka-Kessel

Der Kessel der dänischen Firma Reka war in eine Zentralheizung beim Vertriebsleiter für den Norddeutschen Raum auf dessen Resthof eingebaut. Er dient dort als Demonstrationskessel für die Firma Bio-Energietechnik Nord in Ellingstedt. Der Kessel ist in zwei Räumen eingebaut. Der eine Raum umfasst

den eigentlichen Heizungsraum mit Schornsteinanschluss und der Steuereinheit, während der andere Raum den Vorratsbehälter sowie die Apparaturen für die Zentralheizung umfasst. Der Vorratsbehälter kann über ein darüber liegendes Silo mit schütffähigen Gütern befüllt werden. Der Kessel ist mit einem mechanisch bewegten Schubrost ausgerüstet, das dem Anhaften von Schlacke vorbeugen soll. Die Beschickung des Brennraumes erfolgt von hinten durch die Zuführungsschnecke, die direkt im Brennraum endet. Die anfallende Asche wird durch die Schubroste nach vorne aus dem Brennraum ausgetragen und in einer Ascheschublade gesammelt. Die Rauchgase werden nach Verbrennung der Brenngase über liegende Züge in den Schornstein abgeleitet. Vor dem Eintritt in den Schornstein war ein Abgasgebläse installiert, das den Naturzug des Schornsteins unterstützen und für den nötigen Unterdruck im Kessel sorgen sollte, so dass der Rückstau von Rauchgasen unterbunden wird.

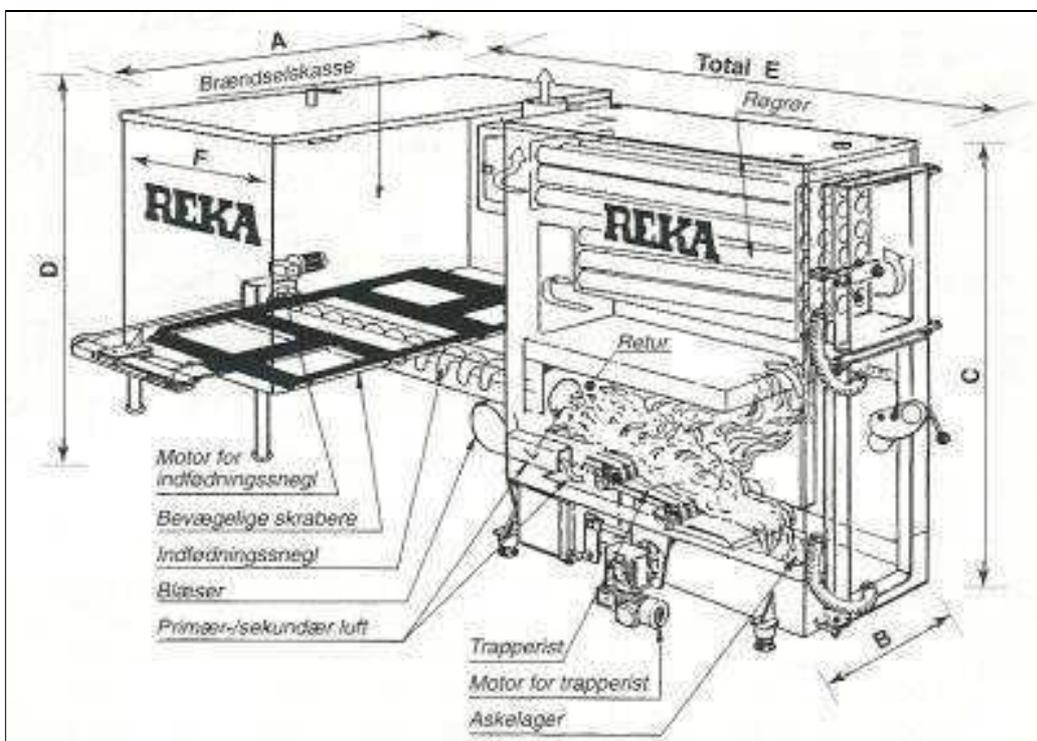


Abbildung 8: Schemazeichnung Reka (Quelle. www.reka.com, 2004)

3.2 Beschreibung und Durchführung des Versuches

3.2.1 Versuchsbeschreibung

Angelegt wurde, in Absprache mit der Landwirtschaftskammer S-H, Land- und Umwelttechnik in Rendsburg, eine Versuchsreihe zum Brennverhalten von festen Biobrennstoffen. Es sollten an drei Biomassekesseln sieben verschiedene Brennstoffe verbrannt werden und während der Verbrennung die Emissionen an Abgasen und das Abbrandverhalten sowie das Verhalten der Asche betrachtet werden. Die Versuche wurden in handelsüblichen Kesseln durchgeführt, die ohne besondere Modifikationen für den Abbrand von fester Biomasse laut Herstellerangaben geeignet sein sollten.

Als Brennstoffe sollten drei Partien mit Getreide verbrannt werden, dazu gehören eine Partie Gerste schlechter Qualität, die teilweise mit Kornkäfern befallen und schon etwas Auswuchsgetreide zeigte; eine Partie Weizen, die ebenfalls für Nahrungszwecke ungeeignet deklariert war und einer Partie Roggen, die von einem Züchter zur Verfügung gestellt wurde, da für diese Restmenge am Markt kein Absatz möglich war. Des Weiteren wurden drei Brennstoffe in pelletierter Form verheizt. Zum einen wurden 8 mm Strohpellets aus Winterweizenstroh verheizt, die in Niedersachsen neben der Verwendung als Brennstoff als Einstreu verkauft wurden. Die Festigkeit und das Abriebverhalten der Strohpellets waren als gut zu bezeichnen. Die zweite Form von Pellets waren Getreidenachproduktpellets (GNP), die von der Team AG in Süderbrarup aus Siebabfällen hergestellt worden sind. Die Pellets hatten ebenfalls einen Durchmesser von 8mm, konnten jedoch vom Abrieb und der Qualität als schlecht eingestuft werden. In der dritten Variante wurden Holzpellets der Firma Rundt verheizt, welche der österreichischen Qualitätsnorm für Holzpellets und der DIN 51731 entsprachen. Die Abriebsfestigkeit sowie die Festigkeit waren innerhalb der Vergleichsgruppe am höchsten und damit waren die Holzpellets der am einfachsten handhabbare Brennstoff. Es sollten innerhalb der Versuchsreihe die Holzpellets zusammen mit dem siebten Brennstoff, den Holz hackschnitzeln, als Nullvariante dienen. Die beiden Holzbrennstoffe haben den Vorteil, dass sie innerhalb der Bestimmungen der BImSchV zusammen mit Stroh als zugelassener Brennstoff aufgeführt sind (Anlage 1). Die Holz hackschnitzeln wurden vom Maschinenring Husum-Eiderstedt zur Verfügung gestellt.

Innerhalb der Versuche sollte einmal generell das Ausbrandverhalten und die Handhabung der Brennstoffe betrachtet werden. Des Weiteren wurde das Abbrandverhalten im Hinblick auf die Immissionswerte betrachtet und es wurden parallel während der Versuche Immissionsmessungen mit einem rbr-Abgasanalysegerät durchgeführt.

Der Abgasanalysecomputer der Firma Ecom ist mit verschiedenen Modulen zur Abgasanalyse ausgerüstet. Zu der Ausstattung gehören ein O₂-, CO₂-, NO-, NO_x-, sowie ein NO₂-Sensor. Die Sauerstoff- bzw. Kohlendioxid-Messwerte werden in Relativ-Prozenten zueinander angegeben, bezogen auf 21 % O₂. Die Angabe der NO-, NO_x-, NO₂, sowie der CO- Wert erfolgte in mg/m³ Abgas. Als weiteren Bezugswert wird der Wirkungsgrad Eta, errechnet aus den Kohlendioxid-Immissionen ausgewiesen. Es werden zusätzlich noch drei weitere Parameter angegeben, dazu gehören die Raumtemperatur, die Abgastemperatur und der Luftüberschusswert Lambda. Die genaue Angabe zum Messbereich und dem Nachweisverfahren sind Anlage 4 zu entnehmen. Das Messgerät hatte zusätzlich zum eingebauten Thermopapierdrucker eine serielle Schnittstelle, durch die eine „online“ Datenerfassung der einzelnen Messmodule möglich war. Die Daten wurden direkt auf einen angeschlossenen Laptop übertragen und standen zur Speicherung und weiter Verarbeitung zur Verfügung.

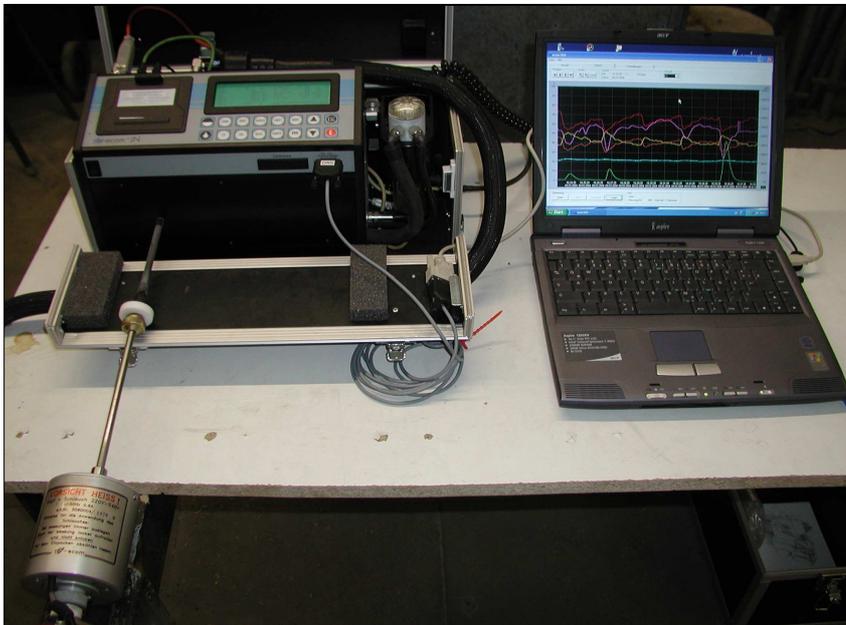


Abbildung 9: Analysecomputer mit Laptop und Messsonde

Das Programm zur Datenverarbeitung war in der Lage, die Daten so aufzubereiten, dass sie mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen, wie z.B. Excel, bearbeitet werden konnten. Technische Schwierigkeiten führten dazu, dass Holzhackschnitzel nicht im Passat-Kessel verfeuert wurden.

Der Passat C4-Kessel hat auf Grund seiner Bauart extreme Schwierigkeiten, größere Holzhackschnitzel zu verbrennen. Es kommt dort zu Verstopfungen bei

der Befüllung des Brennraumes, dies war durch vorherige Versuchsreihen bekannt.

Um die Immissionswerte bezüglich des Parameters Staub zu ermitteln, wurde mit dem zuständigen Bezirksschornsteinfegermeister für jeden Kessel und jede Brennstoffvariante mindestens eine Feststoffmessung durchgeführt. Der Schornsteinfeger ermittelt bei seinen Messungen über die Messsonde im Schornstein die Staubbelastung. Die dabei als Probe gezogene Luft wird in einem Balg gesammelt, aus dem dann die Probe gezogen wird. Auf diese Weise wird ein technischer Mittelwert ermittelt.

Der Schornsteinfeger orientiert sich nicht an die Minimum- und Maximum-Werte, am Mittelwert.

Die Messung mit dem Analysecomputer wurde in Anlehnung an die Messauflagen des Schornsteinfegers mindestens über einen Zeitraum von 15 Minuten durchgeführt. Als Messintervall wurden Sekunden gewählt, um einen möglichst großen Effekt aus eventuellen Veränderungen im Brennraum zu erhalten. Über den Thermodrucker des Gerätes wurden zu Beginn jeder Messung, nach ca. 7,5 Minuten und am Ende Einzelmessungen durchgeführt. Diese Messungen stellen Punktbetrachtungen dar, die einen breiteren Datenstamm aufzeigen. Der dadurch ermittelte Betrachtungszeitraum kann im Zuge der Auswertungen graphisch aufbereitet werden, um die entsprechenden Veränderungen abbilden zu können. Für den Vergleich der Grenzwerte wurde das arithmetische Mittel gebildet, um die Messungen mit denen des Schornsteinfegers zu vergleichen.

Während der Messungen wurden alle vorhandenen Parameter mit dem Laptop aufgezeichnet und jeweils ausgewertet.

3.2.2 Versuchsdurchführung

3.2.2.1 Verbrennung von Holzpellets

Die Holzpellets sind in der 1.BImSchV im §3, Absatz 5a (Anlage 1) als genormter Brennstoff nach DIN 51731 aufgeführt. Von besonderem Interesse sind in diesem Zusammenhang die Kohlenmonoxid-Emissionen zu bewerten, die in der Leistungsklasse bis 50 kW laut 1.BImSchV eine Massenkonzentration von 4000mg/m^3 nicht überschreiten sollten. Die Messungen sind in Anlehnung an die Anlage III der 1. BImSchV über einen Zeitraum von mindestens 15 Minuten durchgeführt worden. Der Verlauf der Kohlenmonoxid-Immissionen ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

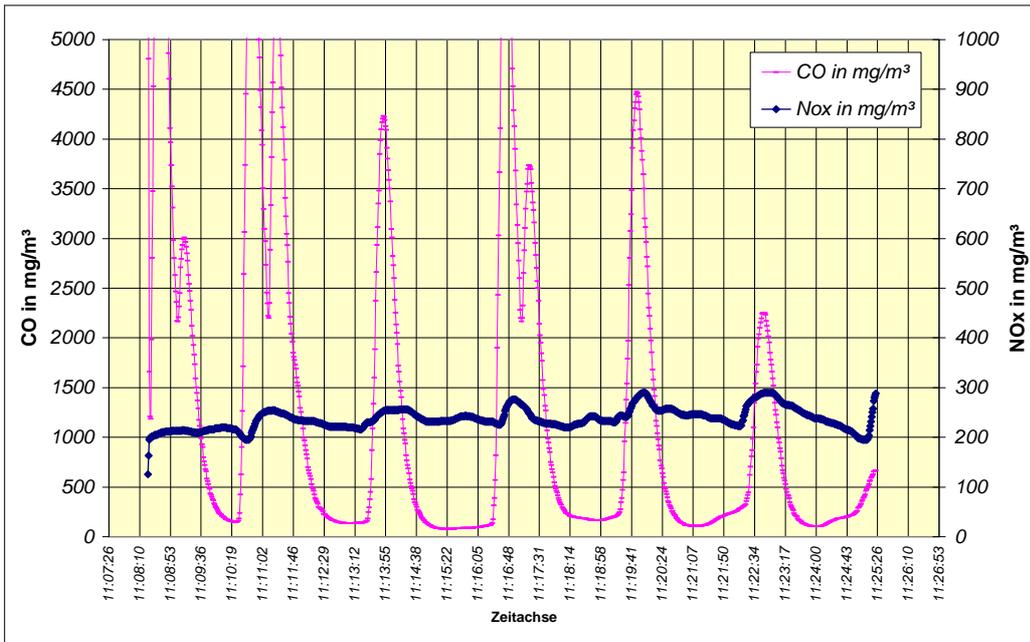


Abbildung 10: CO und NO_x Emissionen Holzpellets Passat C4

Der Verlauf der Kurven erzeugt ein für den Passat-Kessel charakteristisches Bild, es entsteht jeweils ein Peak, wenn die Schubstangenförderung neues Brennmaterial in den Brennraum fördert. An diesem Punkt bricht die Verbrennung im Brennraum zusammen und der Kessel verbrennt kurzzeitig unter Sauerstoffmangel, dies führt zu einem Anstieg der CO- Emissionen. Der Durchschnittswert der CO-Emissionen liegt in dieser Messreihe bei 1.346 mg/m³ CO im Abgas und somit unter dem Grenzwert von 4.000 mg/m³. Die Standardabweichung der CO-Messreihe beträgt 1833. Daran zeigt sich, wie stark die Verbrennung durch die Zufuhr von Brennmaterial beeinflusst wird. Die Staubbelastung, gemessen durch den Bezirksschornsteinfegermeister, lag bei den Holzpellets bei 0,28g/m³ im Rauchgas (Anlage 5). Während der Messung des Schornsteinfegers lagen die CO-Werte zudem weit über dem Grenzwert. Es kann in diesem Fall nicht von einer optimalen Einstellung für Holzpellets gesprochen werden.

Die Messreihe, die mit dem Ecom-Messgerät durchgeführt wurde und die Messreihe des Schornsteinfegers lagen etwas Zeit versetzt, aber die Bedingungen im Umfeld waren für beide Messreihen identisch, wie z.B. Luftfeuchtigkeit, Wind, Luftdruck. Die Verbrennung war optisch in Ordnung, es war jedoch zu beobachten, dass die Wärmeentwicklung im Vergleich zu den anderen Brennstoffen immens war. Dies wird durch die Abgastemperatur von 260°C bestätigt. Die hohen CO-Werte lassen auf eine schlechte Ausbeute bei der Oxidation der Brenngase schließen. Es wird der Verbrennung im Brennraum zu wenig Sekundärluft für die entsprechende Brennstoffmenge

zugeführt. Da dies Problem jedoch in einem engen Zusammenhang mit der Zufuhr von Brennmaterial steht, wird das Problem wahrscheinlich durch die Zufuhr von kleineren Brennstoffmengen in kürzeren Abständen zu lösen sein. Die Einstellung des Kessels über das Bedienterminal machte die Förderung kleinerer Mengen jedoch nicht möglich. Die NO_x-Emissionen sind durch die 1.BImSchV nicht geregelt. Da bei den dort in dem § 3 genannten Brennstoffen keine NO_x Emissionen zu erwarten sind, ist auch kein Grenzwert vorgesehen. In Anlehnung an die TA-Luft, die für Großanlagen einen Grenzwert vorsieht, wird jedoch dieser Grenzwert von 500 mg/m³ als Vergleichswert zur Einstufung der Kleinanlagen genutzt. Der Mittelwert beim Passat C4 betrug 237 mg Nox/m³ Abgas. Damit lag der Kessel in den Messungen unter dem Grenzwert von 500 mg/m³.

Abschließend lässt sich für den Kessel sagen, dass er die Grenzwerte für die Staub-Emissionen nicht einhalten kann, die Grenzwerte bei den NO_x-Emissionen jedoch einhält. Die CO-Emissionen können teilweise eingehalten werden. Der Ascheanfall war für Holzpellets, wie erwartet, gering, es kam kaum zu Schlackebildung und der Brennvorgang wurde entsprechend wenig durch die Aschebildung beeinflusst.

Im Veto-Kessel zeigten die Holzpellets einen anderen Brennverlauf, die Peaks beim Nachfüllen mit Brennstoff sind im Vergleich zum Passat-Kessel nicht sehr stark ausgeprägt, dass lässt auf einen stabileren Brennvorgang im Veto-Kessel schließen.

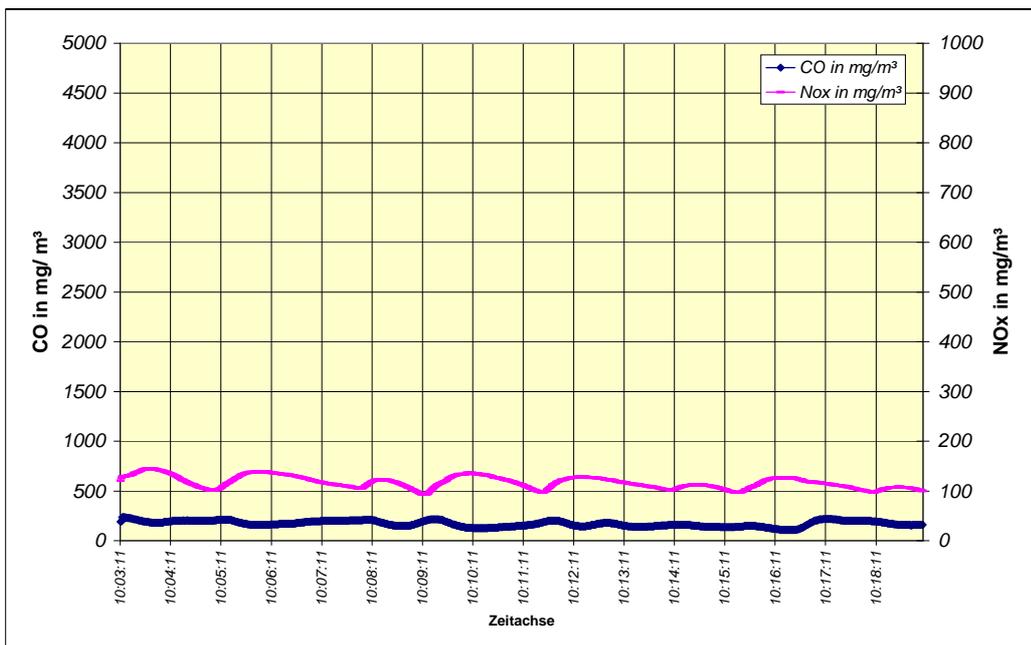


Abbildung 11: CO- und NO_x Emissionen Holzpellets Veto Kessel

Die Verbrennung läuft insgesamt unter einem geringeren Ausstoß an CO ab, d.h. es wird der Verbrennung angepasst die benötigte Brennstoffmenge zugeführt. Der Durchschnittswert der 15-minütigen Messreihe lag bei 171 mg/m³ CO und somit unter dem Grenzwert von 4.000mg/m³. Die Staubemissionen lagen bei 140 mg/m³ Abgas und damit unter dem Grenzwert von 150mg/m³. Die NO_x-Emissionen haben einen Durchschnittswert von 117 mg NO_x/m³ und bedeuten ebenfalls eine Einhaltung der Grenzwerte. Die Standardabweichung der Messreihe für CO beträgt zudem nur 28,6 und ist somit um ein Vielfaches geringer als die des Passat-Kessel. Diese Anzahl an Parametern lässt darauf schließen, dass die Verbrennung im Veto-Kessel stabiler als im Passat-Kessel verläuft. Dies ist unter anderem auf die Ausstattung des Kessels mit einer Lamda-Steuerung zurückzuführen. Der Ascheanfall war hier ebenfalls gering im Vergleich zu den anderen Brennstoffen. Der Brennkopf wurde durch die Aschebildung überhaupt nicht beeinflusst, so dass von einer störungsfreien Verbrennung gesprochen werden kann.

Der Reka-Kessel hat trotz des ähnlichen Verbrennungsprinzips schlechtere Emissionswerte als der Veto-Kessel. Der Durchschnittswert für CO des Reka-Kessels lag bei 933 mg/m³ und damit unter dem Grenzwert. In der Messung des Schornsteinfegers ergab sich ein Mittelwert aus der 15-minütigen Messung von 500 mg/m³, damit lag der Kessel im Normbereich. Die Differenz ist demnach entweder dem Messverfahren zuzuschreiben, oder die Bedingungen im Brennraum während der Schornsteinfegermessung waren günstiger.

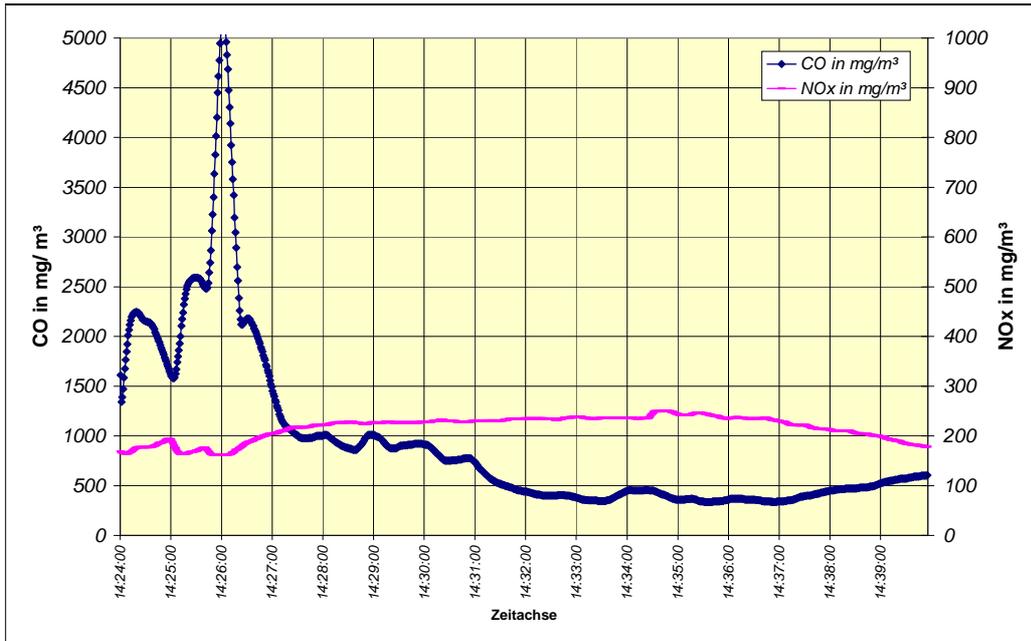


Abbildung 12: CO und NOx Emissionen Holzpellets Reka-Kessel

Die NOx-Emissionen lagen beim Reka-Kessel in der 15-minütigen Messung bei einem Mittelwert von 216 mg/m³ Abgas im Normbereich. Die Staubemissionen hatten einen Wert von 100 mg/m³ Abgas und waren somit tolerabel. Über den Zeitraum der Messung mit dem Ecom-Messgerät fielen die Abgastemperaturwerte um ca. 100°C ab, dies war durch ein Abregeln der Kesselsteuerung hervorgerufen worden, da die Vorlauftemperatur den Grenzwert überschritten hatte. Somit ist diese Messung nur bedingt aussagefähig. Der Ascheanfall war, wie bereits bei den anderen beiden Kesseln beobachtet, entsprechend gering. Es kam zu keinen durch den Ascheanfall bedingten Störungen der Verbrennung.

3.2.2.2 Verbrennung von Holz hackschnitzeln

Holz hackschnitzeln (HHS) wurden im Passat-Kessel nicht verbrannt, da die Technik der Brennstoffzuführung für HHS nicht geeignet ist.

Im Veto-Kessel konnten die HHS ohne Probleme verheizt werden. Die Windungen der Zuführungsschnecke waren entsprechend groß dimensioniert, so dass selbst die größeren Teile der HHS gut in den Brennraum transportiert werden konnten. Das Emissionsverhalten der HHS im Veto lässt auf einen stabilen Verbrennungsvorgang im Brennraum schließen. Der Mittelwert der

Messreihe betrug 405 mg/m^3 CO und lag somit unter dem Grenzwert. Der Mittelwert der Schornsteinfeger-Messung erreichte 50 mg bzw. 90 mg , also unter dem Grenzwert. Der Mittelwert der NOx Emissionen liegt bei 233 mg und somit unter dem Grenzwert der TA Luft. Bei der Staubmessung gab es hier eine Besonderheit. Es wurden zwei Staubmessungen durchgeführt, die erste ohne einen speziellen Filtereinsatz die zweite mit diesem Filtereinsatz. Es wurde ohne Filtereinsatz eine Staubbelastung von 170 mg/m^3 Abgas gemessen, also über dem Grenzwert von 150 mg/m^3 . Die zweite Messung wurde mit diesem Aluminiumfilter durchgeführt und die Staubbelastung wurde auf 100 mg/m^3 verringert. Damit lag diese Messung unter dem Grenzwert.

Laut Angaben des Herstellers wurde für diesen Filtereinsatz gezielt der Werkstoff Aluminium eingesetzt, da man sich durch die Oberflächenstruktur von Aluminium ein Anhaften der Staubteilchen erhofft.

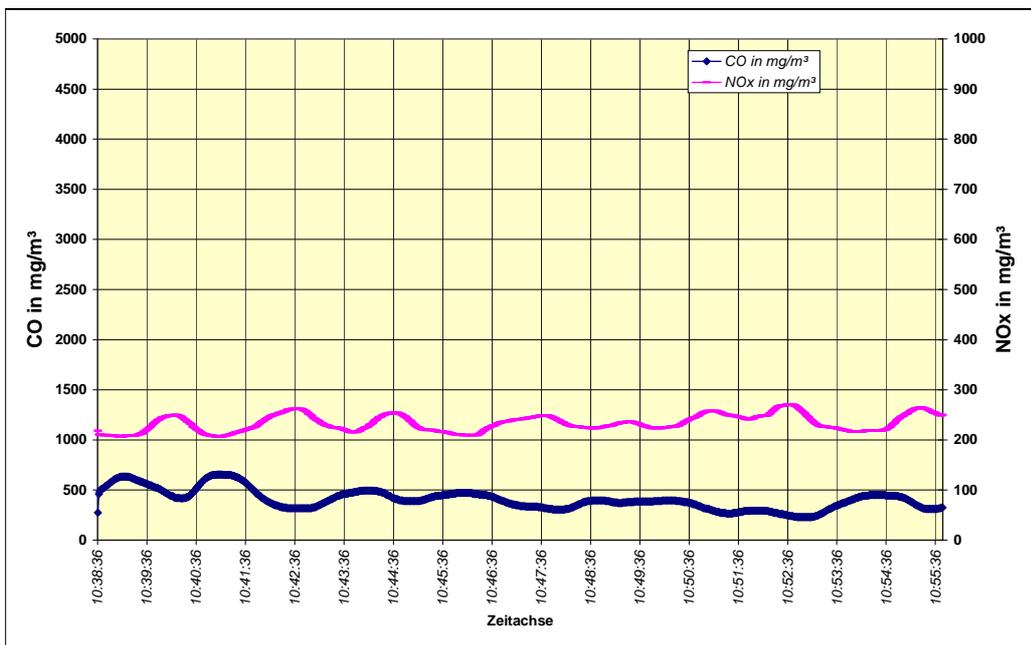


Abbildung 13: CO und NOx Messung HHS Veto-Kessel

Der Ascheanfall bei den Holzhackschnitzel war im Vergleich zu den Holzpellets ein wenig höher, es wurden im Verlauf des Brennvorgangs sichtbar Aschereste über den Brennkopf hinaus in den Ascheraum geschoben, dies war bei den Holzpellets nicht der Fall, so dass von einem optisch erkennbar höherem Ascheanfall gesprochen werden kann. Der erhöhte Ascheanfall lässt sich aus der Zusammensetzung der Holzhackschnitzel ableiten, die einen höheren Rindenanteil als Holzpellets aufweisen. Zudem können beim Hacken Erdanteile mit in die Hackschnitzel gelangen und so zu einem höheren Anteil an

mineralischen Bestandteilen führen. Dies führte jedoch zu keiner sichtbaren Verschlechterung des Brennvorgangs, so dass der Ascheanfall hier nicht als problematisch einzustufen ist.

Der Reka-Kessel ließ sich ohne größere Schwierigkeiten mit Holzhackschnitzeln betreiben, er war von der Befüllungstechnik in der Lage, auch größere Holzstücke mit in den Brennraum zu befördern. Das Brennbild war optisch in Ordnung, bei der Messung mit dem Ecom-Messgerät zeigte sich jedoch ein unruhiges Bild im Bereich der Abgase. Die CO-Emissionen lagen auf einem Niveau, das unter dem Grenzwert lag, der Mittelwert befand sich bei 1.223 mg/m³ Abgas. Die NO_x-Emissionen lagen bei einem Mittelwert von 124 mg/m³ Abgas unter dem Grenzwert der TA-Luft.

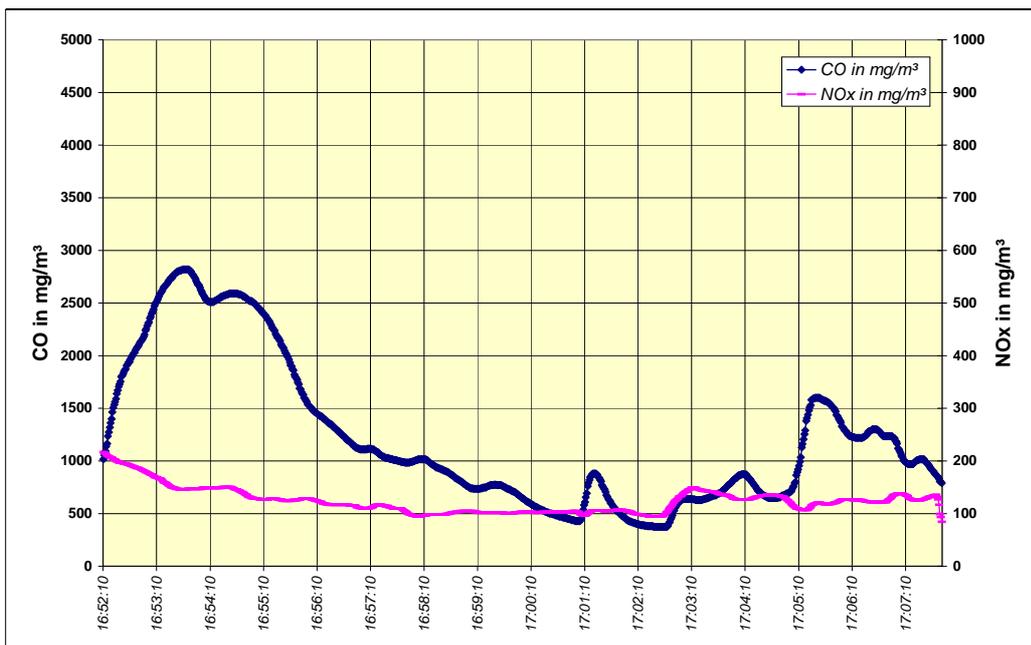


Abbildung 14: CO:- und NO_x-Messung HHS Reka-Kessel

Betrachtet man den Verlauf der Emissionsmessungen, so wird deutlich wie stark die Messreihe streut. Der Minimum-Wert liegt bei 375 mg/m³ CO und der Maximum-Wert bei 2820 mg/m³ CO.

Die Messungen des Schornsteinfegers ergeben hier ein ähnliches Bild: für Holzhackschnitzel ein CO-Wert von 2.000 mg/m³ sowie ein Staubgehalt von 60 mg/m³. Der Ascheanfall war im Bereich des Brennrostes gering, jedoch optisch höher als bei Holzpellets. Es kam jedoch zu keinen durch den Ascheanfall bedingten Störungen des Brennvorganges.

3.2.2.3 Verbrennung von Gerste

Gerste ließ sich in dem Passat-Kessel ohne Umbaumaßnahmen verbrennen. Der Brennstoff ließ sich im Gegensatz zu holz- oder strohähnlichen Brennstoffen allerdings nur schwer entzünden, so dass zum Anfeuern auf Holzpellets zurückgegriffen werden musste. War die Brennraumtemperatur ausreichend hoch, so konnte ohne Probleme die Gerste verfeuert werden. Das Brennbild der Gerste zeigte ein rot-glühendes Glutbett, das sich gleichmäßig über den gesamten Brennraum des Passat-Kessels erstreckte. War zu Beginn die Brennraumtemperatur zu niedrig, so konnte es zu Betriebsstörungen durch unverbranntes Brennmaterial kommen, das sich über die Primärluftöffnungen schob und somit die Verbrennung unterband. Diese Probleme ergaben sich allerdings nur zu Beginn, im Dauerbetrieb über mehrere Tage verlief die Verbrennung störungsfrei.

Die CO-Emissionen lagen mit einem Mittelwert von 273 mg/m^3 im Normbereich, die NO_x-Emissionen hatten einen Mittelwert von 451 mg/m^3 . Die Staubmessung des Schornsteinfegers kam zu einem unterschiedlichen Ergebnis. Die erste Messung hatte einen Staubwert von 170 mg/m^3 Abgas, die zweite von 90 mg/m^3 . Für diese Versuchsreihe kann als Ergebnis festgehalten werden, dass es möglich ist, den Staubgrenzwert mit dem Passat-Kessel und dem Brennstoff Gerste einzuhalten.

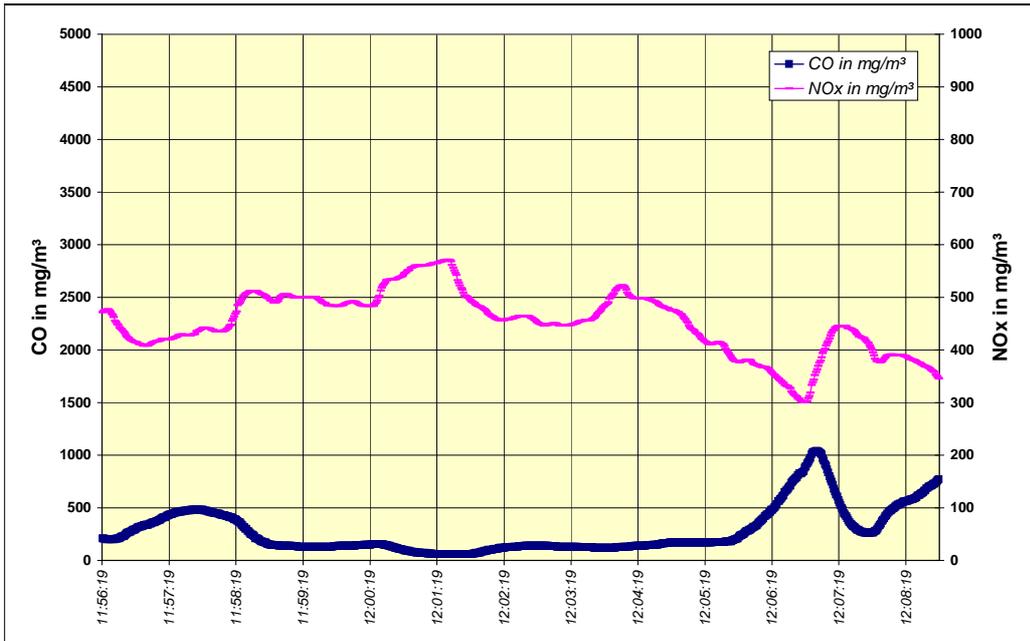


Abbildung 15: CO und NO_x-Emissionen Gerste Passat-Kessel

Der Verlauf der CO-Emissionen zeigt einen recht unruhigen Verlauf, es kam während der Messung zu mehreren Überschreitungen des Grenzwertes, die darauf schließen lassen, dass die Zufuhr von Verbrennungsluft durch die Gerste gestört worden ist. Da die Gerste eine dichtere Struktur als z.B. die Holzpellets hat, ist das Brennmaterial schwerer mit Luft zu durchströmen. Dies führt in der Messreihe zu höheren CO-Emissionen durch eine unvollständige Verbrennung. Dies hängt mit der technischen Ausstattung des Kessels zusammen. Sobald die Schubstangenförderung neues Brennmaterial in den Brennraum fördert, kommt es zu einem Mangel an Verbrennungsluft, was zu einem kurzzeitigen Zusammenbruch der Verbrennung führt. Dies ist hier nicht besonders stark ausgeprägt, es wird aber durch die zwei Peaks im Verlauf der CO-Kurve sichtbar.

Desweiteren kam es im Verlauf der Messreihe auch zu starkem Anstieg der NO_x-Emissionen, so dass der Grenzwert der TA-Luft zeitweise überschritten worden ist. Im Durchschnitt lagen die Werte jedoch wie oben beschrieben unter dem Grenzwert von 500 mg/m³. Im Brennraum des Kessels kam es bei der Verbrennung von Gerste zu Schlackebildung auf dem Brennrost, die sich in ungünstigen Fällen auf die Primärluftöffnungen legte und die Verbrennung störte. Die Struktur der Asche wies noch die Körnerstruktur des Ausgangsmaterials auf.

Der Veto-Kessel zeigte bei der Verbrennung von Gerste ein recht gleichmäßiges Flambild. Die Beschickung des Kessels mit Gerste war unproblematisch, da die Gerste recht ähnliche Flieseigenschaften wie Holzpellets aufweist. Bei der Verbrennung zeigte sich ein sauberes Flambild, das auf einen guten Ausbrand der Gerstenkörner schließen ließ. Die Einstellung bezüglich der Primär- und Sekundärluft war unproblematisch. Der Mittelwert der Messreihe lag mit 393 mg/m^3 deutlich unter dem Grenzwert von 4.000 mg/m^3 . Der Verlauf der NO_x -Emissionen war ebenfalls durch zahlreiche Peaks gekennzeichnet, die, wie auch die CO -Werte vom Eintrag des Brennmaterials abhingen. Insgesamt wurde auch hier der Grenzwert der TA-Luft von 500 mg/m^3 mit einem Mittelwert von 441 mg/m^3 unterschritten. Die Staubemissionen lagen mit einem Wert von 260 mg/m^3 über dem zulässigen Grenzwert. Bei den CO -Emissionen wurde auch bei der Messung des Schornsteinfegers der Grenzwert eingehalten. Der Ascheanfall im Veto-Kessel war ebenfalls unproblematisch

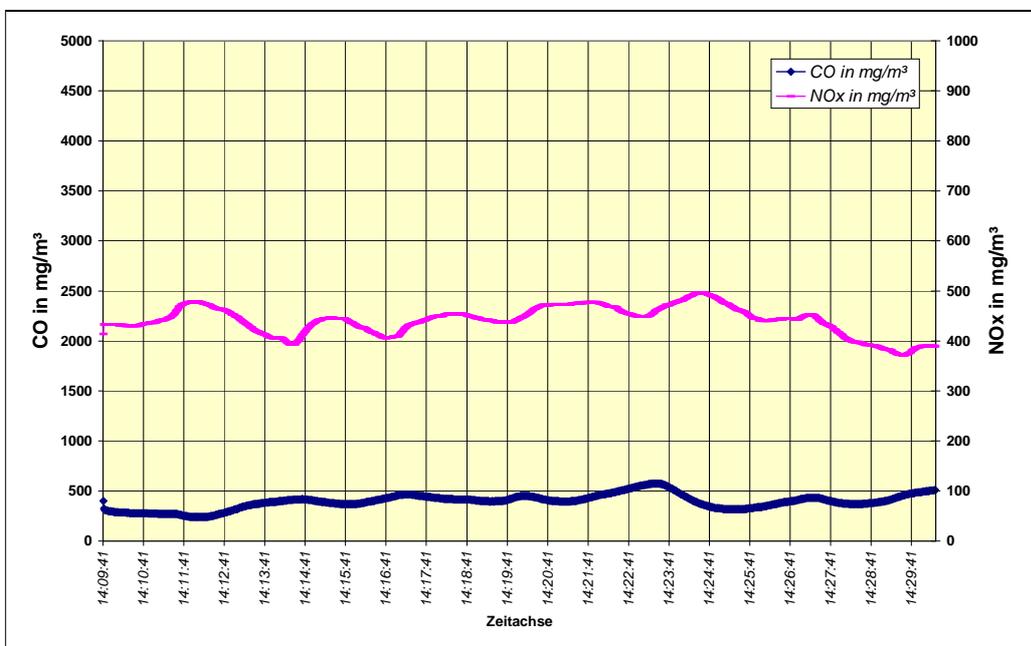


Abbildung 16: CO und NO_x Emissionen Gerste Veto-Kessel

Der Reka-Kessel zeigte im Verlauf der Verbrennung von Gerste ein schlechteres Ausbrandverhalten. Die Beschickung des Kessels war mit Gerste problemlos möglich. Es kam jedoch bei der Verbrennung der Gerste zu einem Überangebot an Brennmaterial, so dass in dem Kessel die Gerste mit Luftunterschuss verbrannte. Bedingt durch dieses Problem ist der Mittelwert

der Messung nicht als repräsentativ anzusehen. Er liegt bei 1.521 mg/m³ CO und für NO_x bei 278 mg/m³. Der CO und der NO_x-Wert liegen damit noch unter dem Grenzwert.

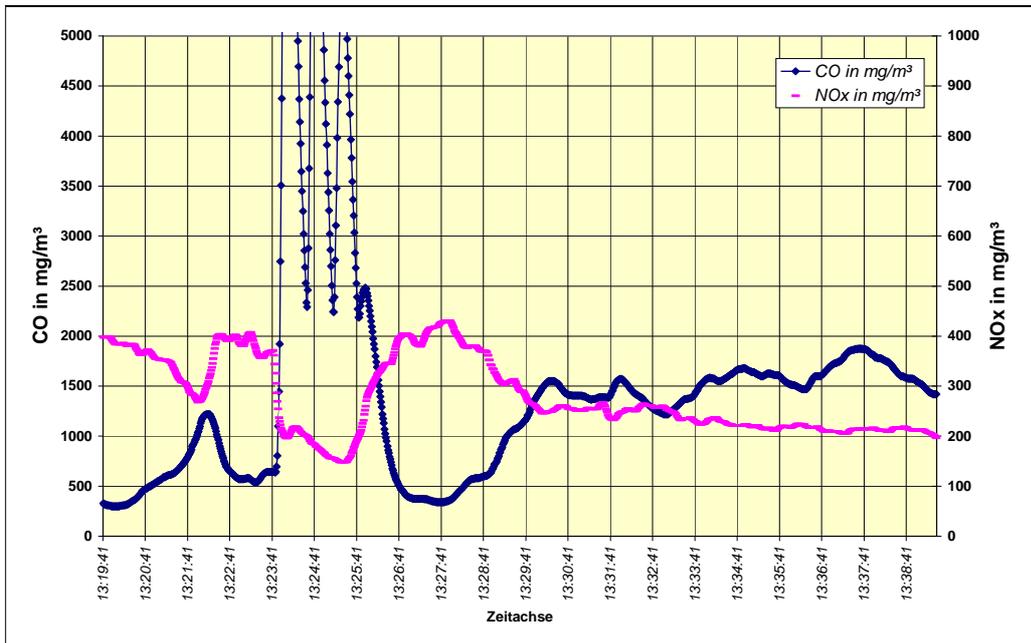


Abbildung 17: CO- und NO_x-Emissionen Gerste Reka-Kessel

Die Messung des Schornsteinfegers ergab für den CO-Wert andere Ergebnisse. Es wurden dort 3.000 mg/m³ ermittelt, so dass der Kessel mit dem Ergebnis des Schornsteinfegers die Bedingungen der 1.BImSchV bezüglich der CO-Emissionen erfüllt. Die Messung der Staubemissionen zeigte eine deutliche Belastung der Abgase, der Wert lag bei 210 mg/m³. Mit diesem Wert überschreitet der Brennstoff den Grenzwert der 1. BImSchV.

3.2.2.3.1 Verbrennung von Weizen

Die Verbrennung von Weizen im Passat-Kessel gestaltete sich ähnlich unproblematisch, wie die von Gerste. Das Brennverhalten war ähnlich, es kam während der Verbrennung jedoch zu einer stärkeren Schlackebildung (Anlage 2). Das Emissionsverhalten des Weizen war bezüglich des CO- Ausstoßes gut, der Mittelwert der Messreihe lag bei 125 mg/m³ und war damit weit unter dem Grenzwert. Der Verlauf der Emissionen war ebenfalls recht konstant, es kam jedoch zu kleineren Peaks nach der Zufuhr von Brennmaterial. Diese Peaks

sind vor allem im Verlauf der NO_x-Emissionen zu erkennen. Der Mittelwert der NO_x-Emissionen lag bei 720 mg/m³. Damit war der Grenzwert der TA-Luft von 500 mg/m³ überschritten, dies ist auf den höheren Anteil an Stickstoff im Brennmaterial zurückzuführen (vgl. Anhang Tabelle 5). Der Ausbrand des Weizens war zufriedenstellend, es blieb hier ebenfalls die Körnerstruktur in der Asche erhalten. Die Struktur der Schlacke war im Gegensatz zur Gerste fester, die Aschebrocken des Weizens ließen sich nicht von Hand zerreiben.

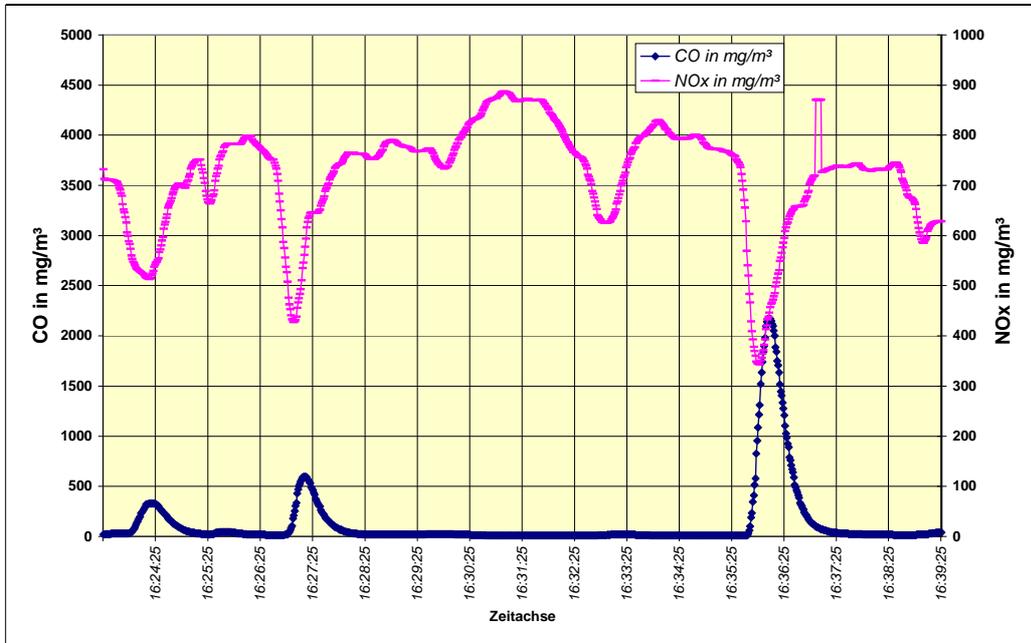


Abbildung 18: CO- und NO_x-Emissionen Weizen Passat

Der Weizen zeigte in der Anheizphase ähnliche Probleme wie die Gerste: war die Brennraumtemperatur zu niedrig, schob sich unverbranntes Material im Brennraum über die Primärluftöffnungen und unterband die Verbrennung. Dies konnte zu Betriebsstörungen führen, wenn der Vorschub zu groß war.

Der Emissionsverlauf bei der Verbrennung von Weizen im Veto-Kessel zeigt einen etwas anderen Verlauf. Der Mittelwert bei der CO-Messreihe lag bei 401 mg/m³ und damit unter dem Grenzwert. Die NO_x-Emissionen lagen mit einem Mittelwert von 642 mg/m³ auf einem Niveau, das über dem Grenzwert der TA-Luft liegt. Die Emissionswerte zeigten jedoch einen stetigen Verlauf ohne größere Ausreißer. Der erhöhte NO_x-Wert ist auch hier wieder auf den höheren N-Gehalt im Ausgangsmaterial zurückzuführen. Bei der Verbrennung im Veto-Kessel kam es zu keinen durch die Schlackebildung bedingten Störungen, es bildeten sich hier aber auch kleinere Schlackebrocken.

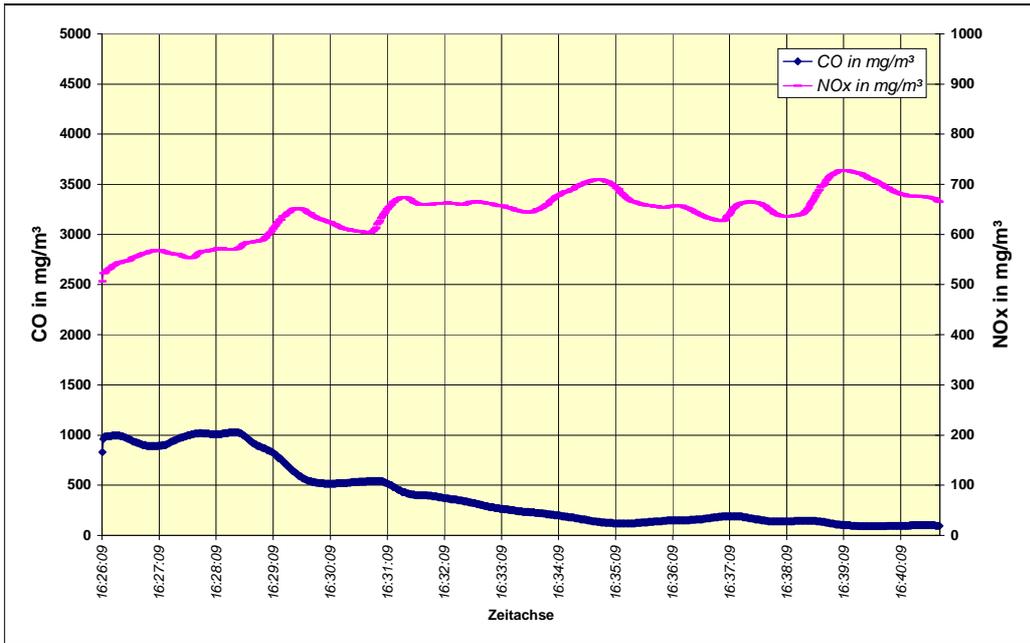


Abbildung 19: CO-und NOx-Emissionen Weizen Veto-Kessel

Der Reka-Kessel zeigte beim Eintrag von neuem Brennmaterial ein ausgesprochen empfindliches Verhalten. Es kam dann jedes Mal zu einem kurzzeitigen Anstieg der CO-Emissionen, dies resultiert aus einem Zusammenbruch der Brennraumbedingungen. Zu diesem Zeitpunkt kann der Verbrennung nicht ausreichend Sauerstoff zur Verfügung gestellt werden. Der Mittelwert der CO-Emissionen lag bei 755 mg/m³ und der NOx-Wert bei 373 mg/m³. Der CO-Grenzwert der 1.BImSchV ist mit diesem Wert ebenso unterschritten, wie der NOx-Wert der TA-Luft. Es ist hier kein erhöhter Emissionswert bedingt durch den Brennstoff Weizen festzustellen.

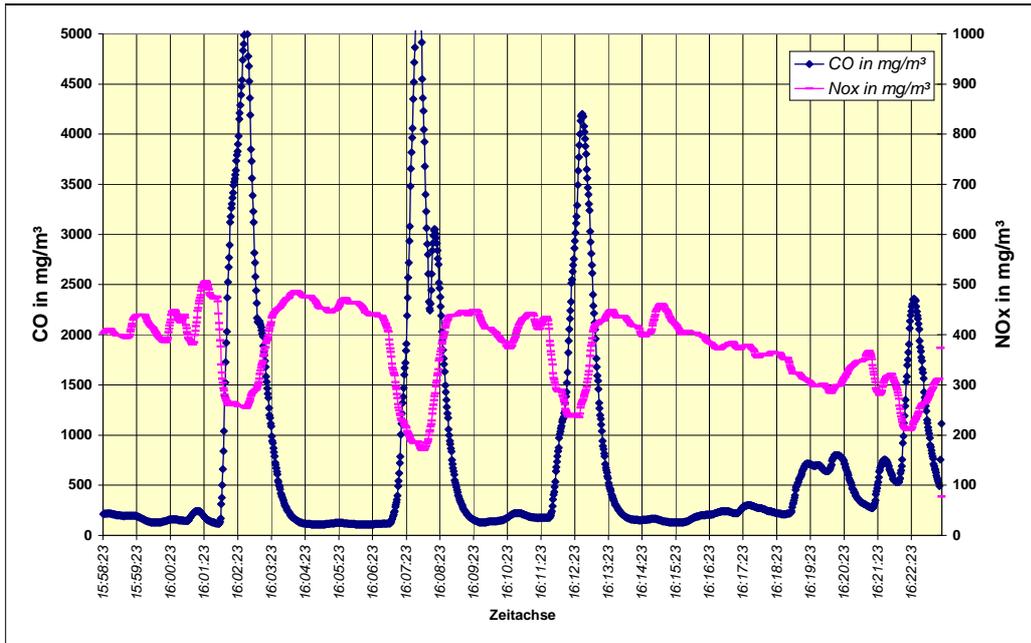


Abbildung 20: CO- und NOx- Emissionen Weizen Reka-Kessel

3.2.2.3.2 Verbrennung von Roggen

Die Verbrennung von Roggen ließ sich mit dem Passat-Kessel einfach durchführen. Die Beschickung und das Ausbrandverhalten des Roggens waren vergleichbar mit den Eigenschaften der anderen Brennstoffe. Es kam bei der Beschickung der Anlage zu keinerlei Störungen. Der Roggen zeigte ein gleichmäßiges Flambild. Im Bereich des Brennrostes kam es auch beim Roggen zur Schlackenbildung. Die Schlacke in der Roggenasche war der Asche des Weizens ähnlich und führte zeitweise zu einem Stocken des Gutflusses im Brennraum und zur Verstopfung der Primärluftöffnungen. Dies ist in den hohen punktuellen Werten der Emissionsmessung sichtbar. Der Mittelwert der Emissionsmessung lag bei 184 mg/m^3 und war damit unter dem Grenzwert von 4.000 mg/m^3 . Die NOx-Emissionen lagen auf einem sehr hohen Niveau mit einem Mittelwert von 537 mg/m^3 . Diese beiden Parameter lassen auf hohe Brennraumtemperaturen schließen, was die Abgastemperatur von im Mittel 247°C bestätigt. Insgesamt erwies sich Roggen bei der Verbrennung und dem Ascheanfall als unproblematisch. Die Asche hatte ähnlich, wie die anderen Körnerbrennstoffe, nach der Verbrennung noch die Körnerstruktur und der Ascheanfall war mit den anderen Körnerbrennstoffen vergleichbar. Die

Grenzwerte der Staubemissionen beim Roggen konnten nach den Messungen des Schornsteinfegermeisters eingehalten werden. Der Passat blieb mit dem Brennstoff Roggen unter dem Grenzwert. In der Messung des Schornsteinfegermeisters konnten auch die CO-Werte eingehalten werden, sie lagen bei 1000 bzw. 2000 mg/m³.

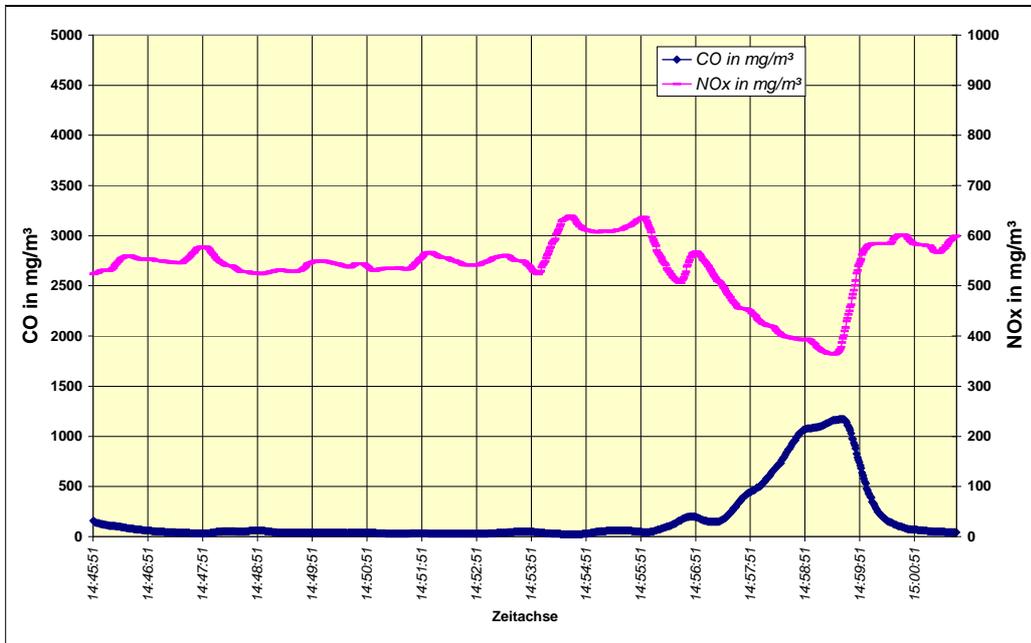


Abbildung 21: CO- und NOx-Emissionen Roggen Passat-Kessel

Im Veto-Kessel ließ sich die Verbrennung von Roggen etwas schwieriger durchführen. Der Brennstoff konnte ohne technische Schwierigkeiten in diesem Kessel verbrannt werden. Das Flambild konnte auch den Anforderungen entsprechend eingestellt werden. Es kam jedoch bei der Verbrennung zu erhöhten CO-Emissionen zu Beginn der Messreihe, die sich im Laufe der Messung auf ein normales Niveau unterhalb des Grenzwertes einpendelten. Mit einem Absinken der CO-Emissionen war hier auch wieder ein Anstieg der NOx-Emissionen zu verzeichnen. Der Grenzwert der CO-Emissionen mit 4000mg/m³ ist hier mit einem Mittelwert von 424mg/m³ unterschritten worden. Die NOx-Emissionen lagen über den gesamten Bereich der Messung auf einem Niveau, das weit über den Grenzwerten der TA-Luft lag. Der Mittelwert der NOx-Emissionen lag bei 966mg/m³ und war damit fast doppelt so hoch, wie der Grenzwert der TA-Luft. Die Staubemissionen konnten beim Veto-Kessel ohne Staubeinsatz nicht eingehalten werden. Der Einsatz zur

Staubminderung konnte den Staubgehalt nicht entscheidend senken, der Staubgehalt mit Einsatz war sogar höher als ohne. Dies mag an messtechnischen Fehlern oder an Restmengen im Filtereinsatz gelegen haben. Der CO-Wert konnte in der Messung des Schornsteinfegermeisters eingehalten werden.

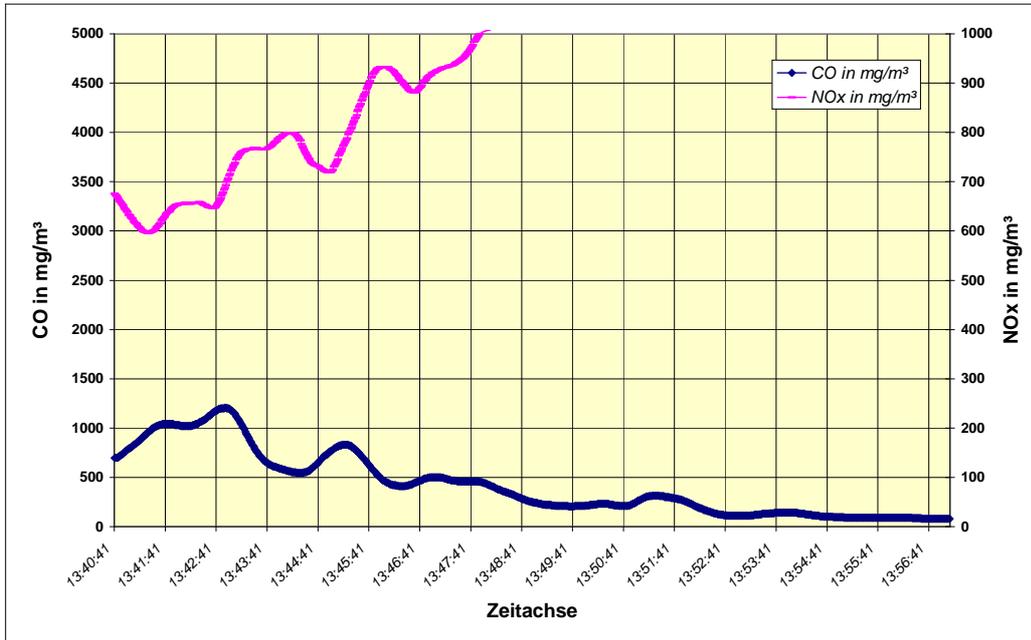


Abbildung 22: CO- und NOx-Emissionen Roggen Veto-Kessel

Der Reka-Kessel konnte ohne technische Probleme mit Roggen befüllt werden. Die Beschickung der Brennkammer war ebenfalls problemlos möglich. Schwierigkeiten gab es bei der Einhaltung der Emissionswerte. Die CO-Messung ergab bei dem Reka-Kessel einen Mittelwert über die Gesamtmessung in Höhe von 1.725 mg/m^3 , damit liegt dieser Wert unter dem Grenzwert von 4.000 mg/m^3 . Die NOx-Messungen hatten einen Mittelwert von 288 mg/m^3 und lagen damit unter dem Grenzwert der TA-Luft. Die Staubmessungen des Schornsteinfegermeisters ergaben für den Roggen einen Wert von 290 mg/m^3 und waren damit über dem Grenzwert. Der CO-Gehalt in der Messung des Schornsteinfegermeisters ergab einen Wert, der bei 8.000 mg/m^3 lag. Damit waren beide Grenzwerte in der Messung des Schornsteinfegermeisters überschritten und in der eigenen Messung mit dem Ecom-Messgerät unterschritten. Diese Angaben müssten durch weitergehende Versuche untersucht werden.

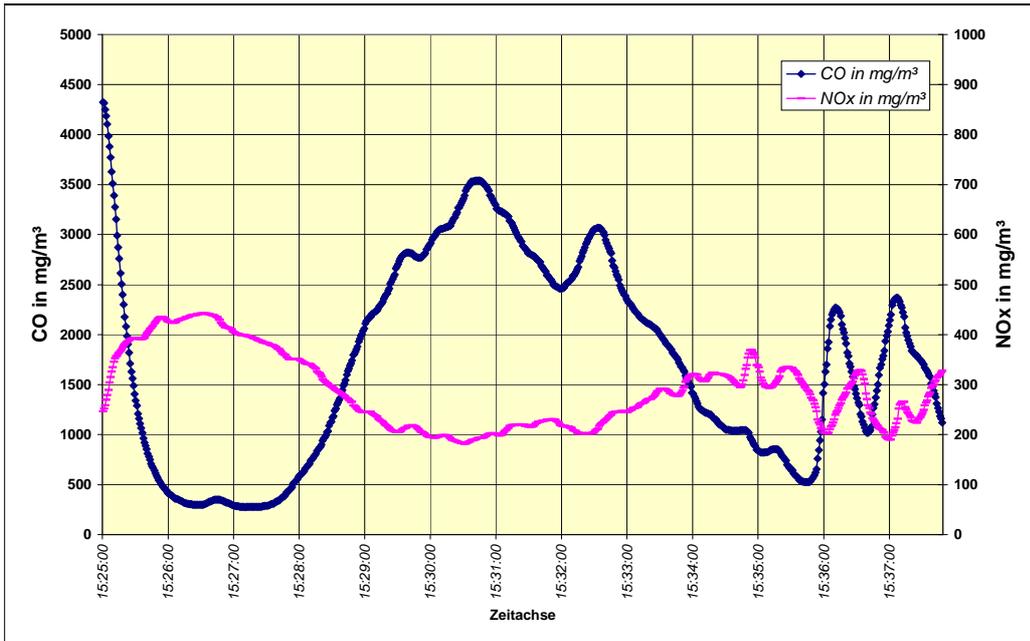


Abbildung 23: CO- und NOx-Emissionen Reka-Kessel Roggen

3.2.2.3.2.1 Verbrennung von Strohpellets

Die Verbrennung von Strohpellets im Passat-Kessel verlief nicht reibungslos. Die Befüllung des Vorratsmagazins und die Beschickung des Kessels ließen sich mit den Strohpellets ohne Probleme durchführen. Bei der Verbrennung der Strohpellets gab es beim Austrag der Asche jedoch einige Schwierigkeiten. Die Schlackebildung bei der Verbrennung war extrem stark und diese Schlacke legte sich in einem Band über den gesamten Bereich des Brennrastes, indem sich die Primärluftöffnungen befanden. Sobald dies eintrat, stiegen die CO-Emissionen stark an, da der Kessel unter O₂-Mangel die Strohpellets verbrannte. Die Verbrennung wurde entsprechend stark durch den Eintrag von Brennmaterial in den Brennraum beeinflusst. Sobald neues Brennmaterial in den Brennraum eingetragen wurde, stiegen die CO-Werte ebenfalls an, was an den einzelnen Peaks in der Emissionswertekurve zu erkennen ist. Der Mittelwert der CO-Emissionen lag bei 2.311 mg/m³ und damit unter dem Grenzwert der 1.BImSchV. Die NOx-Emissionen hatten einen Mittelwert, der unter dem Grenzwert der TA-Luft lag. Der Mittelwert lag bei 478 mg/m³. Die Schornsteinfegermessung die beim Passat in zweifacher Ausführung durchgeführt worden ist, ergab für die Staubemissionen einen Wert von 560

bzw. 520 mg/m³ Abgas. Die CO-Messung des Schornsteinfegermeisters ergab einen CO-Wert von 6.000 mg/m³.

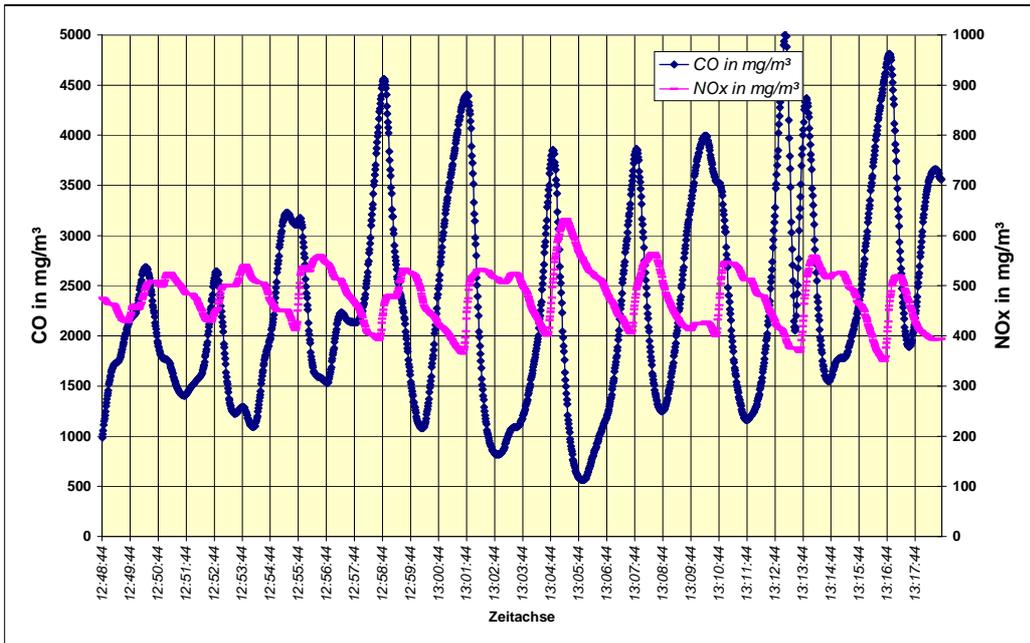


Abbildung 24: CO- und NO_x-Emissionen Strohpellets Passat-Kessel

Mit diesen Emissionswerten ist der Brennstoff Strohpellets als ungeeignet einzustufen. Problematisch war vor allen Dingen die Schlackebildung auf dem Brennrost, die zu größeren Problemen bei der Verbrennung führt. Die Ablagerungen der Schlacke mussten nach dem Brennvorgang manuell aus den Primärluftöffnungen entfernt werden. In den Zügen des Passat-Kessels kam es zu starken Ablagerungen von Feinasche, die ebenfalls zu einer überdurchschnittlichen Verschmutzung des Kessels führten. In der eigentlichen Aschefraktion waren größere Schlackebrocken zu finden, die einen leichten Säuregeruch hatten.

Der Ascheanfall war im Vergleich zu den Körnerbrennstoffen höher. Beim Abschalten des Passat-Kessels, was eigentlich automatisch geschieht, wenn der Nachschub aus dem Magazin nicht mehr ausreicht, um die Brennraumtemperatur über einem Grenzwert zu halten, wird das Magazin vom Kessel durch eine Klappe getrennt und es sollte eigentlich kein Rückbrand in das Magazin möglich sein. Bei den Strohpellets kam es hingegen zu diesem Problem, d.h. trotz geschlossener Rückbrandklappe konnte der Rest an Brennmaterial durch die Glut aus der Schlacke auf dem Brennrost entzündet werden, und es kam bei diesem Kessel zum Rückbrand.

Die Verbrennung im Veto-Kessel war ebenfalls schwierig, die mechanische Beschickung jedoch unproblematisch. Probleme traten bei der Einstellung des korrekten Flambildes und der korrekten Luftmenge auf. Es kam beim Veto-Kessel ebenfalls zur Schlackenbildung im Bereich des Brennkopfes. Dies führte beim Veto-Kessel ebenfalls zu einem Anstieg der CO-Emissionen die mit einem Mittelwert von 3085 mg/m³ jedoch unter dem zulässigen Grenzwert lagen. Die NO_x-Emissionen lagen mit einem Mittelwert von 131 mg/m³ im zulässigen Bereich nach der TA-Luft.



Abbildung 25: CO- und NO_x-Emissionen Strohpellets Veto Kessel

Die Messung des Schornsteinfegermeisters ergab für die Staubemissionen einen Wert von 400 mg/m³ der damit den Grenzwert auch überschritt. Die CO-Messung des Schornsteinfegermeisters lag bei den Strohpellets ebenfalls in einem Bereich von 6000 mg/m³ und damit über dem Grenzwert. Hier bestätigt sich das Ergebnis der eigenen Messung mit Strohpellets im Passat-Kessel.

Im Reka-Kessel zeigten die Strohpellets ein ähnlich problematisches Abbrandverhalten wie in den anderen beiden Kesseln. Der Mittelwert der Emissionsmessung mit dem Ecom-Messgerät lag bei 2166 mg/m³ und damit unter dem Grenzwert. Die NO_x-Emissionen hatten einen Mittelwert von 234 mg/m³ und lagen auch unter dem Grenzwert der TA-Luft. Die Staubmessung des Schornsteinfegermeisters ergab einen Messwert von 220 mg. Die Verbrennung der Strohpellets im Reka-Kessel war damit bis auf die

Staubemissionen und das charakteristische Abbrandverhalten unproblematisch.

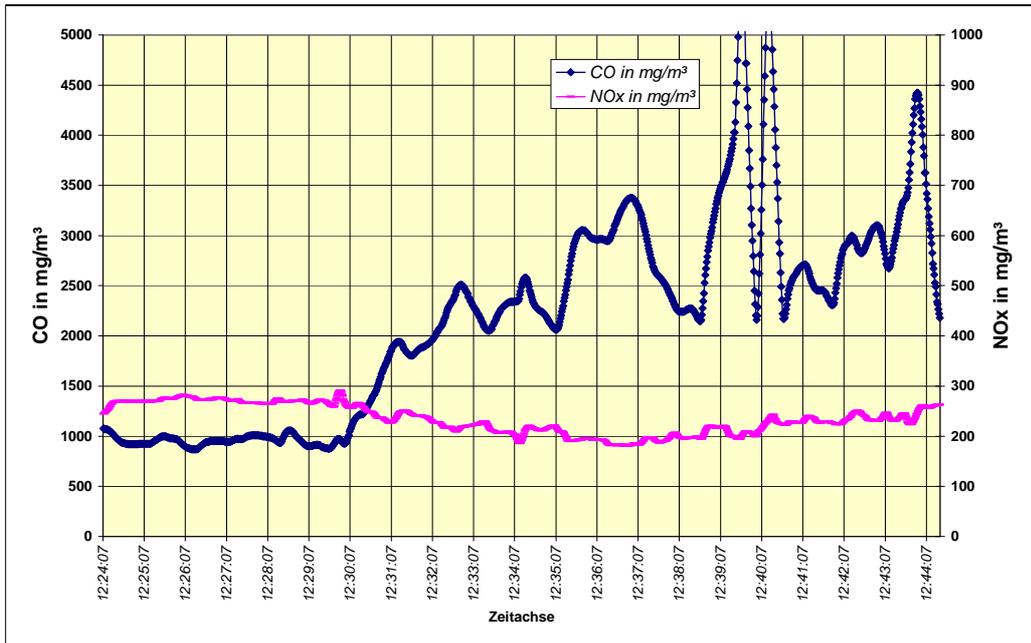


Abbildung 26: CO- und NOx-Emissionen Strohpellets Reka-Kessel

Es zeigte sich am Verlauf der CO-Emissionen, dass einige Peaks auftraten, in denen die Werte stark anstiegen. Dies lässt auf die Bildung von Schlacke schließen, die die Primärluftöffnungen verstopft. Trotz dieser Probleme ist die Verbrennung dennoch unproblematisch, da der Reka-Kessel mit einem beweglichen Rost ausgerüstet ist und der CO-Grenzwert unterschritten wird.

3.2.2.4 Verbrennung von GNP-Pellets

Die Verbrennung von Getreidenebenprodukt-Pellets (GNP) erwies sich als technisch einfach umzusetzen. Die Qualität der Pellets war hingegen im Vergleich zu den Holzpellets nur dürftig. Die Abriebsfestigkeit war sehr gering, so dass schon beim Befüllen des Magazins ein Teil der Pellets zerrieben wurde. Dadurch kam es zu einem Staub/Pellet-Gemisch, das allerdings im Passat-Kessel gut verfeuert werden konnte. Das Flambild der GNP-Pellets sah optisch gut aus, die Schlackebildung bei der Verbrennung konnte ebenfalls als gering bezeichnet werden. Der Mittelwert der CO-Messung lag bei 880 mg/m³ Abgas, damit ist der Grenzwert nicht gefährdet und es kann von einer sauberen Verbrennung gesprochen werden. Betrachtet man die NOx-

Werte, so sind an dieser Stelle die Emissionen für die TA-Luft zu hoch. Der Mittelwert der Messung lag bei 611 mg/m³.

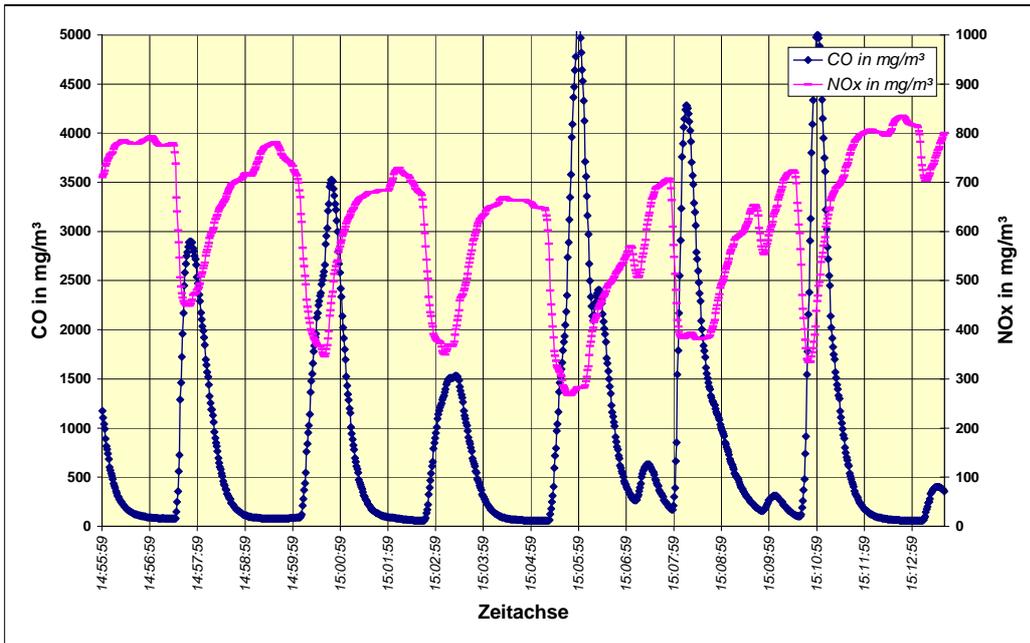


Abbildung 27 CO- und NO_x-Messung GNP-Pellets Passat Kessel

Der Wert der Staubemissionen lag bei der Messung des Schornsteinfegermeisters mit 220 mg/m³ über dem zulässigen Grenzwert von 150 mg/m³. Die CO-Messung des Schornsteinfegermeisters ergab einen Wert von 2.000 mg/m³. Damit ist der Brennstoff in Bezug auf die CO-Emissionen unproblematisch.

Der Verlauf der CO-Emissionen zeigt wieder den für den Passat-Kessel typischen Verlauf, auf eine Phase der Beschickung mit neuem Brennmaterial folgt ein rapider Anstieg der CO-Emissionen. Hier ist zudem deutlich erkennbar, dass mit einem Anstieg der CO-Emissionen eine Verminderung der NO_x-Emissionen verbunden ist. Der Ascheanfall der GNP-Pellets war im Vergleich zu den anderen Brennstoffen ein wenig höher, es kam jedoch nicht zu technischen Problemen beim Ascheaustrag.

Der Veto-Kessel hatte mit der Verbrennung der GNP-Pellets keine Probleme, auch die Beschickung war unproblematisch. Die Schlackebildung war recht gering so dass dieser Brennstoff ein gutes Flambild ergab. Der Mittelwert der CO-Emissionen lag bei diesem Brennstoff bei 565 mg/m³, der NO_x-Wert bei 442 mg/m³. Damit liegen diese beiden Werte unter dem Grenzwert.

Die Staubmessung des Schornsteinfegermeisters ergab einen Emissionswert für die Staubbelastung von 310 mg/m^3 und für die CO-Emissionen einen Wert von 500 mg/m^3 . Damit ist dieser Brennstoff bis auf die Staubbelastung unproblematisch.

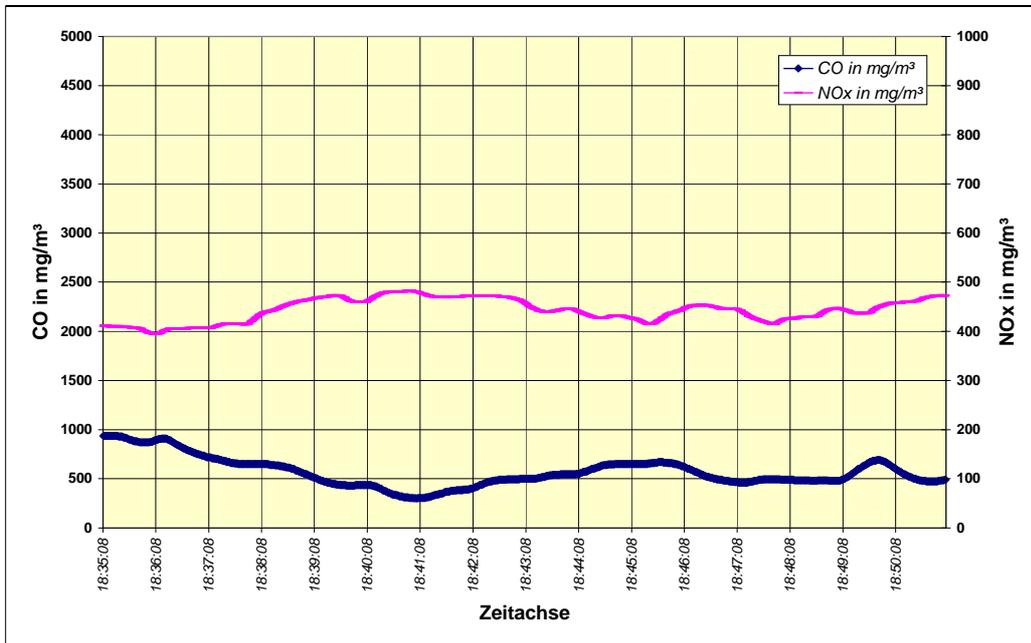


Abbildung 28: CO- und NOx- Emissionen GNP-Pellets Veto Kessel

Der Reka-Kessel ließ sich ebenfalls auf die GNP-Pellets einfach einstellen, die Bedienung und die Beschickung des Kessels waren unproblematisch umzustellen. Der Verlauf der CO-Emissionen beim Reka-Kessel hat einen unregelmäßigen Verlauf, d.h. es kommt im Bereich der Primärluftöffnungen zu Verstopfungen und damit zu einer unsaubereren Verbrennung (vgl. Abb. 29). Der Mittelwert der CO-Messreihe lag jedoch mit 1.616 mg/m^3 unter dem Grenzwert. Die NOx-Emissionen hatten einen Mittelwert von 223 mg/m^3 und lagen damit ebenfalls unter dem Grenzwert der TA-Luft. Die Staubmessungen des Schornsteinfegermeisters hatten einen Staubgehalt von 230 mg/m^3 und lagen damit über dem Grenzwert von 150 mg/m^3 . Die CO-Messung ergab einen Mittelwert von 2.000 mg/m^3 .

Der Ascheanfall machte beim Reka-Kessel ebenfalls keine Probleme, so dass auch hier einer bis auf die Staubemissionen problemlosen Verbrennung gesprochen werden kann.

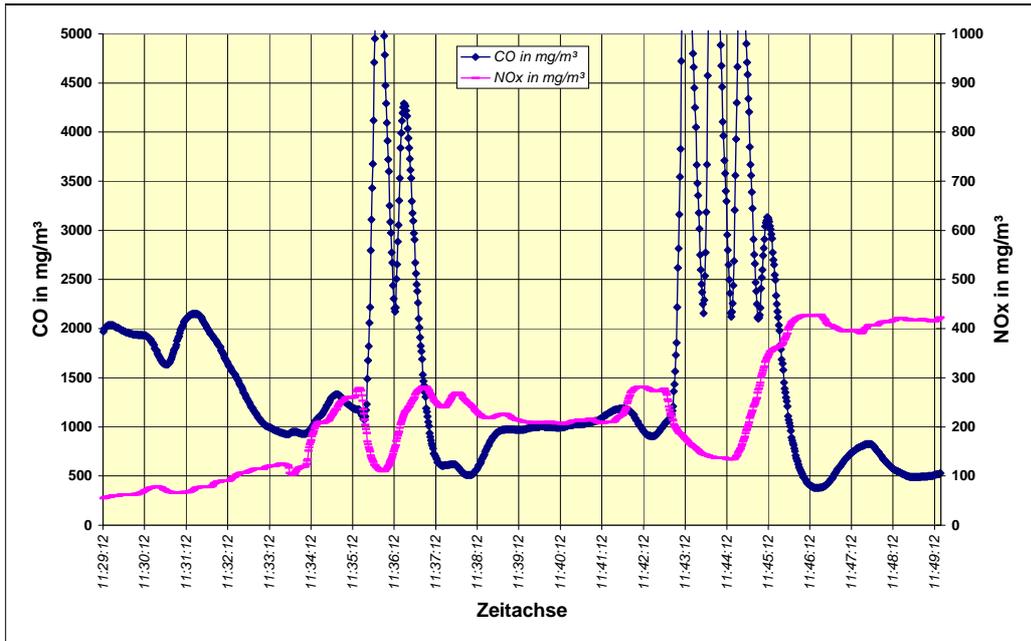


Abbildung 29: CO- und NOx-Emissionen GNP-Pellets Reka-Kessel

3.3 Bewertung der Ascheproben

Im Zusammenhang mit den Versuchen zur Bestimmung der Emissionswerte war eine Untersuchung der Asche ein weiteres Ziel. Es wurden allerdings nur Proben aus dem Passat-Kessel gezogen, da eine breitere Datengrundlage aus finanziellen Gründen nicht möglich war.

Als Vergleich wurden jeweils eine Probe des unverbrannten Brennstoffs und eine Ascheprobe analysiert. Bei den Frischeproben wurden der TS-Gehalt sowie die Anteile an C, N, S, O, und Cl bestimmt. In den Ascheproben wurde der Gehalt an C, P, S, K und Magnesium bestimmt. Die Analyse wurde von einem ortsansässigen Labor für Umweltanalytik durchgeführt.

Den Analyseergebnissen in der Anlage 6 ist zu entnehmen, dass der Trockensubstanzgehalt (TS) bei allen Brennstoffen bis auf die Holzhackschnitzel über 85% lag. Die Holzhackschnitzel waren durch die Außenlagerung der Witterung ausgesetzt und hatten somit einen höheren Feuchtigkeitsgehalt. Der TS-Gehalt lag bei den Hackschnitzeln bei 64%. Die Elementarzusammensetzung der Brennstoffe wurde mit den Literaturangaben nach Strehler (Anlage 6) verglichen, es konnten keine relevanten

Abweichungen festgestellt werden. Die geringen Abweichungen liegen im Rahmen der üblichen Schwankungsbereiche bei Biobrennstoffen und sind somit zu vernachlässigen. Die Emissionswerte sind zudem nur aus der anfallenden Asche im Rostbereich und direkt hinter dem Brennraum genommen worden. Damit findet sich in diesen Proben wahrscheinlich nur Grob- und Mittelasche. Dies kann die geringen Cl-Emissionen erklären, da Cl sich zu einem Großteil in der Feinasche befindet und somit nicht gemessen wurde. Dadurch lässt sich die besonders interessante Fragestellung der Cl-Emissionen im Hinblick auf Festbrennstoffheizungen leider nicht hinreichend beantworten.

In wieweit die Asche als Dünger zu verwerten ist, ist fraglich da sie einer genaueren Untersuchung bedarf, die hier nicht möglich war.

Verbrennungsstörungen durch übermäßigen Ascheanfall wurden nicht beobachtet, es kam jedoch durch Veränderungen in der Struktur der Asche zu Betriebsstörungen im Brennraum. Die dort stattfindende Schlackebildung (vgl. Abb. 30 und Abb.31) führt zu einer Störung der Luftführung und des Brenngutflusses. Die Schlacke setzt sich über die Primärluftöffnungen und verschließt diese, die darauf eintretende Absenkung der Brennraumtemperatur führt zu einem Erstarren der Schlacke und damit zu einem Abreißen des Gutflusses und einer Unterbrechung der Verbrennung. Dies wurde in der Versuchsreihe bei den Strohpellets beobachtet, wo sich im Passat-Kessel über die gesamte Breite des Brennraumes Schlacke bildete und eine weitere Verbrennung unterband. Zu einer für die Verbrennung problematischen Schlackebildung kam es ebenfalls bei der Verbrennung von Weizen. Es bildeten sich hier ebenfalls größere Schlackebrocken, die den Gutfluss im Brennraum störten. Bei Roggen trat diese Schlackebildung weniger auf, während bei Gerste nur noch ein Verkleben der Aschekörner zu erkennen war. Somit zeigt Gerste die geringste Neigung zur Verschlackung in der Vergleichsgruppe der strohähnlichen Brennstoffe. Bei den holzartigen Brennstoffen kam es zu keiner Schlackebildung im Brennraum.



Abbildung 30: Strohpelletschlacke



Abbildung 31: Schlackebrocken bei Weizen

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

In der folgenden Tabelle sollen die Ergebnisse der Emissionsmessungen zusammengefasst werden. Die Felder sind entsprechend der Grenzwerte gekennzeichnet. Hell unterlegt sind alle Felder, die unterhalb des Grenzwertes liegen, dunkel alle, die oberhalb der Grenzwerte sind.

	Weizen		Gerste		Roggen		GNP-Pellets ¹⁾		Stroh-Pellets		Holz-Pellets		HHS ²⁾	
Passat	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max	Ø	Min/Max
CO	125	10	276	60	184	25	881	60	2311	565	1346	80		
		2175		1040		1170		5190		5060		8670		
Nox	721	343	452	302	537	364	611	267	478	350	237	126		
		887		571		639		835		632		289		
Staub	285		130		125		230		540		280			
Veto														
CO	402	90	394	240	425	80	566	300	3086	50	171	110	405	230
		1025		575		1205		935		3820		240		655
Nox	642	507	441	371	966	596	443	395	132	60	117	94	234	206
		728		497		1187		482		145		145		269
Staub	360		260		360		250		400		140		135	
Reka														
CO	755	110	1522	300	1726	275	1617	380	2167	870	934	335	1224	375
		5780		8820		4325		7150		5700		5225		2820
Nox	374	170	279	149	289	182	224	55	234	181	216	161	125	84
		507		430		442		427		291		251		217
Staub	220		210		290		230		200		100		60	

Angaben in mg/m³Grenzwert CO: 4000 mg/m³Grenzwert NOx: 400 mg/m³Grenzwert Staub: 150 mg/m³

1) GNP = Getreide-Neben-Produkte

2) HHS = Holz-Hack-Schnitzel

Abbildung 32: Zusammenfassung der Ergebnisse (Quelle: eigene Darstellung)

Es zeigt sich, dass kein Brennstoff in allen drei Kesseln die Grenzwerte einhalten konnte. Selbst die Holzpellets konnten die Staubgrenzwerte im Passat-Kessel nicht einhalten. Schwierigkeiten gab es im Passat- und dem Veto-Kesseln bei der Einhaltung der NO_x-Emissionen, die jedoch im Reka Kessel eingehalten werden konnten. Hier bedarf es weiterer Versuche, um die Ursache für diese Tatsache zu finden. Hinter den arithmetischen Durchschnittswerten sind jeweils die Minimum und Maximum-Werte angegeben. Die Streuung der Messwerte ist sehr hoch, sie variieren teilweise um das 200-fache von Minimumwert zu Maximumwert bei einem Kessel und einem Brennstoff. Hier muss zusätzlich bedacht werden, dass der Messbereich des Messgerätes bei CO begrenzend wird, so dass höhere Maximumwerte technisch ausgeschlossen werden. Bei den praktischen Messungen ist es z.T. zu einem Abschalten des Messgerätes wegen nicht messbarer CO-Emissionen gekommen.

Die Streuung der Messwerte ist bei den einzelnen Brennstoffen sehr unterschiedlich, teilweise variieren die Messwerte um einige hundert mg/m³, teilweise um mehrere tausend mg/m³. Ob diese Bandbreite der Messwerte durch Störungen im Brennraum oder mangelnde Homogenität des Brennmaterials hervorgerufen wird, bleibt in weiteren Versuchen zu klären. Bessere Einstellung des Kessels könnte das Entstehen von Emissionsspitzen im Verbrennungsablauf verhindern. Die Zufuhr des Brenngutes sollte der Gutstruktur angepasst werden, um Betriebsstörungen zu vermeiden. Hier zeigte sich bei den Kesseln mit Lambda-Steuerung (Veto und Reka) ein deutlicher Bedienungsvorteil gegenüber dem Kessel ohne Lambda-Steuerung. Die Staubemissionen sind bei fast allen Messungen zu hoch. Es gibt hier einige positive Ausreißer, die jedoch nicht durch zugelassene Brennstoffe erklärt werden. Gerste und Roggen haben die Staubgrenzwerte im Passat-Kessel eingehalten, während die Strohpellets die höchsten Staubemissionen hatten. In wieweit sich die Staubemissionen durch eine besondere Steuerung der Kessel beeinflussen lassen, bleibt offen. Es muss zum jetzigen Zeitpunkt von einem Bedarf an zuverlässiger Filtertechnik ausgegangen werden. Diese Filtertechnik würde die gesamten Anlagenkosten noch weiter erhöhen, so dass die Wettbewerbsfähigkeit sinken würde.

Der Festkostenanteil einer Biomasseheizung ist im Vergleich zu einer konventionellen Ölheizung mit 35-38 % (Anlage 3) um ca. 30 % höher.

Wenn die hohen Festkosten durch niedrige variable Kosten, d.h. günstiges Brennmaterial kompensiert werden, lässt sich eine Festbrennstoffheizung gegenüber einer Ölheizung konkurrenzfähig darstellen.

5. Fazit

Die Verbrennung von festen Bioenergieträgern als Ersatz für konventionelle Brennstoffe wie Gas und Heizöl in Kleinf Feuerungsanlagen hat sich in den letzten Jahren einem schnellen Wandel unterziehen müssen. Der starke Strukturwandel in der Landwirtschaft und der zunehmende Preisanstieg fossiler Brennstoffe haben dieser Technik gute Entwicklungsmöglichkeiten eingeräumt. Die bei der Verbrennung von getreideartigen Brennstoffen auftretenden Probleme im Hinblick auf die Staubemissionen sind allerdings noch nicht mit den gesetzlichen Rahmenbedingungen vereinbar. Hier besteht Entwicklungsbedarf.

Eine weitere Schwierigkeit stellt die Tatsache dar, dass Getreidekörner nicht zu den zugelassenen Brennstoffen nach 1.BImSchV gehören und somit in Kleinf Feuerungsanlagen nicht verheizt werden dürfen. Hier ist der Gesetzgeber gefragt, um die energetische Verwertung von Getreidekörnern voranzubringen. Dies bedarf allerdings einer breiten Diskussion, um innerhalb der Gesellschaft gehegte Bedenken auszuräumen.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der für die Biobrennstoffe spricht, ist die Diversifizierung der Brennstoffe. Während herkömmliche Heizungsanlagen nur für einen Brennstoff geeignet waren, sind Biomassekessel meist für mehrere Produkte geeignet. Dies schafft eine bessere Versorgungssicherheit, da man sich als Betreiber einer solchen Anlage nicht mehr in einer einseitigen Abhängigkeit befindet.

Um eine Festbrennstoffheizung wirtschaftlich darzustellen, ist zurzeit noch eine Förderung durch die öffentliche Hand nötig. Dies steht jedoch in eindeutiger Abhängigkeit zum Preis fossiler Energieträger.

Gelöscht: klarer

Gelöscht: für

6. Literaturverzeichnis

Gabler Wirtschaftslexikon 15. Auflage

HARTMANN, HANS, Biomasse als erneuerbarer Energieträger aus der Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2002.

- STREHLER Energiegetreide im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen-Einsatzmöglichkeiten und –grenzen aus der Sicht von Forschung und Technik, 2003.**
- OBERNBERGER, I. Thermische Nutzung fester biogener Brennstoffe, erschienen in der VDI Schriftenreihe: Regenerative Energien in Ungarn und Deutschland, 2000.**
- Marutzky, R. und Schultze, D. Zusammensetzung und charakteristische Eigenschaften von biogenen Festbrennstoffen und deren Aschen, in Eigenschaften biogener Festbrennstoffe; Schriftenreihe: Nachwachsende Rohstoffe, Band 3, 2001.**
- Bundesanzeiger Nr. 234, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien vom 26. November 2003, ausgegeben am 13. Dezember 2003**
- NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, Projektdokumentation, 1997-1999, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe**
- ENERGETISCHE NUTZUNG VON GETREIDE IN KLEINFEUERUNGSANLAGEN, KTBL-Fachgespräch vom 12.-13. Februar 2003 in Petersberg-Almendorf bei Fulda**

7. Anlagen

Anlage 1: §3 der 1.BimSchV

(1) In Feuerungsanlagen nach §1 dürfen nur die folgenden Brennstoffe eingesetzt werden:

- 1. Steinkohlen, nicht pechgebundene Steinkohlenbriketts, Steinkohlenkoks**
- 2. Braunkohlen, Braunkohlenbriketts, Braunkohlenkoks**
- 3. Torfbriketts, Brenntorf**
 - a. Grill-Holzkohle, Grillholzkohlenbriketts**
- 4. naturbelassenes stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, beispielweise in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln, sowie Reisig und Zapfen,**
- 5. naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde,**

a. Presslinge aus naturbelassenem Holz in Form von Holzbriketts entsprechend DIN 51731, Ausgabe Mai 1993, oder vergleichbare Holzpellets oder andere Presslinge aus naturbelassenem Holz mit gleichwertiger Qualität,

6. gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,
7. Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen,
8. Stroh, oder ähnliche pflanzliche Stoffe,
9. Heizöl EL nach DIN 51603-1, Ausgabe März 1998, sowie Methanol, Äthanol, naturbelassene Pflanzenöle oder Pflanzenölmethylester,
10. Gase der öffentlichen Gasversorgung, naturbelassenes Erdgas oder Erdölgas mit vergleichbaren Schwefelgehalten sowie Flüssiggas oder Wasserstoff,
11. Klärgas mit einem Volumengehalt an Schwefelverbindungen bis zu 1 vom Tausend, angegeben als Schwefel, oder Biogas aus der Landwirtschaft,
12. Koksofengas, Grubengas, Stahlgas, Hochofengas, Raffineriegas und Synthesegas mit einem Volumengehalt an Schwefelverbindungen bis zu 1 vom Tausend, angegeben als Schwefel

(2) –(3)

(4) Presslinge nach Absatz 1 Nr. 5a oder Briketts aus Brennstoffen nach Absatz 1 Nr. 6-8 dürfen nicht unter Verwendung von Bindemitteln hergestellt sein.

Ausgenommen davon sind Bindemittel aus Stärke, pflanzlichem Paraffin oder aus Melasse.

Anlage 2: Verbrennungstechnische Kenndaten

<u>Brennstoff</u> <u>Biomasseart</u>	Heizwert, $H_{(wf)}$ MJ/kg	Energiegehalt bei Verbrennung und Wirkungsgrad von 85% in kWh/kg	Brennwert, $H_{b(wf)}$ MJ/kg	Aschegehalt (wf) in %	flüchtige Bestandteile (wf) in %	Ascheerweichungsverhalten			
						SB in °C	EP in °C	HP in °C	FP in °C
Steinkohle	29,7	7,01		8,3	34,7		1250		
Braunkohle	20,6	4,86		5,1	52,1		1050		
Rinde (Nadelholz)	19,2	4,53	20,4	3,8	77,2	1292	1440	1460	1490
Roggenstroh	17,4	4,11	18,5	4,8	76,4	935	1002	1147	1188
Weizenstroh	17,2	4,06	18,5	5,7	77	1008	998	1246	1302
Triticalestroh	17,1	4,04	18,3	5,9	75,2	891	911	1125	1167
Gerstenstroh	17,5	4,13	18,5	4,8	77,3	720	980	1113	1173
Rapsstroh	17,1	4,04	18,1	6,2	75,8	1120	1273	1460	1403
Maisstroh	17,7	4,18	18,9	6,7	76,8	930	1050	1120	1140
Sonnenblumenstroh	15,8	3,73	16,9	12,2	72,7	798	839	1178	1270
Hanfstroh	17,0	4,01	18,2	4,8	81,4	1347	1336	1420	1456
Roggenganzpflanzen	17,7	4,18	19,0	4,2	79,1				
Weizenganzpflanzen	17,1	4,04	18,7	4,1	77,6	949	977	1155	1207
Triticaleganzpflanzen	17	4,01	18,4	4,4	78,2	810	833	982	1019
Roggenkörner	17,1	4,04	18,4	2	80,9		710		810
Weizenkörner	17	4,01	18,4	2,7	80	662	687	887	933
Triticalekörner	16,9	3,99	18,2	2,1	81	706	730	795	840
Rapskörner	26,5	6,26		4,6	85,2				
Miscanthus	17,6	4,16	19,1	3,9	77,6	861	973	1097	1170
Landschaftspflegeheu	17,4	4,11	18,9	5,7	75,4	1017	1061	1244	1228
Rohrschwengel	16,4	3,87	17,8	8,5	72	840	869	1197	1233
Weidelgras	16,5	3,90	18	8,8	74,8				
Straßengrasschnitt	14,1	3,33	15,2	23,1	61,7	1181	1200	1270	1286
						SB	=	Sinterbeginn	
						EP	=	Erweichungspunkt	
						HP	=	Halbkugelpunkt	
						FP	=	Fließpunkt	
						--> nach DIN 51730			

Anlage 3: Modellrechnung Kesselbetrieb

	Einheit	Ölheizung		Energiegetreide		Strohpellet-Heizung	
		Niedertemp.	Brennwert	A	B	A	B
Kesselwirkungsgrad	%	95	101	90	90	90	90
Nutzwärmebedarf	kWh/Jahr	60000	60000	60000	60000	60000	60000
Heizkessel							
Investition	€	3500	5000	13500	9680	13500	9860
Zuschuss (80 KW-Kessel)				4800	4800	4800	4800
Installation	€	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Nutzungsdauer	Jahre	20	20	15	15	15	15
Zinsansatz A/2	%	6	6	6	6	6	6
Zinsen Ø		150	195	306	191,4	306	196,8
Abtrag		250	325	680	425	680	437
Festkosten	€/Jahr	400	520	986	617	986	634
Instandhaltung	%	1	1	2	2	2	2
	€/Jahr	35	50	270	270	270	270
Fremdwartung	€/Jahr	150	150	0	0	0	0
Kontrolle	Häufigkeit/Woche			7	7	7	7
Zeitbedarf	Min/Vorgang			3	3	3	3
	Akh/Jahr			18	18	18	18
Reinigung der Züge	Häufigkeit/Woche			0,3	0,3	0,8	0,5
Zeitbedarf	Min/Vorgang			30	30	30	30
	Akh/Jahr			13	13	13	13
Asche							
Aschemenge	kg/Jahr			404	404	809	809
Entaschen	Häufigkeit/Jahr			33	42	65	84
Zeitbedarf	Min/Vorgang			5	5	5	5
	Akh/Jahr			2,7	3,5	5,4	7
Gesamtwartung selbst							
Summe	Akh/Jahr			34	30	44	37
Lohnansatz	€/Akh			12,5	12,5	12,5	12,5
Lohnkosten	€/Jahr			425	375	550	462,5
Wartung/Instandhaltung	€/Jahr	185	200	695	645	820	732,5
Kaminkehrer	€/Jahr	57	57	113	113	113	113
Stromkosten	€/Jahr	53	50	115	115	115	115
Heizstoffkosten	€/dt o. €/l	0,35	0,35	8	8	10,7	10,7
Heizstoffmenge	dt/jahr			171	171	152	152
Heizstoffkosten	€/Jahr	2213	2082	1368	1368	1621	1621
Variable Kosten	€/Jahr	2509	2389	2291	2241	2669	2582
Lagerkosten	€/Jahr	395	371	303	303	303	303
Heizraumkosten	€/Jahr	105	105	190	131	190	131
Heizstoffkosten	Ct/kWh	3,69	3,47	2,28	2,28	2,70	2,70
Gesamtkosten	€/Jahr	3409	3385	3770	3291	4148	3650
	Ct/kWh	5,7	5,6	6,3	5,5	6,9	6,1
Fixkosten	Ct/kWh	1,99	2,17	4,00	3,21	4,21	3,38
Prozentualer Anteil d. FK an den Gesamtkosten		0,35	0,38	0,64	0,58	0,61	0,56

Anlage 4

Tabelle 5: Ergebnisse der Schornsteinfegermessung

Feuerungsversuche				Getreide und Pellets 2004			
Emissionsmessungen durch den Bezirks-Schornsteinfegermeister							
Kessel	Nennl.kW	Datum	Brennstoff	t-Abgas C	O2-Gehalt %	CO-Gehalt ¹⁾ g/m ³	Staubgehalt ²⁾ Abgas in g/m ³
PASSAT C4	32	12.02.2004	Roggen	156	6,9	1,00	0,12
PASSAT C4	32	12.02.2004	Roggen	163	4,7	2,00	0,13
PASSAT C4	32	12.02.2004	Gerste	154	8,2	1,00	0,17
PASSAT C4	32	12.02.2004	Gerste	150	10,5	2,00	0,09
PASSAT C4	32	18.02.2004	Weizen	228	11,5	0,20	0,23
PASSAT C4	32	18.02.2004	Weizen	240	10,3	0,20	0,34
PASSAT C4	32	24.02.2004	Strohpellets	246	15,3	6,00	0,56
PASSAT C4	32	24.02.2004	Strohpellets	168	16,7	6,00	0,52
PASSAT C4	32	24.02.2004	Kaffpellets	227	10,4	0,50	0,28
PASSAT C4	32	24.02.2004	Kaffpellets	221	12,0	0,70	0,18
PASSAT C4	32	24.02.2004	Holzpellets	260	6,4	7,00	0,28
VETO 60	48	27.02.2004	Roggen	66	10,7	0,50	0,31
VETO 60	48	27.02.2004	Roggen m.E.	66	10,1	0,60	0,41
VETO 60	48	27.02.2004	Gerste	93	8,7	0,30	0,26
VETO 60	48	27.02.2004	Weizen	87	12,7	2,00	0,28
VETO 60	48	27.02.2004	Strohpellets	62	15,0	6,00	0,40
VETO 60	48	27.02.2004	Kaffpellets	100	11,3	0,50	0,31
VETO 60	48	28.02.2004	Kaffpellets m.E.	83	10,8	0,50	0,19
VETO 60	48	28.02.2004	Holzpellets	107	10,7	0,20	0,14
VETO 60	48	28.02.2004	Hackschnitzel	106	11,9	0,50	0,17
VETO 60	48	28.02.2004	Hackschn.m.E.	93	11,1	0,90	0,10
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Roggen	146	9,3	8,00	0,29
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Gerste	156	11,4	3,00	0,21
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Weizen	134	7,7	0,80	0,22
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Strohpellets	193	12,0	1,00	0,20
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Kaffpellets	107	9,8	2,00	0,23
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Holzpellets	204	10,4	0,50	0,10
REKA FSK30/3	32	02.03.2004	Hackschnitzel	164	8,7	2,00	0,06

¹⁾ CO-Gehalt = 4 g/m³ (s. Tab. 3)²⁾ Staubgehalt = 0,15 g/m³ bzw. 150 mg/m³ (s. Tab. 3)

Anlage 5

**Tabelle 6 Biomassezusammensetzung der eingesetzten Brennstoffe
(Untersuchungs-Labor Biobac, Westerröfnd)**

	TS in % der OS	C in % TS	N in % TS	S in % TS	O in % TS	Cl in % TS
Roggen	87,8	45,75	2,22	0,151	46,73	0,02
Weizen	86,6	45,52	2,092	0,15	47,23	0,026
Gerste	86,4	46,16	2,291	0,153	46,42	0,046
GNP-Pellets	89,2	47,38	2,145	0,204	44,93	0,042
Stroh-Pellets	91	48,71	0,495	0,125	47,8	0,037
Holz-Pellets	92,5	51,22	0,112	0,015	43,08	<0,01
HHS	84,4	47,63	0,423	0,047	45,74	<0,01

**Tabelle 7: Elementarzusammensetzung von Brennstoffen (in % der TS)
(Quelle: eigene Darstellung, nach Strehler)**

Elemente	Holz	HHS mit Rinde	Grenzwerte für Holzpellets	Stroh	Weizen	Heizöl
C	51,9	50,1		43,5	46,2	86
H	6	6,14		5,03	5,8	13
N	0,123	0,12	0,3	0,41	0,59	
S	0,009	0,00332	0,08	0,077	0,08	0,2
Cl	0,015	0,0057	0,03	0,24	0,15	
O	42	42,6		47,7	43,2	
Cd	0,00002	0,000028	0,00005	0,000004	0,0000002	
Zn	0,0022	0,0059	0,01	0,00044	0,011	
Cr		0,00076	0,0008	0,00017		
Na	0,018	0,007		0,0105	0,42	
K	0,04	0,1212		0,71	0,94	
Ca	0,065	0,51		0,27	0,4	
P	0,0075	0,0236		0,047	0,075	
Mg	0,016	0,0608		0,13	0,11	
Si	0,0028	0,12		1,3	1,8	
Asche	0,5-1,0	1-2,5	1,5	4,0-12	3,6-5,3	0,01

**Tabelle 8: Ergebnisse der Ascheuntersuchung
(Quelle: eigene Messung / BioBac)**

	C in % OS	P in % OS	S in % OS	K in % OS	MG in % OS
Roggen	13,58	13,97	0,16	8,6	5,22
Weizen	21,49	11,99	0,1	6,77	4,47
Gerste	9,83	9,94	0,28	8,08	3,78
GNP-Pellets	10,65	6,29	0,66	8,58	2,45
Stroh-Pellets	2,92	2,46	0,67	9,7	1,75
Holz-Pellets	35,73	6,55	0,29	5,37	2,55