

# Strohpellets für Kleinfeuerungsanlagen

E. Wopienka

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**45/2009**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Strohpellets für Kleinfeuerungsanlagen

Elisabeth Wopienka, Lara Carvalho, Gottfried Eder,  
Waltraud Emhofer, Günther Friedl, Manuel Schwabl  
Austrian Bioenergy Centre GmbH

Wieselburg, Juli 2008

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage [www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at](http://www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at) und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	7
Abstract	8
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	15
2 Ziele des Projektes	18
3 Beschreibung des Standes der Technik	19
4 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projektes)	24
5 Methoden	26
5.1 Analyse von Brennstoff, Staub und Kondensat	26
5.2 Untersuchung der Feuerfestmaterialien	27
5.2.1 Infusionstest	27
5.2.2 Fotografische Dokumentation	28
5.2.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie	28
5.3 Messgeräte und Datenerfassung	29
5.3.1 15 kW Feuerung	29
5.3.2 150 kW Feuerung	30
5.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung	31
5.4.1 Investitionsrechnung – Annuitätenmethode	31
5.4.2 Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Heizsystemen anhand der ÖNORM M 7140	31
5.4.3 Sensitivitätsanalysen	32
6 Materialien, Anlagen- und Versuchsbeschreibung	33
6.1 Brennstoff	33

6.2	Feuerfestmaterialien	34
6.3	15 kW Strohfeuerungsanlage mit Sekundärwärmetauscher	35
6.3.1	Anlagenbeschreibung und Versuchsaufbau	35
6.3.2	Position der Feuerfestproben	37
6.3.3	Versuchsbeschreibung	38
6.4	150 kW Strohfeuerungsanlage	41
6.4.1	Beschreibung der Feuerung	41
6.4.2	Position der Feuerfestproben	43
6.4.3	Versuchsprogramm	44
7	Ergebnisse	45
7.1	Eigenschaften der Versuchsbrennstoffe	45
7.1.1	Vorversuche zur Additivauswahl	45
7.1.2	Versuchsbrennstoffe	46
7.1.3	Zusammenfassung Brennstoffe	50
7.2	Ermittlung und Bewertung der Langzeitbeständigkeit von Feuerfestmaterial	50
7.2.1	Einflussnahme durch den Einsatz von Additiven	50
7.2.2	Einfluss der Betriebsbedingungen	53
7.2.3	Vergleich der Feuerfestmaterialien untereinander	56
7.2.4	Zusammenfassung Korrosion	58
7.3	Ermittlung und Bewertung der Emissionen aus KFAs die mit Strohpellets betrieben werden	59
7.3.1	Reduktionspotential von NO <sub>x</sub> und partikelförmigen Emissionen durch Primärmaßnahmen	59
7.3.2	Reduktionspotential von NO <sub>x</sub> und partikelförmigen Emissionen durch Einsatz eine Sekundärwärmetauschers mit Wäscherfunktion	64
7.4	Wirtschaftliche Bewertung der Nutzung von Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen	75
7.4.1	Grundkalkulation	75
7.4.2	Sensitivitätsanalysen	83
7.4.3	Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit	88
8	Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie	90
8.1	Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie	90
8.2	Beitrag zu den 7 Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung	91
8.3	Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	93



8.4	Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotential) für die Projektergebnisse	94
8.5	Potential für Demonstrationsvorhaben – Chancen, Schwierigkeiten, Risiken bei der Realisierung und Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt	96
9	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	96
9.1	Fachlichen Erkenntnisse für das Projektteam	96
9.2	Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?	99
9.3	Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?	100
10	Ausblick	102
11	Referenzen	104
11.1	Literaturverzeichnis	104
11.2	Normen und Gesetze	107
11.3	Abbildungsverzeichnis	108
11.4	Tabellenverzeichnis	109
12	Anhang	111
12.1	Ergebnisse der Infusionstests	111
12.2	Analysenergebnisse der Pellets aus den Vorversuchen	115
12.3	Analysenergebnisse der Pellets aus den Verbrennungsversuchen	116
12.4	Kondensatanalysen	117
12.5	Wirtschaftlichkeitsrechnung	118



## Kurzfassung

Stroh weist im Vergleich zum etablierten Biomassebrennstoff Holz stark variierende Eigenschaften auf. Vor allem hohe Aschegehalte, niedrige Ascheerweichungstemperaturen sowie problematische Inhaltsstoffe (z.B. S, Cl, K,...) führen oftmals zu hohen Emissionen oder Störungen durch Schlackebildung oder Korrosion.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Verbrennungsverhalten von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen untersucht. Im Hinblick auf Korrosionsreaktionen werden dabei Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Feuerfestmaterial untersucht, indem Pellets mit unterschiedlichen Additiven in Brennkammern aus verschiedenen Feuerfestmaterialien eingesetzt werden. Des Weiteren wird die Beschaffenheit der Materialien in Abhängigkeit von den Bedingungen im Brennraum (Gasatmosphäre, Temperatur) untersucht.

Ein weiterer Projektschwerpunkt ist die Untersuchung gas- und partikelförmiger Emissionen, und deren Einflussnahme durch Variation verbrennungsseitiger Parameter wie Luftstufung, Luftüberschuss und Rauchgasrezirkulation. Des Weiteren wird das Potential zur Reduktion dieser Emissionen durch den Einsatz eines Sekundärwärmetauschers mit integriertem Wäscher (dem *Schröder Hydrocube*<sup>®</sup>) getestet, wobei die Betriebsbedingungen sowohl der Feuerung, als auch des Wärmetauschersystems variiert werden.

Bei der Rohstoffbeschaffung und –aufbereitung wurde sorgfältig vorgegangen. Dennoch sind starke Schwankungen, vor allem hinsichtlich des Aschegehalts messbar, welche – trotz Additivbeimengung – starken Einfluss auf die Verbrennungseigenschaften zeigen.

Als einflussstärkste Korrosionsparameter können bei vergleichbaren Versuchsbedingungen Brennstoffzusammensetzung, Zusammensetzung des Feuerfestmaterials und die Brennraumtemperatur identifiziert werden. Der direkte Kontakt zwischen Werkstoff und Schlacke zeigt gegenüber dem Kontakt mit der Gasphase im Brennraum in der relativ kurzen Betriebsdauer keinen signifikanten Einfluss auf den Korrosionsgrad des Materials, welcher anhand der Eindringtiefe von Kaliumionen ins Material beurteilt wurde.

Mit zunehmendem Rauchgasrezirkulationsstrom wird eine deutliche Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen erreicht. Die Staubemissionen zeigen trotz niedriger CO-Emissionswerte eine Korrelation mit dem Gasphasenausbrand. Des Weiteren ist eine Staubreduktion mit zunehmendem Sekundärluftanteil sowie bei reduziertem Luftüberschuss zu beobachten.

Partikelförmige Emissionen werden durch die Anwendung des Hydrocube<sup>®</sup> um 20 – 25% reduziert, wobei die Abscheidung des Feinstaubes vor allem im Kondensationswärmetauscher stattfindet. Durch zusätzliche Implementierung einer Elektrode in das Wärmetauschersystem wird die Abscheidewirkung auf bis zu 65% erhöht. Schwefel- und chlorhaltige Komponenten im Abgas werden bei Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup> deutlich verringert.

## Abstract

Compared to wood, straw shows strong variations with regard to combustion relevant fuel properties. In particular, the high ash content combined with often unfavorable ash melting properties and high concentrations of problematic elements (e.g. N, S, Cl, K,...) often lead to increased emissions or a breakdown due to slag formation or corrosive attacks on boiler materials.

In the presented work, combustion experiments are conducted in a 15 kW and a 150 kW boiler respectively. Gaseous and particulate emissions are measured and the effect of varying operating conditions in terms of air staging, air ratio and flue gas circulation on the emission values is observed. Moreover, a novel heat exchanger technology – the *Schröder Hydrocube*<sup>®</sup> – is investigated focusing on the potential to reduce these emissions.

Another topic in the presented project is the investigation of corrosive attacks on refractory materials in the combustion chamber. In order to study fuel ash – material – interactions, pellets with different types of additives are used in combustion chambers made of varied refractory. Furthermore, corrosive effects are investigated related to the conditions in the combustion chamber, taking into account that atmosphere and temperature vary dependent to the particular position.

The raw material has been harvested and processed under well controlled conditions. Even though, strong variations with regard to fuel quality can be observed, particularly regarding the ash content and some ash forming elements respectively.

The composition of the fuel as well as of the refractory material together with the combustion chamber temperature represents the most important parameters of corrosion of the refractory material. Furthermore it could be found that for relatively short hours of service the parameters of combustion atmosphere and the interaction of slag with the refractory material don't have significant impact on the degree of material corrosion.

NO<sub>x</sub>-emissions are reduced significantly with increasing flue gas recirculation. Dust emissions showed a clear correlation with the burnout of the flue gas, although CO-emissions in general were very low. Moreover, a decrease of dust emissions with an increasing percentage of secondary air and less excess air could be observed.

Particulate emissions could be reduced by 20 - 25% using the *Hydrocube*<sup>®</sup>, and the main separation effect of fine particles was identified to be due to the heat exchanger part of the system. Though reducing most particle fractions, a strong increase of the smallest fraction of 30 nm was measured. Applying the same system with an additional electronic charger, the separation efficiency was increased up to 65%. A significant reduction of HCl and SO<sub>2</sub> emissions could be observed in all experiments using the *Hydrocube*<sup>®</sup>.

## Zusammenfassung

### Ausgangssituation

Erneuerbare Energieträger zur Wärmeengewinnung haben in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erlebt. Ursache dafür sind vor allem die stetig steigenden Rohstoffkosten für fossile Brennstoffe sowie die Notwendigkeit zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Effizienzsteigerung und niedrige Emissionen - vor allem aber die Entwicklung automatischer und somit komfortabler Regelungs- und Bedienungssysteme haben bei Biomasseheizungen im kleinen Leistungsbereich kontinuierlich zu steigenden Verkaufszahlen geführt.

Die zunehmende Zahl an Biomassefeuerungen führt gleichzeitig zu einem erhöhten Bedarf an geeigneten Brennstoffen. Im stärker werdenden Wettbewerb mit anderen Industriesparten um den Rohstoff Holz gewinnen zunehmend auch alternative nachwachsende Rohstoffe, wie z.B. landwirtschaftliche Biomassen, für die Brennstoffproduktion an Bedeutung. Schnellwachsende Biomassen wie z.B. Einjahrespflanzen oder Kurzumtriebsholz weisen im Vergleich zum etablierten Biomassebrennstoff Holz jedoch stark variierende Eigenschaften auf, wie geringe volumenbezogene Energiedichte, hohe Aschegehalte, niedrige Ascheerweichungstemperaturen sowie problematische Inhaltsstoffe (wie z.B. N, S, Cl, K,...). Diese Parameter nehmen starken Einfluss auf das Verbrennungsverhalten der Rohstoffe, und führen vielfach zu aschebedingten Problemen, Korrosionserscheinungen oder erhöhten Emissionswerten.

Über Reaktionsmechanismen und die relevanten Einflussgrößen bei der Korrosion von Feuerfestwerkstoffen stehen kaum Daten zur Verfügung. Der zerstörende Einfluss von Alkalimetallen, welche in den Werkstoff eindringen und durch Phasenumwandlungen zu Absprengungen führen (alkali bursting) ist prinzipiell bekannt und anhand einiger praktischer Beispiele dokumentiert [Montgomery 2002a, Montgomery 2002b]. Die Parameter, welche das Eindringen dieser Elemente beeinflussen, sind jedoch kaum erforscht. Hier fehlen grundlegende Untersuchungen als Ausgangspunkt für eine Weiterentwicklung der Materialien.

Durch geeignete Brennraumgestaltung und feuerungstechnische Maßnahmen konnte die Qualität von Holzfeuerungen in den letzten Jahren erheblich verbessert werden [Lasselsberger 2000]. Die geplante weitere Verschärfung der Emissionsgrenzwerte gemeinsam mit der Ausweitung des Spektrums an verwendeten Rohstoffen stellt große Herausforderungen an die Weiterentwicklung der Feuerungstechnologien. In diesem Zusammenhang werden zunehmend auch Systeme aus dem Bereich der Sekundärmaßnahmen (z.B. Staubabscheidung) in Betracht gezogen.

### Inhalte und Zielsetzungen

Im vorliegenden Projekt werden die Verbrennungseigenschaften von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen untersucht. Ziele dabei sind

- Das Messen und Bewerten von Emissionen aus zwei mit Strohpellets betriebenen Kleinf Feuerungsanlagen (15 kW und 150 kW).
- Die Untersuchung und Bewertung von Einflussparametern auf Korrosionserscheinungen an Feuerfestwerkstoffen im Brennraum.
- Die Bewertung des Reduktionspotentials durch Primärmaßnahmen wie gezielter Einsatz von Luftstufung, Optimierung des Luftüberschusses sowie Rauchgasrezirkulation.
- Die Untersuchung einer Technologie zur Abgasnachbehandlung für Kleinf Feuerungsanlagen.
- Die wirtschaftliche Bewertung der Nutzung von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen.

### Methodische Vorgehensweise

Es werden Verbrennungsversuche mit Strohpellets an zwei Feuerungen (150 kW und 15 kW Nennlast) mit unterschiedlicher Brennertechnologie durchgeführt. Dabei werden sowohl gas- als auch partikelförmige Emissionen gemessen. In einzelnen Fällen wird darüber hinaus die Partikelgrößenverteilung ermittelt und die chemische Zusammensetzung der Proben bestimmt.

Für die Korrosionsuntersuchungen werden Pellets mit unterschiedlichen Additiven in Brennkammern aus verschiedenen Feuerfestmaterialien eingesetzt. Auf diese Weise wird zum einen ein Vergleich verschiedener Werkstoffe ermöglicht. Zum anderen wird eine mögliche Einbindung schädlicher Elemente bzw. Verbindungen durch die Beimengung von Additiven untersucht. Über verschiedene Probenahmestellen wird die Beschaffenheit der Materialien in Abhängigkeit von den Bedingungen im Brennraum (Gasatmosphäre, Temperatur, direkter Kontakt mit Schlacke) verglichen.

Der Einfluss der Variation von Luftstufung, Luftüberschuss sowie Rauchgasrezirkulation auf die Emissionsbildung wird in der 150 kW Feuerung untersucht. An einer 15 kW Prototyp Feuerung werden Tests mit einem Sekundärwärmetauscher mit integriertem Wäscher durchgeführt. Neben den freigesetzten Emissionen wird dabei auch die Qualität des gebildeten Kondensats untersucht.

Eine wirtschaftliche Betrachtung bildet die Basis für eine Abschätzung, ab welcher Nennleistung der Feuerungsanlage der Einsatz von Strohpellets gegenüber anderen Brennstoffen ökonomisch interessant sein kann. Kritischen Größen hinsichtlich der

Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Strohpellets werden über eine nachfolgende Sensitivitätsanalyse untersucht.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

### **Brennstoffe**

Die Analysen der Versuchsbrennstoffe zeigen starke Schwankungen, vor allem bezüglich des Aschegehalts bzw. der Konzentration einzelner Aschebildner (v.a. Kalium und Silizium). Die Ursache dafür ist in der Variation der Rohstoffqualität zu suchen. Obwohl bei Ernte und Bereitstellung des Rohstoffs besonders sorgfältig vorgegangen wurde, und der Rohstoff von einem Feld stammt, ist – selbst bei *Strohpellets ohne Additiv* – eine Differenz von 3% absolut im Aschegehalt der Pelletsproben messbar. Die Additivbeimengung spiegelt sich in der Elementarzusammensetzung wider, jedoch wird diese stark durch die Schwankungen der Rohstoffqualität beeinflusst und teilweise sogar überlagert.

### **Korrosion**

Alle getesteten Feuerfestmaterialien erweisen sich während der gewählten Betriebsdauer von 300 h als gut geeignet. Durch optische Bewertung können in diesem Zeitraum keine signifikanten Unterschiede in der Leistungsfähigkeit oder gar ein Versagen eines der Materialien festgestellt werden. Untersuchungen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie zeigen Unterschiede im Infiltrationspotential der verschiedenen Materialien mit Kalium- und Chloridionen. Diese Ionen zeigen sich in hohem Maße verantwortlich für Korrosion und damit einhergehendes Materialversagen bei Feuerfestwerkstoffen. Durch einen Vergleich der Eindringtiefen dieser Elemente bei variierenden Versuchsbedingungen (Brennstoff, Werkstoff, Feuerung, Position) können vor allem die Brennstoffzusammensetzung, die Zusammensetzung des Feuerfestmaterials und die Brennraumtemperatur als entscheidende Korrosionsfaktoren identifiziert werden. Der direkte Kontakt zwischen Werkstoff und Schlacke zeigt gegenüber dem Kontakt mit der Gasphase im Brennraum in der relativ kurzen Betriebsdauer keinen signifikanten Einfluss auf den Korrosionsgrad des Materials, gemessen als Eindringtiefe der Elemente Kalium und Chlor in die Materialoberfläche.

### **Emissionen - Primärmaßnahmen**

Beide Anlagen zeigen einen guten Gasphasenausbrand. Die CO-Emissionen liegen bei beiden Feuerungen im Mittel deutlich unter 100 mg/MJ.

Auch die Staubemissionen liegen in einem sehr niedrigen Bereich im Vergleich zu bisherigen Messungen und Ergebnissen aus der Literatur [Wopienka 2006b, Turowski 2008], wozu auch der gute Gasphasenausbrand beiträgt. Bei der 150 kW Anlage liegen die Gesamtstaubmengen bei 25 – 45 mg/MJ, bei der 15 kW Anlage bewegen sie sich im Bereich von 60 – 90 mg/MJ. Der Grenzwert von 60 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen

und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)] kann somit von der 150 kW Anlage eingehalten werden, bei der 15 kW Feuerung wird der Grenzwert knapp überschritten.

Sowohl der Luftüberschuss als auch die rezirkulierte Abgasmenge zeigen einen Einfluss auf die Bildung von Stickoxidemissionen. Dabei nimmt der Stickstofffreisetzungsgrad mit zunehmendem Rauchgasrezirkulationsstrom ab, sodass – ohne weitere Optimierung – eine Reduktion der Emissionen von ca. 15 – 20% erreicht wird.

Trotz niedriger CO-Emissionen (im Mittel bei 40 – 60 mg/MJ) ist ein Zusammenhang der Staubemissionen mit dem Gasphasenausbrand feststellbar. Eine Variation der Anlageneinstellungen zeigt eine Abnahme der Emissionswerte mit zunehmendem Sekundärluftanteil sowie mit abnehmendem Luftüberschuss.

### **Emissionen – Einsatz eines sekundären Partikelabscheiders**

Tests mit dem *Hydrocube*<sup>®</sup> (Wärmetauscher plus Sprühwäscher) ergeben einen Abscheidegrad von etwa 20%, welcher durch die zusätzliche Implementierung einer Elektrode auf 65% gesteigert wird. Die Untersuchung der Wirksamkeit der einzelnen Anlagenteile bestätigt, dass die Hauptabtrennung des Feinstaubes im Wärmetauscher des Systems erfolgt, und der Wäscher im Bereich größerer Partikel wirksam ist. SO<sub>2</sub>- und HCl-Konzentrationen im Abgas werden durch Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup> deutlich reduziert.

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung zeigt einen deutlichen Anstieg der Partikelfraktion mit 30 nm. Eine mögliche Erklärung für diesen Zuwachs der Partikelzahl ist, dass sich einzelne Komponenten in den durch Kondensation gebildeten Aerosoltröpfchen lösen, woraus dann in weiterer Folge durch Trocknung Partikel entstehen [Schwabl 2008]. Eine Absicherung dieser Hypothese ist im Rahmen der Projektarbeit nicht möglich.

Das Kondensat aus dem Abgas weist teils beträchtliche Konzentrationen einzelner aschebildender Elemente sowie einen niedrigen pH-Wert auf. Eine Gegenüberstellung mit den gesetzlichen Anforderungen an Kondensate aus mit Holz betriebenen Brennvorgängen, zeigt bereits nach wenigen Betriebsstunden eine Überschreitung in Hinblick auf einzelne Elementkonzentrationen.

Der Wirkungsgrad wird durch den Einsatz des Systems um etwa 10% erhöht.

### **Wirtschaftlichkeit**

Installation und Betrieb von Strohpelletsfeuerungen sind kapitalintensiver als für Holzpelletsanlagen. Des Weiteren sind erhöhte betriebsgebundene Kosten durch einen verstärkten Aufwand für die Wartung der Anlagen zu erwarten. Dies kann – bei den gegenwärtigen Preisen für Strohpellets – durch verbrauchsgebundene Kosten nicht ausgeglichen werden.

Bei Unterstellung einer gleich langen Lebensdauer aller betrachteten Systeme, und ohne Installation von Rauchgasreinigungssystemen, sind Strohpelletsfeuerungen gegenüber



Systemen mit Holzbrennstoffen in keinem Leistungsbereich konkurrenzfähig. Gegenüber Heizöhl leicht werden Strohpellets ab einem Leistungsbereich von 20-25 kW wirtschaftlich. Unter der Annahme des Austauschs des Wärmetauschers nach halber Nutzungsdauer verschiebt sich die Grenze der Wirtschaftlichkeit hin zu höheren Leistungsbereichen (von 75-80 kW), in denen die kapitalgebundenen Kosten geringere Bedeutung haben.

An der beschriebenen Rangfolge ändert sich auch bei Einbau von sekundären Rauchgasreinigungssystemen wenig. Am günstigsten bleiben Systeme mit Holzbrennstoffen, gefolgt von Strohpellets, die im Leistungsbereich 20-25 kW ähnliche Kosten verursachen wie Ölfeuerungen. Bei höheren Nennleistungen sind Strohpelletsfeuerungen selbst beim Einbau einer Rauchgasreinigung günstiger als Ölfeuerungen. Nichtsdestotrotz können bei einem Einbau von Wärmetauschern zur Abgasreinigung beträchtliche Mengen an Brennstoff eingespart werden und somit die Kosten gegenüber der Anlage ohne Abgasreinigung sogar gesenkt werden.

### **Ausblick**

Trotz der Einhaltung derzeit gültiger Emissionsgrenzwerte bestehen nach wie vor Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Anlagen die mit Strohpellets betrieben werden – vor allem aufgrund von Schlackebildung und Korrosion. Die wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass, aufgrund der genannten Problemstellungen, der Einsatz von Strohpellets vor allem in Anlagen ab einem Leistungsbereich von 75 kW und mehr zu bevorzugen ist, in denen auch der Einsatz von Maßnahmen zur Emissionsreduktion effizient ist.

Die Effizienz des Einsatzes von Strohpellets hängt als stark von der Größe der verwendeten Anlagen ab. Um diesbezüglich konkretere Aussagen treffen zu können, werden vor allem im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen mehr Informationen darüber benötigt, wie sich die Verwendung des Brennstoffes Stroh auf die Standzeiten der Anlagen bzw. einzelner Anlagenteile (vor allem in Hinblick auf Korrosion) auswirkt.

Unabhängig vom Leistungsbereich sind für einen zuverlässigen Betrieb von mit Strohpellets betriebenen Kleinf Feuerungsanlagen weiterführende Entwicklungen im Bereich von Rostsystemen und Ascheaustragseinrichtungen notwendig.

Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden empfohlen im Bereich der:

- Produktion von Brennstoffen mit definierten Eigenschaften (z.B. Mischpellets mit Stroh),
- Untersuchung des Verbrennungsverhaltens verschiedener Brennstoffe in Abhängigkeit von deren Brennstoffeigenschaften unter besonderer Beachtung des Freisetzungsverhaltens einzelner Bestandteile bzw. Komponenten,

- Korrosionsuntersuchungen im Rahmen von Langzeittests unter realen Verbrennungsbedingungen,
- Untersuchung von Sekundärmaßnahmen zur Emissionsreduktion und Bewertung ihrer Wirkungsweise bezüglich der abgeschiedenen Partikelgrößen und chemischen Verbindungen sowie
- Parameterstudie zur Optimierung der im *Hydrocube*<sup>®</sup> verwendeten Abscheideprinzipien sowie der Betriebseinstellungen.

## 1 Einleitung

Nachwachsende Rohstoffe als Brennstoff erfreuen sich besonders im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen stark steigender Marktanteile. Im stärker werdenden Wettbewerb mit anderen Industriesparten um den Rohstoff Holz gewinnen dabei zunehmend auch andere nachwachsende Rohstoffe wie z.B. landwirtschaftliche Biomassen an Bedeutung.

Schnellwachsende Biomassen wie z.B. Einjahrespflanzen oder Kurzumtriebsholz weisen im Vergleich zum etablierten Biomassebrennstoff Holz stark variierende Eigenschaften auf, wie geringe volumenbezogene Energiedichte, hohe Aschegehalte, niedrige Ascheerweichungstemperaturen, problematische Inhaltsstoffe (S, Cl, K,...) und hohe Stickstoffgehalte. Diese Parameter nehmen starken Einfluss auf das Verbrennungsverhalten der Biomassen und führen vielfach zu aschebedingten Problemen, Korrosionserscheinungen oder erhöhten Emissionswerten.

Bei Stroh sind einige der genannten Eigenschaften besonders ausgeprägt. Umfangreiche Untersuchungen als Basis für technologische Weiterentwicklungen sind daher vor allem im Bereich der Korrosion des Feuerfestmaterials sowie bei der Reduktion gas- und partikelförmiger Emissionen durch Primär- und Sekundärmaßnahmen gefragt. Emissionen können durch geeignete Brennraumgestaltung und feuerungstechnische Maßnahmen teils beträchtlich verringert werden. Auch Sekundärmaßnahmen (z.B. Staubabscheidung) können in Betracht gezogen werden, sofern sie kostengünstig sind, oder wenn durch sie ein Zusatznutzen (z.B. Steigerung des Wirkungsgrades) erzielt werden kann.

In vorangegangenen Projekten wurden bereits Untersuchungen mit Stroh als Brennstoff für Kleinf Feuerungsanlagen durchgeführt. Die größten Herausforderungen dabei bestanden darin, die Einstellungen sowie die Feuerung selbst dem inhomogenen Rohstoff sowie den niedrigen Ascheschmelztemperaturen und den daraus folgenden Verschlackungen, anzupassen. Verschiedene Vorarbeiten zu diesem Thema zeigen, dass durch die Beimengung mineralischer Additive bis zu einem gewissen Ausmaß eine Verbesserung der Ascheschmelzeigenschaften erzielt werden kann [Figl 2006, Hartmann 2000, Reisinger 1993, Steenari 1998, Wopienka 2005]. Aus Feldtests ist bekannt, dass Verschlackungen im Rostbereich in der Praxis oftmals durch eine Erhöhung der Luftzahl entgegengewirkt wird [Eder 2006], was in der Regel zu einem verschlechterten Ausbrand und höheren Emissionen sowie zu Einbußen hinsichtlich des Wirkungsgrades führt.

Untersuchungen an Feuerfestwerkstoffen aus dem Brennraum von Biomassekesseln haben gezeigt, dass einzelne Elemente in das Material eindringen und so die Zusammensetzung verändern können. Dieser Effekt wurde verstärkt bei den Elementen Kalium und Chlor beobachtet, welche vor allem in Stroh in hohen Konzentrationen vorliegen. In Feldtests wurden in Hinblick auf Korrosion sehr unterschiedliche Effekte beobachtet: In einigen Fällen

war ein starker Angriff bis hin zur sichtbaren Auflösung der Substanz zu beobachten, in anderen Feuerungen zeigten sich trotz des Betriebs mit Stroh über mehrere Jahre hinweg keine auffälligen Effekte [Eder 2006, Carvalho 2007]. Aufgrund der häufigen Störungen durch Verschlackungen waren systematische Versuche mit Stroh über eine längere Betriebsdauer nur schwer möglich. Konkrete Korrosionsmechanismen oder -reaktionen konnten bisher nicht identifiziert werden.

Emissionsmessungen ergaben für Stroh, im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Brennstoffen, stark erhöhte Werte, vor allem im Bereich der Kohlenmonoxid- und Staubemissionen [Carvalho 2007]. Die hohen Werte für Kohlenmonoxid traten meist gleichzeitig mit starken Verschlackungen im Rostbereich auf, und können auf eine dadurch verursachte Verschlechterung der Strömungsverhältnisse in der Verbrennungszone zurückgeführt werden. Staubemissionen lagen bei bisherigen Untersuchungen meist über 100 mg/MJ, oft jedoch bei einem Vielfachen des Grenzwerts von 60 mg/MJ nach Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006) [Carvalho 2007, Eder 2006, Turowski 2008].

In der vorliegenden Arbeit wird der Betrieb von Kleinf Feuerungsanlagen mit Strohpellets bewertet. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung von Korrosionserscheinungen an Feuerfestmaterialien im Brennraum. Im Vordergrund steht die Frage, inwiefern die Variation der Brennstoffzusammensetzung die Freisetzung korrosiver Komponenten und somit deren Reaktion mit dem Werkstoff beeinflussen kann. Darüber hinaus wird der Einfluss von Gasatmosphäre und Temperatur an Proben von verschiedenen Positionen im Brennraum untersucht.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Untersuchung gas- und partikelförmiger Emissionen und deren Reduktionspotential durch Primär- und Sekundärmaßnahmen. Dabei werden die Einflussmöglichkeiten durch Variation und Optimierung der Feuerungseinstellungen getestet, sowie die Wirksamkeit eines Abgaswärmetauschers mit Wäscher (der *Schröder Hydrocube*<sup>®</sup>) als Sekundärmaßnahme untersucht.

Stroh ist ein regional verfügbarer, erneuerbarer Energieträger, welcher als Reststoff der landwirtschaftlichen Produktion zur Verfügung steht. Durch die energetische Nutzung dieses Reststoffes wird der Grad der Ausnutzung der Getreidepflanzen erhöht. Die Verarbeitung zu Pellets erhöht Komfort und Zuverlässigkeit bei der Bereitstellung dieses Energieträgers, wodurch auch eine Erhöhung der Akzeptanz zu erwarten ist.

Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit zielen darauf ab, umwelt- sowie gesundheitsschädliche Emissionen aus der Verbrennung zu reduzieren. Die untersuchte Sekundärtechnologie zur Staubabscheidung wirkt darüber hinaus Effizienz steigernd durch ihre Funktion als Kondensationswärmetauscher.

Die Ergebnisse der Untersuchungen dienen als Basis, um Entscheidungen bezüglich einer sinnvollen Nutzung von Stroh im Zusammenspiel unterschiedlicher Energieträger treffen zu können.

Im Folgenden werden die Ziele des Projekts, sowie die Methode, die zu ihrer Erreichung gewählt wurde erläutert. Des Weiteren wird der Stand der Technik sowie die im Projekt erarbeiteten Neuerungen beschrieben. Darauf folgend werden die verwendeten Methoden erläutert, sowie Materialien und Versuchsanlagen beschrieben.

Den Hauptteil des vorliegenden Berichts bildet die Präsentation der Ergebnisse, welche auch hinsichtlich ihres Beitrags zur Programmlinie beleuchtet werden. Den Abschluss bilden Schlussfolgerungen zu den Ergebnissen sowie ein Ausblick, in dem vor allem Möglichkeiten zur Umsetzung sowie Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten behandelt werden.

## 2 Ziele des Projektes

Inhalt des Projektes ist die Untersuchung der Verbrennungseigenschaften von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen. Im Folgenden sind die Projektziele sowie die Methode zur Erreichung dieser Ziele kurz zusammengefasst.

### **Ermittlung und Bewertung der Emissionen aus mit Strohpellets betriebenen Kleinf Feuerungsanlagen**

In zwei Feuerungen mit unterschiedlicher Brennertechnologie – eine 15 kW Prototypfeuerung sowie der 150 kW TDS Powerfire der Fa. KWB – kommen Strohpellets mit verschiedenen Additiven zum Einsatz. Bei allen Versuchsvariationen und Betriebszuständen werden gasförmige Emissionen erfasst, sowie Gesamtstaubemissionen ermittelt. Bei einzelnen Versuchen an der 15 kW Feuerung werden darüber hinaus auch Messungen mittels ELPI (Electronic Low Pressure Impactor) durchgeführt, um die Partikelgrößenverteilung zu bestimmen. Ausgewählte Staubproben werden hinsichtlich ihrer Elementarzusammensetzung untersucht, um Informationen über die aus dem Brennstoff freigesetzten Bestandteile zu erhalten. Die Ergebnisse werden im Vergleich mit Daten aus vorangegangenen Projekten sowie mit Emissionen aus der Verbrennung anderer Biomassebrennstoffe bewertet.

### **Bewertung des Reduktionspotentials durch Primärmaßnahmen sowie eine Technologie zur Abgasnachbehandlung**

In Verbrennungsversuchen an einer 150 kW Feuerung wird der Einfluss der Variation von Luftstufung, Luftüberschuss sowie Rauchgasrezirkulation auf die Bildung von Emissionen untersucht. Hauptaugenmerk liegt dabei vor allem auf Stickoxidemissionen, aber auch partikelförmige Emissionen werden gemessen.

Der *Hydrocube*<sup>®</sup> der Fa. Schröder – ein Sekundärwärmetauscher mit integriertem Wäscher - wird als Sekundärmaßnahme zur Emissionsreduktion an einer 15 kW Prototyp Feuerung getestet. Dabei werden die Betriebsbedingungen des Systems variiert, um die Wirkungsweise der einzelnen Komponenten (Wärmetauscher, Wäscher) zu untersuchen. Eine chemische Analyse einzelner Staubproben sowie des entstandenen Abgaskondensats dient der Bilanzierung der freigesetzten Elemente zum einen, sowie einer Bewertung der Kondensatqualität in Hinblick auf die Einleitung in das kommunale Abwassersystem. Ein Vergleich mit Ergebnissen aus der Verbrennung von Holz zeigt Problemstellungen und Herausforderungen in Zusammenhang mit der Verwendung des Brennstoffs Stroh auf.

## **Untersuchung und Bewertung von Einflussparametern auf Korrosionserscheinungen an Feuerfestwerkstoffen im Brennraum**

Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Brennstoff und Feuerfestmaterial werden Pellets mit unterschiedlichen Additiven in Brennkammern aus verschiedenen Feuerfestmaterialien eingesetzt. Die Proben ermöglichen einen Vergleich der Langzeitbeständigkeit der einzelnen Materialien. Des Weiteren wird der Einfluss der beigemengten Additive auf die Freisetzung korrosiv wirkender Elemente und Verbindungen, und damit auf das Korrosionsverhalten in Abhängigkeit von der Brennstoffzusammensetzung, getestet.

Um den Einfluss der Betriebsbedingungen zu untersuchen, werden Proben an verschiedenen Stellen im Brennraum angebracht. Gewählt werden Positionen, an denen sehr unterschiedliche Bedingungen, vor allem in Bezug auf vorherrschende Gasatmosphäre (oxidierend/reduzierend) und Temperatur, zu erwarten sind.

## **Wirtschaftliche Bewertung der Nutzung von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen**

Über eine wirtschaftliche Betrachtung wird eine Abschätzung vorgenommen, ab welcher Nennleistung der Feuerungsanlage der Einsatz von Strohpellets gegenüber anderen Brennstoffen ökonomisch interessant sein kann. Eine nachfolgende Sensitivitätsanalyse beschreibt die kritischen Größen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Strohpellets.

# **3 Beschreibung des Standes der Technik**

## **Landwirtschaftliche Roh- und Reststoffe als Brennstoff für Kleinf Feuerungsanlagen**

Schnellwachsende Biomassen wie z.B. Einjahrespflanzen oder Kurzumtriebsholz weisen aufgrund ihrer Physiologie, aber auch beeinflusst durch Faktoren wie z.B. Düngung, Standort und Erntezeitpunkt, stark variierende Eigenschaften im Vergleich zu Holz auf. Von besonderer Relevanz, vor allem in Hinblick auf die Verwendung als Brennstoff, sind neben dem hohen Aschegehalt und der geringeren Energiedichte auch höhere Konzentrationen an Stickstoff, Schwefel und Chlor in diesen Rohstoffen.

Große Aschemengen in Verbindung mit meist niedrigeren Ascheschmelztemperaturen können Verschlackungen im Brennraum verursachen. Auch Ablagerungen im Brennraum sowie im Bereich des Wärmetauschers sind dadurch begünstigt. Erhöhte Konzentrationen an Schwefel, Stickstoff und Chlor führen zu einer verstärkten Freisetzung von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und

Chlorverbindungen. Chlor und Schwefel fördern auch die Bildung von Ablagerungen und sind bei Korrosionsreaktionen an Metall und keramischen Materialien beteiligt.

Stroh steht bei der Suche nach alternativen Rohstoffen nicht im Vordergrund, wird jedoch aufgrund vieler ähnlicher Fragestellungen im Sog anderer Brennstoffe (v.a. Energiepflanzen wie Miscanthus und Energiekorn) mitentwickelt. Die veränderten Verhältnisse auf den Märkten für landwirtschaftliche Produkte, die wie erwähnt auch einen deutlich höheren Preis für Getreide bewirken, könnten die zukünftige Schwerpunktsetzung möglicherweise umkehren; d.h. weg von Energiepflanzen, hin zu Stroh als Nebenprodukt der Getreideproduktion. Erste Anstrengungen zur Herstellung von Briketts für den Einsatz in automatisch beschickten Kleinf Feuerungsanlagen sind im Gange und Erfolg versprechend [Eder 2008].

Für die Versorgung erster Feuerungsanlagen, die besonders im Zuge von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit Strohpellets beschickt werden, steht in Österreich eine Pelletieranlage mit einer Kapazität von ca. 15.000 t/a zur Verfügung, die primär der Produktion von Pferdeeinstreu dient. Bei dieser Pelletieranlage ist außerdem die Zugabe von festen und flüssigen Additiven möglich. Ansonsten beschränken sich die Aktivitäten bei der Pelletierung von Stroh auf Initiativen einzelner Landwirte oder bäuerlicher Gemeinschaften mit geringer Bedeutung für den Strohpelletsmarkt.

### **Gesetzlicher Rahmen - Brennstoffstandardisierung**

Auf Europäischer Ebene sind sämtliche Biomasserohstoffe hinsichtlich Rohstoffart und – sortiment sowie aufgrund ihrer Brennstoffeigenschaften klassifiziert [CEN/TS 14961]. Produktnormen mit Grenzwerten für einzelne Brennstoffe sind nicht verfügbar.

In Österreich wurden in den letzten Jahren, neben der bereits etablierten ÖNORM M 7135 (Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde – Pellets und Briketts), auch Produktstandards für andere Biomassebrennstoffe wie z.B. Energiekorn [VORNORM ÖNORM M 7139], Miscanthuspresslinge [VORNORM ÖNORM C 4000] und Miscanthushäcksel [VORNORM ÖNORM C 4001] erstellt. Diese Normen für Nischholzbrennstoffe basieren auf den Klassen der CEN/TS 14961. Für Stroh brennstoffe existieren derzeit keine Produktnormen. Das zuständige nationale Normungsgremium beabsichtigt die Erstellung von Normen für Strohpresslinge, sobald diese vom Brennstoffmarkt verlangt werden.

### **Gesetzlicher Rahmen - Emissionsgrenzwerte**

Gesetzliche Regelungen bezüglich der Emissionen fallen in die Kompetenz der Länder und sind über Vereinbarungen gemäß Art. 15 a B-VG festgelegt. In Österreich dürfen demnach nur Feuerungen für den Hausbrand in Verkehr gebracht werden, die den Anforderungen gemäß Art. 15 a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinf Feuerungen (1998) und den



geforderten Wirkungsgraden aus der Art. 15 a B-VG über die „Einsparung von Energie (1995) entsprechen. Für gewerbliche Betriebsanlagen gilt die Feuerungsanlagen-Verordnung – FAV über die Bauart, die Betriebsweise, die Ausstattung und das zulässige Ausmaß der Emission von Anlagen zur Verfeuerung fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe.

Die Nutzung von Nichtholzbiobrennstoffen wie z.B. Strohpellets, Landschaftspflegeheu, Energiekorn, Miscanthus, usw. ist in den oben angeführten gesetzlichen Regelungen nur ungenügend berücksichtigt. In den vergangenen zwei Jahren wurde der Entwurf Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006) ausgearbeitet. In diesem Entwurf werden erstmalig auch so genannte *sonstige standardisierte biogene Brennstoffe* berücksichtigt. Damit existiert nun eine gesetzliche Grundlage für die Überprüfung von Feuerungsanlagen im Betrieb mit standardisierten nicht holzartigen biogenen Festbrennstoffen. Die Grenzwerte für automatisch beschickte Feuerungsanlagen liegen bei 500 mg/MJ für CO, 300 mg/MJ für NO<sub>x</sub>, 30 mg/MJ für OGC<sup>1</sup> und 60 mg/MJ für Staub<sup>2</sup>.

### **Verbrennungstechnologie**

Die energetische Nutzung von Stroh hat in Österreich zwar langjährige Tradition, doch lagen Euphorie und Ernüchterung beim Einsatz dieses Brennstoffes oft eng beieinander. In den 1980er Jahren entwickelte sich ein verhältnismäßig großer Markt bei Kleinf Feuerungsanlagen, die mit kleinen Hochdruckballen händisch beschickt wurden. Diese Anlagen waren technisch nicht ausgereift und wurden vor allem in landwirtschaftlichen Betrieben installiert, bei denen Stroh auf den eigenen Feldern anfiel. In der Anfangsphase dieser Entwicklung wurden diese Anlagen teilweise von öffentlicher Hand gefördert, später jedoch – vor allem aufgrund der hohen auftretenden Emissionen – sogar verboten. Zudem traten bei diesen Feuerungen häufig bereits nach wenigen Jahren Einsatzdauer schwere Korrosionserscheinungen auf.

Mitte der 1980er startete man mit der Installation mittelgroßer bis großer Feuerungsanlagen im Leistungsbereich von etwa 0,5 MW bis 5 MW, meist zur Beheizung von Objekten, die über ein Fernwärmenetz versorgt wurden. Diese Anlagen wurden hauptsächlich mit Quaderballen beschickt und waren technisch meist gut konzipiert. Entsprechende Sekundärmaßnahmen zur Rauchgasreinigung führten zu geringeren Emissionen als bei Kleinanlagen [Bundesanstalt für Landtechnik 1995]. Diese Anlagen sind heute zum Teil noch in Betrieb, zum Teil wurden sie aus wirtschaftlichen Gründen stillgelegt. Grund dafür war unter anderem die unzureichende Erfahrung in der Konzeption und Dimensionierung von Fernheizwerken, unabhängig vom eingesetzten Brennstoff.

Gegenwärtig konzentrieren sich die Entwicklungen für den Einsatz von landwirtschaftlichen Brennstoffen wieder vermehrt auf den Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen bis zu einem

---

<sup>1</sup> ab 2015 20 mg/MJ

<sup>2</sup> ab 2015 35 mg/MJ

Leistungsbereich von etwa 300 kW. Stroh steht dabei nicht primär im Vordergrund wird jedoch aufgrund vieler ähnlicher Fragestellungen im Sog anderer Brennstoffe (v.a. Energiepflanzen wie Miscanthus und Energiekorn) mitentwickelt.

Vor allem in Spanien, England, Dänemark und Schweden vor allem aber in Skandinavien, werden Strohpellets hauptsächlich in Großfeuerungsanlagen genutzt [Thrän 2008]. Wegen der günstigen Rahmenbedingungen werden Strohpellets in Dänemark auch zur Erzeugung von Strom verwendet. So wurde im Jahr 2006 etwa ein Drittel des energetisch genutzten Strohs in Kraftwerken eingesetzt [Nikolaisen 2008].

### **Emissionsreduktion**

Seit den 1980er Jahren ist die Qualität von Biomassefeuerungen hinsichtlich der freigesetzten Emissionen deutlich gestiegen (vgl. Lasselsberger 2000). Angetrieben durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen wurden Biomassefeuerungen laufend verbessert, sodass die derzeitigen Verbrennungsanlagen auf hohem Niveau arbeiten. Weitere geplante Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte stellen diesbezüglich neue Herausforderungen dar, und machen Weiterentwicklungen in der Verbrennungstechnologie notwendig.

Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung sind vor allem aus dem Bereich der größeren Feuerungsanlagen bekannt. Aber auch im kleinen Leistungsbereich wurden Konzepte zur Reduktion der Emissionen erarbeitet. So besteht z.B. die Möglichkeit der NO<sub>x</sub>-Reduktion durch eine kontrollierte Zugabe der Primär- und Sekundärlufmengen, sowie durch den Einsatz von Rauchgasrezirkulation [Nussbaumer 2003]. Durch geeignete Luftstufung kann neben einer Reduktion von CO und NO<sub>x</sub> im Abgas auch die Staubfracht deutlich reduziert werden (*low-particle concept*) [Oser 2004]. Die genannten Konzepte sind in Biomassekleinfeuerungen derzeit nur teilweise umgesetzt. Durch eine konsequente Implementierung in die am Markt verfügbaren Technologien ist eine weitere Reduktion der Emissionswerte denkbar.

In Anbetracht der verfügbaren Brennstoffqualitäten sowie der geplanten weiteren Verschärfung der Emissionsgrenzwerte, wird in einigen Bereichen auch die Anwendung von Sekundärmaßnahmen notwendig sein. Diesbezüglich sind im Bereich der Kleinfeuerungsanlagen zurzeit vor allem Elektroabscheider sowie Brennwertwärmetauscher mit und ohne Abgaswäscher zur Staubreduktion im Einsatz. Auch an der Entwicklung von Katalysatoren zur Senkung der CO und NO<sub>x</sub> Emissionen wird gearbeitet. [Sattler 2007]

### **Feuerfestwerkstoffe**

Der Markt für Materialien, welche besonders hohen werkstofflichen Anforderungen ausgesetzt sind, ist groß in einer Zeit die immer ausgefeiltere und anspruchsvollere Technologien hervorbringt. Das Angebot an verschiedensten Materialien ist fast ebenso vielfältig, wie die Zahl der Anwendungsmöglichkeiten, die nach diesen Werkstoffen verlangt.

Überraschend ist daher, wie wenig Wissen über die auslösenden Mechanismen von Materialkorrosion an Feuerfestmaterialien verfügbar ist. Gerade die Anwendung in Feuerungstechnologien stellt die verwendeten Materialien auf eine besonders hohe Belastungsprobe. Während es eine Vielzahl an Veröffentlichungen über Korrosion an Wärmetauschern bei Strohfeuerungsanlagen gibt [Hansen 2000, Montgomery 2002a, Montgomery 2002b], gibt es nur wenig Literatur über die Korrosion an Feuerfestmaterialien allgemein [Rezaie 2004].

## **4 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projektes)**

### **Bewertung des Brennstoffs Strohpellets**

Im Zuge des Projekts werden große Mengen an Stroh unter kontrollierten Bedingungen geerntet, aufbereitet und verarbeitet. Ergebnisse aus der Untersuchung mehrerer Rohstoffproben lassen abschätzen, mit welchen Schwankungen gerechnet werden muss, ohne dass unterschiedliche Rahmenbedingungen in Bezug auf den Boden oder den Erntezeitpunkt vorliegen. Darüber hinaus werden Informationen gewonnen, ob durch Pelletierung von Stroh unter Beimengung von Additiven gezielt ein Produkt mit bestimmten Eigenschaften hergestellt werden kann und inwiefern die Eigenschaften des Rohstoffs beeinflusst werden können.

### **Systematische Untersuchung von Staubemissionen**

Über Emissionen aus der Verbrennung von Stroh bzw. Strohpellets im kleinen Leistungsbereich liegen vorwiegend Daten und Erfahrungswerte aus Feldtests vor. Im Rahmen des Projekts wurde eine Vielzahl von Versuchen unter kontrollierten Bedingungen im Technikum durchgeführt. Die Vielzahl an Messwerten erhöht die Vergleichbarkeit, sodass Einflussgrößen wie z.B. der Betriebszustand der Feuerung besser bewertet werden können. Darüber hinaus werden Informationen durch die Verknüpfung der Ergebnisse der Gesamtstaubmessung, der Partikelgrößenverteilung sowie chemischer Untersuchungen von Brennstoff und Staubproben gewonnen.

### **Weitere Verbesserung von Kleinf Feuerungstechnologien**

Die Resultate der Messungen an beiden Feuerungen zeigen, dass eine Verbrennung von Strohpellets bei sehr gutem Gasphasenausbrand möglich ist. Auch der geplanten Grenzwerts für Staubemissionen nach Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006) kann eingehalten werden. Des Weiteren wird deutlich, dass auch bei technologisch sehr hoch entwickelten Feuerungen eine weitere Verbesserung und Optimierung, vor allem in Hinblick auf Stickoxidemissionen, möglich ist.

### **Umfassende Betrachtung einer Abscheidetechnologie**

Als Sekundärmaßnahmen zur Staubabscheidung stehen im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen zurzeit vor allem einfach gebaute Elektroabscheider sowie Kondensatwärmetauscher mit und ohne Wäscher zur Verfügung [Sattler 2007].

Untersuchungen bezüglich der Abscheidewirkung dieser Systeme wurden vor allem mit Holzbrennstoffen durchgeführt. In einzelnen Fällen sind auch Daten aus der Verbrennung nicht holzartiger Biomassen verfügbar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Abscheidewirkung eines Kondensatwärmetauschers mit Wäscher untersucht. Dabei werden nicht nur partikelförmige sondern auch gasförmige Emissionen berücksichtigt, wobei nicht ausschließlich auf die Abscheidewirkung fokussiert wird, sondern auch die Qualität der freigesetzten Abwasseremissionen untersucht. Über Elementbilanzen können so Rückschlüsse dahingehend gezogen werden, zu welchen Anteilen und in welcher Form einzelne Brennstoffbestandteile bei der Verbrennung freigesetzt werden. Zusätzlich zu einer Bewertung der Abscheidewirkung können daraus neue Erkenntnisse hinsichtlich der Kondensatqualität aus Brennwertwärmetauschern bei der Verwendung nicht holzartiger Biomassen – vor allem halmgutartiger Brennstoffe - und den damit in Zusammenhang stehenden potentiellen Problemstellungen gezogen werden.

### **Feuerfestwerkstoffe**

Erfahrungen mit Korrosionsvorgängen im Zusammenhang mit der Verbrennung problematischer Biomassebrennstoffe sind in der Literatur so gut wie nicht verfügbar. Einige wenige Veröffentlichungen zu diesem Thema beschäftigen sich mit sehr speziellen Problemstellungen, nicht jedoch mit den grundlegenden Mechanismen der Korrosion.

Vor allem Langzeittests mit Materialien in realen Feuerungsanlagen gestalten sich schwierig, da ein stabiler Betrieb über längere Zeiträume oft schwer zu verwirklichen ist. Bisher gibt es nach unserem Wissen keine Untersuchungen zur Korrosion von Feuerfestmaterialien in Abhängigkeit von den Verbrennungsparametern Temperatur und Gasphasenzusammensetzung sowie über die Wechselwirkungen zwischen Schlacke und Feuerfestmaterial in Kleinfeuerungsanlagen. Die Ergebnisse der Versuche im vorliegenden Projekt können als Basis für effizientere Materialentscheidungen dienen und tragen auch allgemein zum Verständnis von Korrosionsvorgängen an Feuerfestmaterialien bei.

## 5 Methoden

### 5.1 Analyse von Brennstoff, Staub und Kondensat

Die im Projekt hergestellten Versuchspellets werden hinsichtlich der brennstofftechnisch relevanten Parameter untersucht. Dazu werden Heizwert, Wassergehalt, Aschegehalt, Anteil an flüchtigen Bestandteilen sowie die Dichte der Pellets bestimmt. Bei den Pellets aus den Vorversuchen wird darüber hinaus eine Ascheschmelzanalyse durchgeführt, um den Einfluss der unterschiedlichen Additive bewerten, und Pellets mit möglichst geringer Neigung zur Verschlackung auswählen zu können.

Sowohl Brennstoffe als auch ausgewählte Brennstoffaschen, Staub- und Kondensatproben werden hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht. Dabei wird der Gehalt an Haupt- und Nebenkomponten der Asche (wie z.B. Ca, Mg, Al, Si, K, ...) sowie die Konzentration an Spurenelementen und Schwermetallen (z.B. Cr, Ni, Cu, Pb) bestimmt. Bei den Brennstoffen wird darüber hinaus einer Analyse der Hauptkomponenten Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Stickstoff (N) durchgeführt. Die verwendeten Analysemethoden sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

*Tabelle 1: Übersicht über verwendete Analysemethoden*

Parameter	Methode	BS	Asche	Staub	KON
CHN	Elementaranalysator Vario EL3	x	-	-	-
Aschebildner	CEN/TS 15290, CEN/TS 15297, CEN/TS 15289	x	x	x	x
Organisch / Anorganisch geb. C	Kohlenstoff/Wasser – Phasenanalysator (LECO RC 612)	x	-	x	-
Heizwert	DIN 51900-1 bis -3	x	-	-	-
Aschegehalt	CEN/TS 14775	x	-	-	-
Wassergehalt	DIN 51718	x	-	-	-
Dichte	DIN 52182	x	-	-	-
Flüchtige Bestandteile	DIN 51720	x	-	-	-
Abrieb	ÖNORM M 7135	x	-	-	-
Schmelzverhalten	CEN/TS 15370-1	x	-	-	-

## 5.2 Untersuchung der Feuerfestmaterialien

Die Feuerfestmaterialien werden besonders auf Wechselwirkungen bzw. chemische Reaktionen zwischen Asche und Material untersucht. Dazu werden vorab mittels Infusionstests mit einer größeren Anzahl an Materialien durchgeführt und drei geeignete Brennkammerwerkstoffe mittels optischer Begutachtung für die Verbrennungsversuche ausgewählt.

Die verschiedenen keramischen Materialien aus den Verbrennungsversuchen werden im Verlauf der Messreihen photographisch dokumentiert und nach Abschluss einer Messserie mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie untersucht.

### 5.2.1 Infusionstest

Als Basis für eine Auswahl an Materialien und Brennstoffen werden Infusionstests mit den Aschen<sup>3</sup> der verschieden additivierten Pellets und mit unterschiedlichen Feuerfestwerkstoffen durchgeführt. Dabei sollen drei Feuerfestwerkstoffe ausgewählt werden. Darüber hinaus dient der Zustand der Brennstoffaschen (Ausmaß der Verschmelzung) als zusätzliches Kriterium zur Auswahl der Additive.

Die unterschiedlich additivierten Pellets werden im Muffelofen bei 550°C verascht. Aus sechs verschiedenen Feuerfestmaterialien werden kleine Tiegel (zylindrische Probenkörper mit Vertiefung) hergestellt und mit den verschiedenen Aschen befüllt (siehe Abbildung 1). Bei einer Temperatur von 1250°C (Aufheizrate 5°C/Minute) werden die Probenkörper nun über einen Zeitraum von 12 Stunden unter Luftatmosphäre erhitzt.

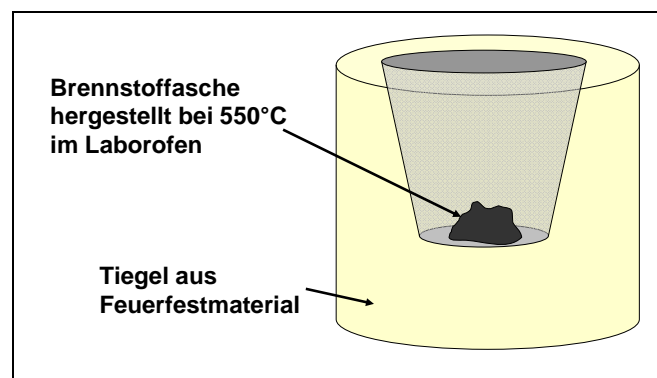


Abbildung 1: Tiegel für Infusionstest (schematisch)

Nach dem Abkühlen wurde der Probenkörper optisch begutachtet, um Wechselwirkungen von Asche oder Schlacke mit dem Werkstoff oder auch eine Infiltration des Materials feststellen zu können. Eine Übersicht mit Fotos aller Proben befindet sich in Abschnitt 12.1.

<sup>3</sup> Herstellung der Aschen bei 550°C im Muffelofen

## 5.2.2 Fotografische Dokumentation

Eine fotografische Dokumentation, mit dem Ziel Veränderungen an den Oberflächen der Feuerfestmaterialien bildlich festzuhalten, wurde zu verschiedenen Zeitpunkten während des Versuchsprogrammes durchgeführt.

## 5.2.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Untersuchungsmethoden für Feuerfestmaterialien erlaubt EDX eine quantitative Abschätzung der Beständigkeit der Materialien gegenüber korrosiven Angriffen. Die Eindringtiefen und Konzentrationen der Elemente Kalium und Chlor in die Oberfläche der Feuerfestmaterialien dienen als Indikatoren für eine Einschätzung der Eignung der Werkstoffe für den gewählten Anwendungsbereich.

Die Materialproben aus den Langzeitversuchen werden mittels Elektronenmikroskop untersucht. Bei den Werkstoffen soll vor allem die Veränderung von Struktur und chemischer Zusammensetzung in Abhängigkeit vom verwendeten Brennstoff und von den Bedingungen in der Feuerung (z.B. Position im Brennraum) untersucht werden.

### Messprinzip

Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie können Oberflächen bis in eine Eindringtiefe von wenigen  $\mu\text{m}$  untersucht werden. Ein Elektronenstrahl (generiert aus einer Wolframkathode im sogenannten Wehneltzylinder) wird im Hochvakuum durch elektromagnetische Linsen auf die Probenoberfläche fokussiert. Über Ablenkspulen eines Rastergenerators wird der Elektronenstrahl in einem Rechteckmuster über die Probe geführt („abrastern“). Durch Wechselwirkung dieser primären Elektronen mit dem Präparat entstehen sogenannte sekundäre Elektronen, rückgestreute Elektronen und Röntgenstrahlung. Sekundärelektronen liefern ein Abbild der Topografie, rückgestreute Elektronen zusätzliche Informationen über die Ordnungszahl der vorhandenen Elemente. Von der Probe emittierte Röntgenstrahlen sind charakteristisch für die jeweilige Elementzusammensetzung und werden zur qualitativen und semiquantitativen Bestimmung verwendet (EDX). Wegen der hohen Zielgenauigkeit ist es auch möglich, sehr kleine Teile der Probe genau zu orten und punktuell zu analysieren. Die Nachweisgrenze der Methode liegt je nach Element zwischen 0,1 – 1 Atom%. Die Untersuchungen im gegenständlichen Fall erfolgten mit einem Gerät der Firma Philips, Type XL 30 DX4i und einem energiedispersiven Detektor der Fa. EDAX (Geräte-Nr.: 1396). Durchgeführt wurden die Messungen am *Österreichischen Forschungsinstitut für Chemie und Technik*.

### Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung für die EDX-Messungen beinhaltet die Erstellung eines Prüfkörpers aus dem keramischen Material. Dazu wird an einer repräsentativen Stelle ein Block mit den Abmessungen Länge 2 cm, Breite 2 cm und Tiefe 1,5 cm von der Materialoberfläche



herausgeschnitten. Anschließend wird die oberste Schicht (ca. 1 mm) des Prüfkörpers sorgfältig abgerieben um eine saubere Probenoberfläche zu erhalten. Dazu wurde ein Schleifpapier der Körnung 1 µm gewählt und die Probe anschließend mit einem feinen Pinsel abgebürstet. Bei allen Vorbereitungsschritten wurde auf die Kühlung bzw. auf das Schleifen unter Wasserzugabe verzichtet, um die zu untersuchenden Ionen nicht aus der Probe zu waschen.

### **Durchführung**

Wie beschrieben erlaubt die EDX-Methode eine Messung der Elementkonzentrationen an einem Punkt mit hoher Auflösung. Da keramische Materialien auf mikroskopischer Ebene oft sehr inhomogen aufgebaut sind, wurden an jedem Prüfkörper drei Tiefenprofilmessungen an verschiedenen Punkten durchgeführt. Aus diesen drei Messserien wurden dann jeweils Mittelwerte für die Elementkonzentrationen bei den entsprechenden Eindringtiefen gebildet.

## **5.3 Messgeräte und Datenerfassung**

### **5.3.1 15 kW Feuerung**

Während des gesamten Versuchszeitraums wird die Masse des Kessels über eine Palettenwaage aufgezeichnet, um den Brennstoffverbrauch zu ermitteln. Die Bestimmung der gasförmigen Komponenten CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub> und SO<sub>2</sub> erfolgte kontinuierlich über alle Versuche hinweg. Darüber hinaus wurden bei ausgewählten Versuchen auch HCl-Emissionen bestimmt. Die Temperatur im Brennraum, im Abgas sowie in sämtlichen Wasser- bzw. Kondensatkreisläufen wird über Thermoelemente erfasst. Außerdem wird der pH-Wert des im Umlauf befindlichen Kondensats mittels pH-Elektrode kontinuierlich erfasst.

Die Staubmessung erfolgt gravimetrisch über Absaugung mittels Filterkopfgerät gemäß VDI 2066. Zusätzlich dazu werden in einzelnen Fällen Messungen mit einem ELPI (Electronic Low Pressure Impactor), einem zwölfstufigen Kaskadenimpaktor, durchgeführt, um die Partikelgrößenverteilung zu ermitteln.

Sämtliche Parameter werden während des Versuches kontinuierlich aufgezeichnet. In Tabelle 2 sind die verwendeten Messgeräte übersichtlich zusammengestellt.

Eine genaue Beschreibung der Messstellen findet sich in Kapitel 6 Materialien, Anlagen- und Versuchsbeschreibung.

Tabelle 2: Übersicht über verwendete Messgeräte bei den Versuchen an der 15 kW Feuerung

Messgröße	Messgerät und Messprinzip	
Abgastemperatur	Thermoelement Type K	
Raumtemperatur, Temperatur der Wasserkreisläufe	Widerstandsthermometer Pt 100	
$\dot{V}$	Durchflussmessung magnetisch-induktiv	
O <sub>2</sub>	paramagnetisch	
CO <sub>low</sub>	NDIR	
CO <sub>high</sub>	NDIR	
CO <sub>2</sub>	NDIR	NGA 2000 – Abgasanalysator
NO	NDIR	
NO <sub>2</sub>	UV	
SO <sub>2</sub>	UV	
HCl	Absorption über Waschflaschen, Detektion via Ionenchromatographie	
pH-Wert	Spannungsmessung über pH-Elektrode	
Masse	Palettenwaage Sartorius GM-6101	
Staub	gravimetrisch mittels gestopfter Filterhülsen gemäß VDI 2066 Teil 2, ELPI (electronic low pressure impactor)	

### 5.3.2 150 kW Feuerung

Die gasförmigen Emissionen (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO und NO<sub>2</sub>) bei den Versuchen an der 150 kW Feuerung werden mit einem mobilen Abgasanalysator der Marke rbr-ecom SG<sup>PLUS</sup> erfasst, die Staubmessung erfolgt gravimetrisch (vgl. 5.3.1). Des Weiteren wird die Abgastemperatur an der Probenahmestelle über ein Thermoelement gemessen.

Zur Bestimmung des Volumenstroms wird die Gasgeschwindigkeit im Ansaugrohr der Sekundärluft über ein Hitzdrahtanemometer ermittelt. Die abgenommene Leistung sowie die Temperatur im Brennraum werden über firmeneigene Sensoren der Fa. KWB aufgezeichnet.

Sämtliche Parameter werden während des Versuches kontinuierlich aufgezeichnet. In Tabelle 4 sind die verwendeten Messgeräte übersichtlich zusammengestellt.

Eine genaue Beschreibung der Messstellen findet sich in Kapitel 6 Materialien, Anlagen- und Versuchsbeschreibung.

Tabelle 3: Übersicht über verwendete Messgeräte bei den Versuchen an der 150 kW Feuerung

Messgröße	Messgerät und Messprinzip
Abgastemperatur	Thermoelement Type K
Gasgeschwindigkeit im Ansaugrohr	Hitzdrahtanemometer
CO <sub>2</sub>	NDIR
O <sub>2</sub>	
NO	elektrochemisch
NO <sub>2</sub>	
SO <sub>2</sub>	
Staub	gravimetrisch mittels gestopfter Filterhülsen gemäß VDI 2066 Teil 2, ELPI (electronic low pressure impactor)

## 5.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

### 5.4.1 Investitionsrechnung – Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode fällt in das Gebiet der dynamischen Investitionsrechnung und leitet sich von der Kapitalwertmethode ab. Diese Methode ermöglicht besonders den Vergleich von Investitionen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern indem der Kapitalwert einer Investition mit dem so genannten Annuitätenfaktor (Wiedergewinnungsfaktor) multipliziert wird. Im Falle von Investitionen, die nur aus Auszahlungen bestehen, versteht man unter dem Kapitalwert die Summe aller, über die gesamte Nutzungsdauer auf den Zeitpunkt Null abgezinsten Auszahlungen.

### 5.4.2 Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Heizsystemen anhand der ÖNORM M 7140

Bei der Vergleichsrechnung nach ÖNORM M 7140 handelt es sich um eine dynamische Investitionsrechnung zum Vergleich von Energiesystemen auf Grundlage der Annuitätenmethode. Die Kosten werden in die drei Kategorien,

- kapitalgebundene Kosten,
- verbrauchsgebundenen Kosten und
- betriebsgebundenen Kosten

eingeteilt und auf den Zeitpunkt Null bezogen (Barwert). Ausgehend von diesem, werden nun die durchschnittlichen jährlichen Kosten, die Annuitäten, berechnet. Die Daten für die

Berechnung der Wirtschaftlichkeit stammen aus Vorprojekten der Austrian Bioenergy Centre GmbH und werden aktualisiert, sofern Veränderungen eingetreten sind.

### **5.4.3 Sensitivitätsanalysen**

Bei Sensitivitätsanalysen wird durch Variation von verschiedenen Größen ermittelt, wie sensibel das Gesamtergebnis auf die Veränderung dieser Größen reagiert. Dadurch können auch kritische Werte berechnet werden. Diese Werte stellen einen Wendepunkt dar, das heißt, wenn man diese über- bzw. unterschreitet hat dies wesentliche Veränderungen auf die Ergebnis.

#### **5.4.3.1 Variation der Reparaturkosten**

Aufbauend auf die Basiskalkulation, in der die Reparaturen in den Wartungskosten enthalten sind, wird bei dieser Sensitivitätsanalyse ein kalkulatorischer Prozentsatz für Reparaturen, laut ÖNORM M 7140, berücksichtigt. Dieser beträgt für die technischen Anlagenteile (z.B. Feuerung, Raumaustragung,...) 3% pro Jahr und für Gebäude (z.B. Brennstofflagerraum) 2% pro Jahr. In weiterer Folge wird bei den Systemen mit Strohpellets eine Erhöhung des Prozentsatzes auf 6 %/a vorgenommen. Dies entspricht den Reparaturkosten unter der Annahme, dass der Kessel, aufgrund erhöhter Korrosion, nach einer Laufzeit von 10 Jahren ausgetauscht werden muss.

#### **5.4.3.2 Variation der Investitionskosten**

Bei dieser Sensitivitätsanalyse werden die Investitionskosten der Systeme welche mit Strohpellets betrieben werden, durch Anschluss eines sekundären Staubabreinigungssystems erhöht, die aufgrund des Emissionsverhaltens dieser Brennstoffe notwendig sein kann, um gesetzliche Emissionsgrenzwerte einhalten zu können.

Die Investitions- und Betriebskosten für die Rauchgasreinigungssysteme wurden von zwei Firmen (je ein Produzent eines Abgaswärmetauschers und ein Produzent eines Elektrofilters) erhoben. Es ist zu beachten, dass vielen Werten Schätzungen der jeweiligen Kontaktpersonen zu Grunde liegen. Bei den Berechnungen wurden auch Änderungen der Anlagennutzungsgrade durch den Betrieb dieser Rauchgasreinigungssysteme berücksichtigt. So steigt dieser Messungen der Austrian Bioenergy Centre GmbH zufolge beim Einsatz des Abgaswärmetauschers um 10 % an.

## 6 Materialien, Anlagen- und Versuchsbeschreibung

### 6.1 Brennstoff

Zu Beginn des Projekts werden Pelletschargen mit verschiedenen Additiven für Vorversuche benötigt. Dafür werden kleine Mengen von etwa 5 – 10 kg mit einer Laborpelletierpresse produziert. Aus diesen werden 3 Chargen ausgewählt, von denen dann größere Mengen an einer Industriepresse hergestellt werden.

#### Rohstoffe

Als Rohstoff für die Produktion der Pellets wird Weizenstroh verwendet. Die Pellets für die Vorversuche werden aus derselben Charge Rohmaterial hergestellt, um für die Auswahl der Versuchspellets ein möglichst hohes Maß an Vergleichbarkeit zu erreichen. Auch für die Produktion dieser Versuchspellets wird die Verwendung eines möglichst homogenen Rohstoffes angestrebt. Zu diesem Zweck wird Stroh von nur einem Feld und einer Ernte verwendet. Darüber hinaus wurde der Landwirt angehalten, Verunreinigungen z.B. durch Erde bei der Ernte möglichst gering zu halten.

#### Additive

Die Auswahl der Additive erfolgt auf Basis von Literaturdaten sowie Ergebnissen vorangegangener Projekte (Figl 2006, Hartmann 2000, Reisinger 1993, Steenari 1998, Wopienka 2005). Diese zeigten, dass vor allem die Beimengung kalzium-, magnesium- und aluminiumhaltiger Verbindungen das Ascheschmelzverhalten günstig beeinflusst, d.h. die Erweichungstemperaturen erhöht. Bei der Auswahl möglicher Additive wird zudem darauf geachtet, dass die Kosten zur Brennstoffproduktion trotz Additivbeimengung auf einem aus wirtschaftlicher Sicht sinnvollen Niveau bleiben. Neben den so ausgewählten Additiven werden von der Fa. Intocast drei mineralische Mischungen zur Verfügung gestellt, die Erfahrungen zu Folge in Hinblick auf die Wechselwirkung mit Feuerfestmaterialien ein günstiges Verhalten aufweisen. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die chemische Zusammensetzung der getesteten Additive.

*Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Additive*

	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgCO <sub>3</sub>	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
Branntkalk	0,36		95,26	0,16	0,13		2,52	0,01	0,03	0,03	0,87	0,02
Dollit <sup>*)</sup>		52				40						
Bauxitmehl	87,43		0,13	1,87	0,59		0,22		0,01	0,2	5,19	4,24
Additiv A <sup>**)</sup>	0,17		0,17	0,12	1,92		0,28		0,1	0,73	79,2	0,07
Additiv B <sup>**)</sup>	0,1		0,1	0,07	1,07		0,16		0,06	0,41	44	0,04
Additiv C <sup>**)</sup>	87,7		0	0,05	0,03		0	0,01	0,22	0,03	0,15	0,07

\*) laut Produktdatenblatt, \*\*) Restlicher Bestandteil ist Kohlenstoff

Genauere Daten zu den Pellets sowie zu den Ergebnissen der Vorversuche finden sich im Anhang.

## 6.2 Feuerfestmaterialien

Bei der Auswahl der geeigneten Feuerfestmaterialien für die Versuchsreihen werden vor allem die Ergebnisse aus den Infusionstests herangezogen. Im Rahmen dieser Vorversuche werden 6 Materialien mit je 9 Brennstoffaschen untersucht. Einen Überblick über die verwendeten Feuerfestwerkstoffe gibt Tabelle 5.

*Tabelle 5: Beschreibung der untersuchten Feuerfestmaterialien*

Produktbezeichnung	Beschreibung
<b>A INTOVAL 1550 SiC</b>	<b>SiC-Material</b>
	<b>Werkstoff auf Andalusit-Basis,</b>
	<b>Einsatzgebiet: Müllverbrennung und</b>
<b>B INTOVAL 853 T MOD</b>	<b>Wirbelschichtfeuerungen (gute Abriebs-,</b>
	<b>Temperaturwechsel sowie chemische</b>
	<b>Beständigkeit)</b>
<b>C INTOVAL SF 60 ZR</b>	<b>Feuerfestbeton mit 11% ZrO</b>
D INTOVAL C50 / S51	Kostengünstiger Feuerfestbeton mit hohem Zementanteil
E INTOVAL 1550 SiC (Cohart-ZaC)	SiC-Werkstoff mit Cohart-ZaC, hoher Si-Anteil
F INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC)	SiC.-Werkstoff mit höherwertigem SiC
<b>G LACFIRE 1550/30 SiC</b>	<b>SiC-Material ähnlicher Zusammensetzung wie Material A</b>

*SiC.....Siliziumcarbid, ZrO.....Zirkonoxid, Cohart-ZaC.....Eigennahme, Si.....Silizium*

Material Nr. A (1550 SiC) war kaum angegriffen, nur bei der Asche aus Pellets ohne Additiv waren optisch leichte Veränderungen feststellbar. Die Feuerfestmaterialien Nr. B (INTOVAL 853T MOD) und Nr. C (INTOVAL SF 60 ZR) schienen am robustesten zu sein. Bei Material D (INTOVAL C50/S51) und F (INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC)) war bei geschmolzenen Aschen eine infiltrierte Zone zu erkennen. Darüber hinaus traten bei Material F schwarze

Ränder um die eingebettete Phase auf, die auf einen Materialangriff hinweisen. Die grünliche Färbung der Schnittebene, die bei einigen Proben auftritt, stammt von der Probenaufbereitung und wurde nicht durch die Asche verursacht. Bei Material Nr. E war mit freiem Auge kein Angriff erkennbar, jedoch waren sämtliche Aschen geschmolzen. Dies ist möglicherweise auf Wechselwirkungen zwischen Material und Asche zurückzuführen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei Proben aus dem Tiegeltest im Vergleich.



Abbildung 2: Exemplarisch 2 Proben aus dem Tiegeltest im Vergleich (a) deutliche Veränderungen des Feuerfestmaterials in der Randzone (b) keine Veränderung des Materials erkennbar

Für die Versuchsdurchführung an der 15 kW Feuerung wurden die Materialien Nr. A (wird auch von der Fa. Intocast standardmäßig für Feuerungen verwendet), Nr. B und Nr. C ausgewählt (Tabelle 5, fett gedruckte Materialien).

Für die Versuchsdurchführung in der 150 kW Feuerung wurden Versuche mit dem Material A, zusätzlich aber auch Versuche mit Material G durchgeführt.

## 6.3 15 kW Strohfeuerungsanlage mit Sekundärwärmetauscher

### 6.3.1 Anlagenbeschreibung und Versuchsaufbau

In Abbildung 3 ist der Versuchsaufbau sowie die Positionierung der Messstellen schematisch dargestellt.

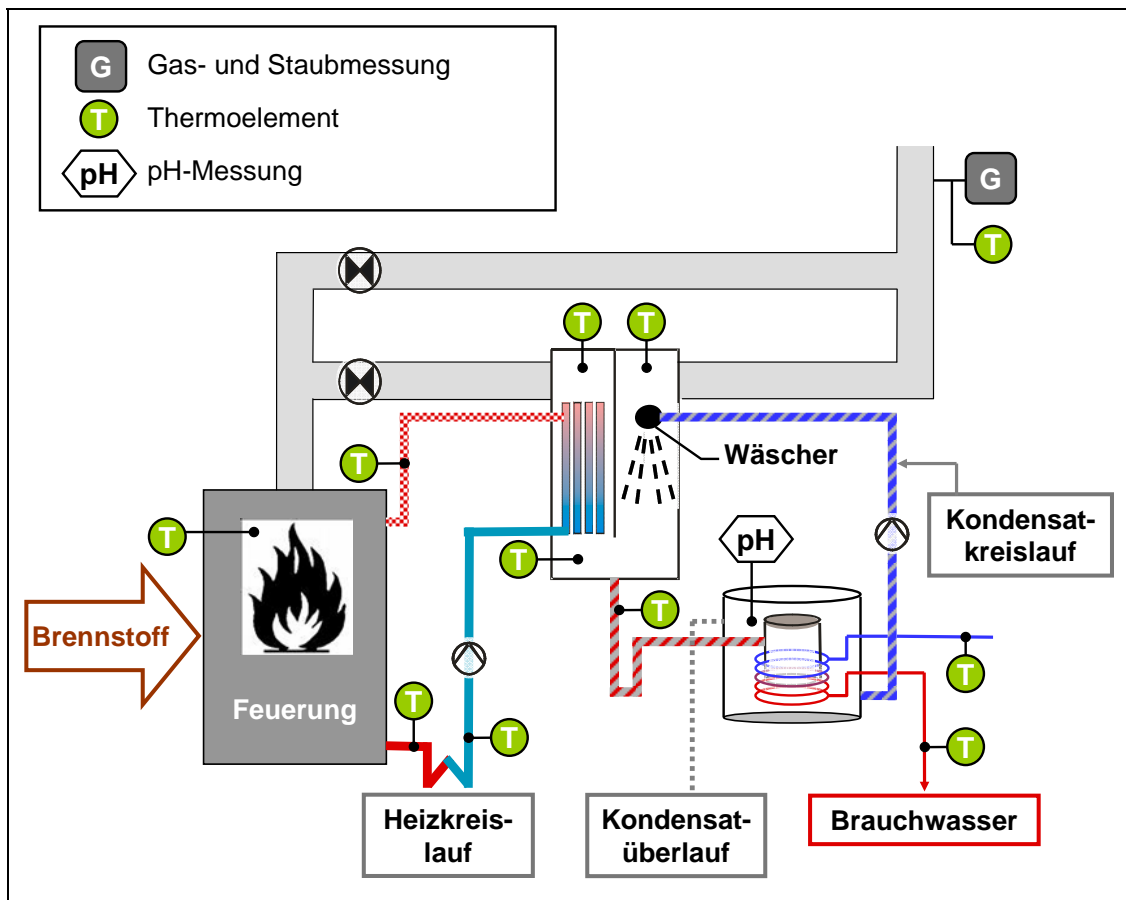


Abbildung 3: Anlagenschema 15 kW Feuerung

### Beschreibung der Feuerung

Für die Verbrennungsversuche wurde eine Prototyp-Feuerung der Fa. KWB verwendet, welche eigens für die Verbrennung von Strohpellets adaptiert worden war. Die Verbrennungseinheit besteht aus einem drehbaren Rohr, das auf einer Stirnfläche mit Pellets beschickt wird. Der Brennstoff wird durch das Rohr befördert und dabei verbrannt. Die Asche wird auf der gegenüberliegenden Stirnfläche des Rohres ausgetragen. Die Luftzuführung in das Rohr erfolgt über einen Saugzug sowie ein zusätzliches Gebläse bei der Brennstoffzufuhr und wird über eine Lambda-Sonde geregelt.

### Sekundärwärmetauscher mit Wäscher

Als Sekundärwärmetauscher kam der *Hydrocube*® der Fa. Schröder zum Einsatz. Das Abgas durchläuft darin zuerst einen Rohrbündelwärmetauscher aus Edelstahl, wobei die zurück gewonnene Energiemenge zur Vorwärmung des Rücklaufs im Heizkreislauf verwendet wird. Der Abgasstrom wird in weiterer Folge umgelenkt und im Wäscherteil mit Wasser bzw. Kondensat besprüht, und so weiter abgekühlt. Das Kondensat gelangt durch einen Partikelfilter in die Kondensatbox, wo es abgekühlt wird und im Kreislauf wieder als Waschflüssigkeit zum Einsatz kommt. Überschüssige Kondensatmengen gelangen über



einen Überlauf ins Abwasser, die dem Kondensat entzogene Energiemenge wird für die Heißwasserbereitstellung genutzt.

Der Abgasstrom kann wahlweise durch den Sekundärwärmetauscher oder über einen Bypass direkt in den Kamin geleitet werden.

#### **Messstellen**

Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie Volumenströme der Wasser- und Kondensatkreisläufe werden kontinuierlich aufgezeichnet, um die Leistung sowie die zurück gewonnenen Energiemengen zu quantifizieren. Darüber hinaus wird die Temperatur im Brennraum gemessen, sowie im Abgas vor Eintritt in den Kamin und an definierten Positionen im *Hydrocube*<sup>®</sup> (siehe auch Abbildung 3). Die Messung von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub>, die Probenahme für die HCl-Messung sowie die Staubmessungen mittels Filterkopfgerät und ELPI erfolgen ebenfalls an der Messstelle vor Kamineintritt. Über einen Fühler in der Kondensatbox wird der pH-Wert des Kondensatums kontinuierlich erfasst.

### **6.3.2 Position der Feuerfestproben**

Die Brennkammer der Strohfeuerungsanlage besteht aus einem keramischen Rohr, welches aus 6 ringförmigen Segmenten aufgebaut ist. Um eine gleichmäßige Versuchsbelastung aller ausgewählten keramischen Brennraummaterialien zu garantieren, werden alle Ringsegmente gedrittelt und so wieder zusammengesetzt, dass jeweils alle 3 Materialien in jedem Segment vertreten sind.

Jeweils mit Inbetriebnahme des Ofens mit einem neuen Brennstoff wird die keramische Brennkammer ausgetauscht und mit unbelasteten Materialien bestückt.

Abbildung 4 zeigt schematisch den Aufbau der keramischen Brennkammer. Die Ringsegmente wurden von 1 bis 6 durchnummeriert. Die Brennstoffzufuhr erfolgte über eine Brennstoffförderschnecke am Beginn von Ringsegment 1.

Es ist anzunehmen, dass sich an dieser Stelle aufgrund der hohen Brennstoffdichte eine Verbrennungszone mit reduzierenden Bedingungen bildet. 4 Sekundärlufteinlässe zwischen den Ringsegmenten 1, 2, 3, 4 und 5 bewirken ab Ringsegment 2, dass in der Verbrennungszone oxidierende Bedingungen vorherrschen.

Einzelne Temperaturmessungen in der Brennkammer zeigten außerdem, dass sich ein Temperaturgradient entlang der Höhe der Brennkammer ausbildet. Kontinuierliche Temperaturmessungen waren leider nicht möglich, aber die Ergebnisse von Einzelmessungen erlauben zumindest eine Abschätzung der Temperaturintervalle in der Brennkammer. Auf der Höhe von Ringsegment 1 betragen die Verbrennungstemperaturen zwischen 700 – 900 °C, auf der Höhe von Ringsegment 3 zwischen 900 – 1100 °C und am oberen Ende der Brennkammer auf Höhe von Segment 5 ca. 1100 – 1300 °C.

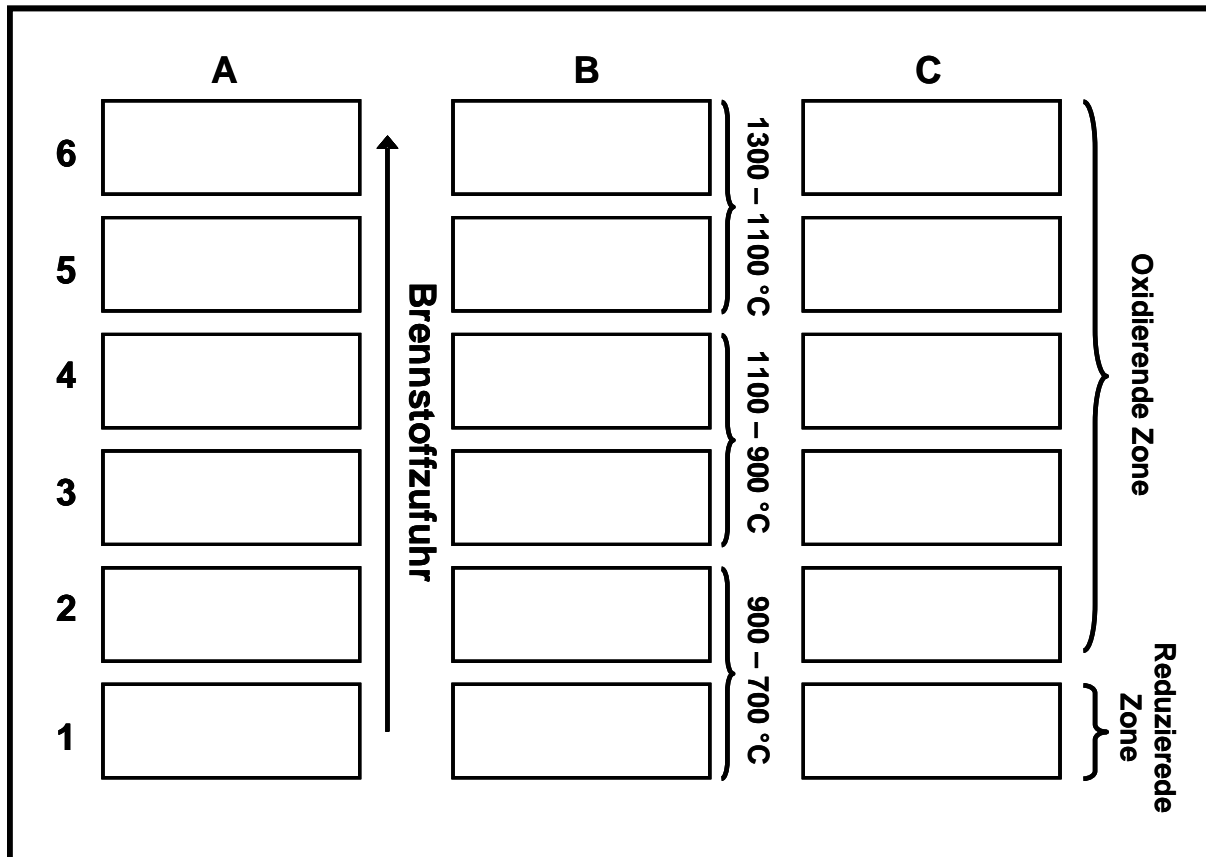


Abbildung 4: Schematische Darstellung der keramischen Brennkammer

Die Probenahme des keramischen Materials für die EDX-Messungen erfolgte dann auch jeweils mit der Entnahme von Feuerfestmaterialien aus den Segmenten 1, 3 und 5 um die Einflussnahme des Parameters reduzierende/oxidierende Atmosphäre und des Parameters Temperatur, zusätzlich zu dem Parameter Brennstoffadditiv, auf das Feuerfestmaterial zu untersuchen.

### 6.3.3 Versuchsbeschreibung

#### Vorversuche

Für die im Projekt geplanten Korrosionsuntersuchungen, aber auch für die Messung der gas- und staubförmigen Emissionen ist ein Dauerbetrieb der Anlage über einen längeren Zeitraum hinweg erforderlich. In Vorversuchen wird die Feuerungseinstellung optimiert, um mit den Versuchsbrennstoffen eine möglichst hohe Verbrennungsqualität zu erreichen. Zu diesem Zweck wird der Einfluss von Trommelbewegung, Ascheaustragsintervallen aber auch eingeschobener Brennstoffmenge und somit der Rostbeladung untersucht. Des Weiteren wird die Feuerung bei unterschiedlichem Luftüberschuss betrieben, um auch hinsichtlich der Emissionen optimale Einstellungen für die Dauerversuche zu finden.

Im Rahmen dieser Vorversuche werden auch erste Tests mit dem Abgaswärmetauscher zur Emissionsreduktion durchgeführt, um Betriebsparameter für die Standardversuche zu ermitteln und den Versuchsaufbau festzulegen.

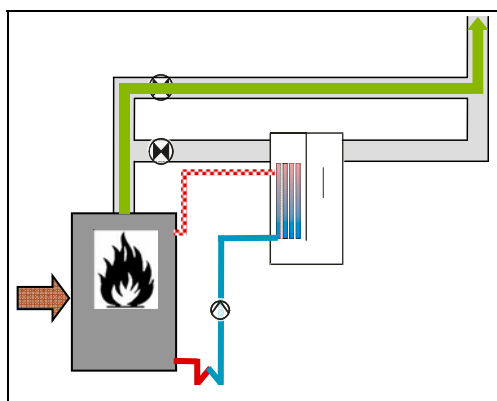
#### **Versuchsprogramm - Korrosionsuntersuchungen**

Die Voraussetzung für die Untersuchung und Bewertung der Korrosionserscheinungen ist eine vergleichbare Beanspruchung (Luftüberschuss, Temperatur, Betriebsstunden) der Materialien. Es wird daher mit jeder der drei ausgewählten Brennstoffchargen ein Langzeitversuch über 300 Betriebsstunden bei festgelegten Standardeinstellungen durchgeführt, wobei bei jedem Versuch die drei verschiedenen Feuerfestwerkstoffe gleichzeitig zum Einsatz kommen. Die Feuerung wird dabei jeweils 150 h bei Volllast und 150 h bei Teillast betrieben.

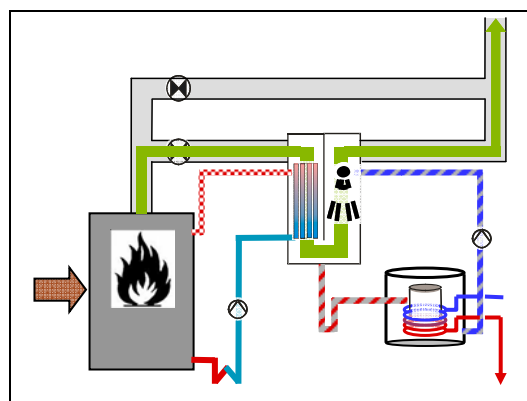
#### **Versuchsprogramm – Emissionsmessung**

Bei allen drei Brennstoffen werden Emissionsmessungen im Volllastbetrieb mit und ohne *Hydrocube*<sup>®</sup> durchgeführt. Die Standardmessungen – also ohne Sekundärwärmetauscher – dienen als Referenzversuche für die Bewertung der Wirksamkeit des Sekundärwärmetauschers hinsichtlich der Reduktion gas- und partikelförmiger Emissionen. Mit additivierten Brennstoffen werden auch Versuche im Teillastbetrieb durchgeführt.

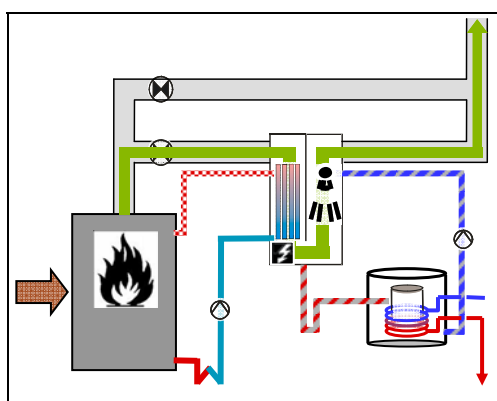
Des Weiteren werden unterschiedliche Betriebsvariationen des *Hydrocube*<sup>®</sup> getestet, welche in Abbildung 5 (a) bis (d) dargestellt sind.



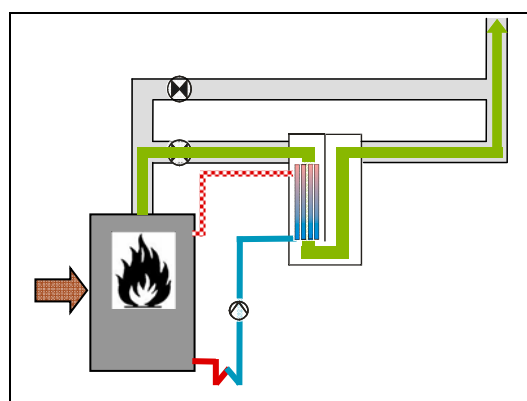
(a) Standard (ohne Hydrocube®)



(b) Hydrocube®



(c) Hydrocube® + Elektrode



(d) Hydrocube® nur Wärmetauscher

Abbildung 5: Variationen im Versuchsprogramm zur Emissionsmessung (a) Standard, (b) mit Hydrocube®, (c) mit Hydrocube® mit zusätzlich eingebauter Elektrode und (d) nur mit dem Wärmetauscher des Hydrocube® - Systems

Neben den Versuchen mit und ohne Sekundärwärmetauscher (Abbildung 5 (a) und (b)) wurden Messungen mit einer zusätzlich in das System implementierten Elektrode durchgeführt (Abbildung 5 (c)). Darüber hinaus wurde in einzelnen Messungen ausschließlich der Wärmetauscher des Hydrocube® verwendet, um die Wirksamkeit der Systemkomponenten (Wärmetauscher und Wäscher) gesondert zu untersuchen. Die Versuchsvariationen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Versuchsvariationen bei der Untersuchung gas- und partikelförmiger Emissionen

	Volllast			Teillast		
	A	B	C	A	B	C
Brennstoff						
Standard	x	x	x	x	x	x
Hydrocube®	x	x	x	-	x	x
Hydrocube® mit Elektrode	x	x	-	-	-	-
Hydrocube® nur Wärmetauscher	-	x	-	-	-	-

Im Rahmen der Versuche wurden zusätzlich zur Quantifizierung der gasförmigen Komponenten im Abgas auch die Elementzusammensetzung von Staub- und Kondensatproben ermittelt, um Informationen über die Verteilung einzelner Elemente und Verbindungen zu erhalten.

## 6.4 150 kW Strohfeuerungsanlage

### 6.4.1 Beschreibung der Feuerung

Für die Versuche zur Untersuchung der Primärmaßnahmen sowie weitere Korrosionsuntersuchungen kommt der TDS Powerfire der Firma KWB mit 150 kW Nennleistung zum Einsatz. Abbildung 6 zeigt eine schematische Zeichnung der Anlage im Querschnitt.

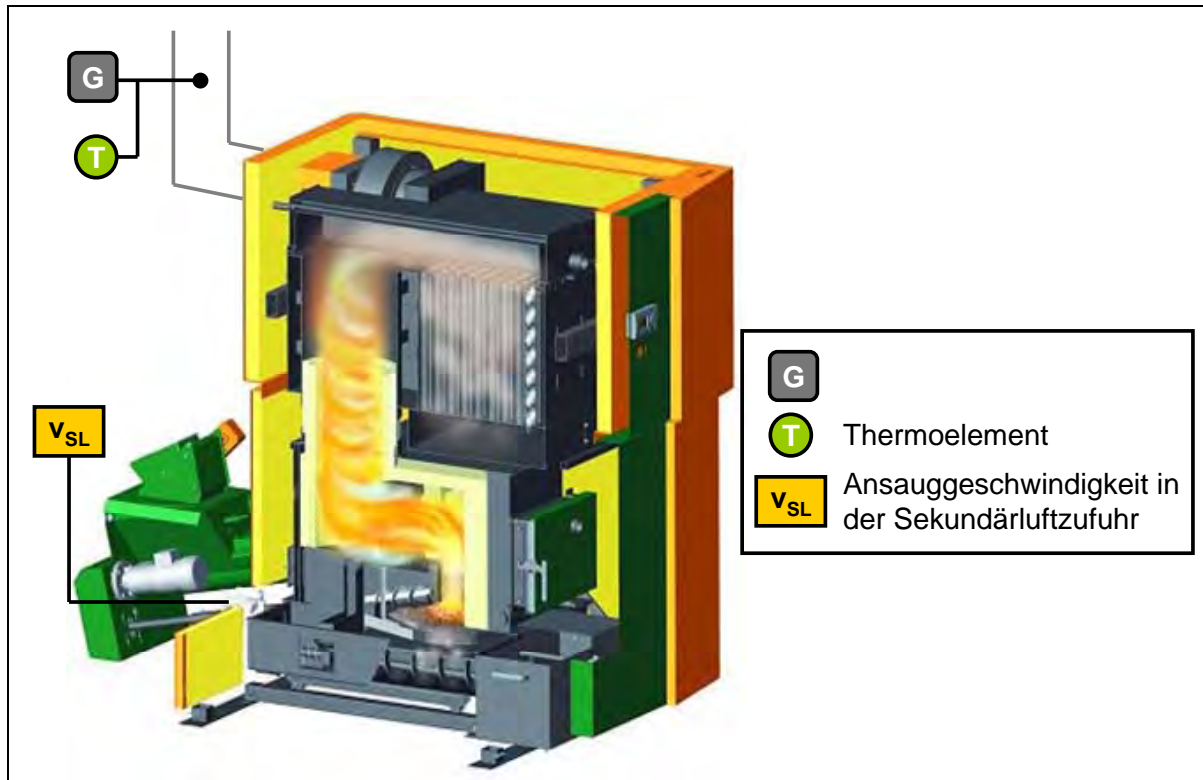


Abbildung 6: Querschnittsansicht des TDS Powerfire

Für den Betrieb mit Strohpellets wird die Brennstoffzufuhr herabgesetzt, sodass die Maximalleistung bei etwa 80 – 90 kW liegt. Durch die reduzierte Brennstoffzufuhr soll weniger Asche im Rostbereich angesammelt und so die Störanfälligkeit im Hinblick auf Verschlackungen reduziert werden.

Das Drehrostbrennsystem besteht aus dem Einschub, ausgeführt als Seiteneinschub, dem eigentlichen Drehrost und dem Entaschungssystem. Der Drehrost setzt sich dabei aus sich drehenden und konzentrisch um die Drehachse angeordneten Ringrostelementen zusammen. Durch das Luftverteilungssystem wird gewährleistet, dass in jedem Verbrennungsabschnitt die erforderliche Luftmenge zugeführt wird. Die Nachverbrennungszone ist in Form einer stehenden Zyklonbrennkammer mit einer tangential einmündenden, speziell ausgeformten Düse ausgebildet, an der die Sekundärluft eingebracht wird. Es besteht die Möglichkeit der Rauchgasrezirkulation, wobei der rückgeführte Volumenstrom über dem Rost eingeblasen wird. Die Regelung erfolgt über eine Lambda-Sonde.

#### Messstellen und Position der Feuerfestproben

Gas- und partikelförmige Emissionen werden im Abgasrohr in ausreichendem Abstand nach Austritt aus der Feuerung beprobt (vgl. VDI 2066). An dieser Messstelle wird auch die Abgastemperatur erfasst. Primär- und Sekundärluft sowie die Menge an rezirkuliertem Rauchgas werden über das Bedienelement der Feuerung eingestellt. Eine direkte Messung

der tatsächlich zugeführten Luftmenge kann nur bei der Sekundärluft über die Messung der Gasgeschwindigkeit im Ansaugrohr erfolgen.

Alle übrigen Parameter, wie z.B. die Temperatur im Brennraum oder die abgenommene Leistung, werden über firmeneigene Analysengeräte und Software von KWB aufgezeichnet.

#### 6.4.2 Position der Feuerfestproben

Die Brennkammer der 150 kW Feuerungsanlage ist vollständig mit keramischem Material ausgekleidet. Aufgrund der leichten Erreichbarkeit und der Möglichkeit im Bereich der Brennkammertür Feuerfestmaterial einfach zu tauschen, wurde entschieden die Proben für die Infiltrationsmessung in diesem Bereich zu entnehmen. Beim Betreiben der großen Feuerungsanlage entstehen keine Zonen unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen in der Verbrennungskammer. Auch die Brennraumtemperatur kann für die Bereiche der Probenentnahme als gleichbleibend eingestuft werden. Unterschiede zwischen den entnommenen Proben könnten sich daraus ergeben, dass die Proben aus den unteren Bereichen der Brennkammertür einen intensiveren Kontakt mit der bei der Verbrennung entstandenen Schlacke haben, als die Proben aus höheren Bereichen der Tür. In Abbildung 7 ist schematisch dargestellt, wo die Probenentnahme stattgefunden hat.

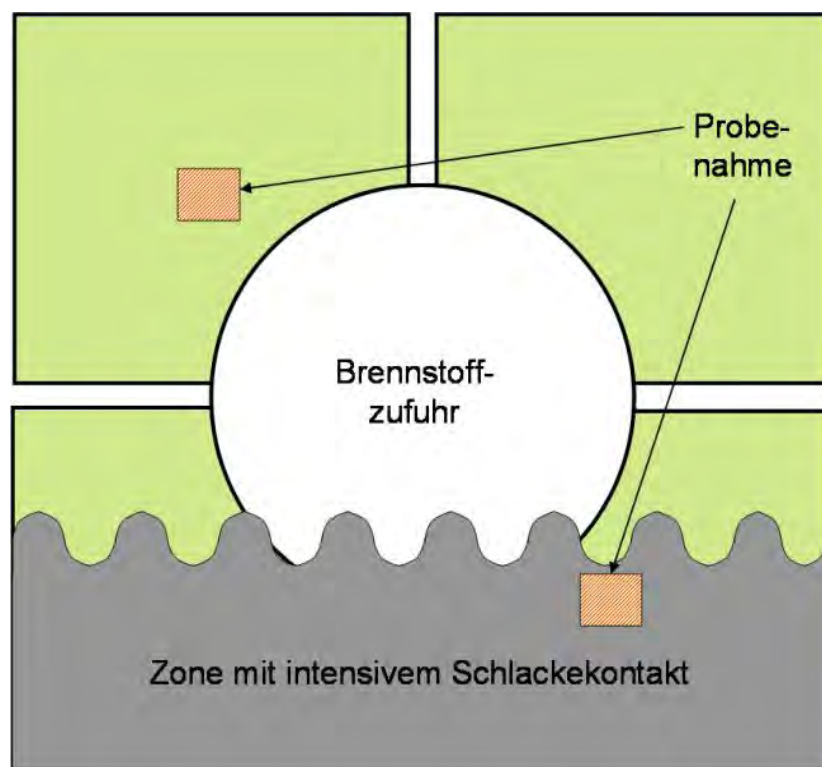


Abbildung 7: Position der Feuerfestproben an der Brennkammertür in 150 kW Anlage

### 6.4.3 Versuchsprogramm

Sämtliche Versuche werden bei maximaler Brennstoffzufuhr – also unter Vollastbedingungen – durchgeführt. Die Brennstoffmenge ist hierbei gegenüber dem Betrieb mit Holzpellets um etwa ein Drittel reduziert.

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden 3 Parameter variiert:

- Gesamtluftmenge
- Primär- zu Sekundärluftverhältnis
- rezirkulierter Abgasstrom

Die Betriebspunkte werden derart gewählt, dass bei Variation einer der drei Größen die beiden jeweils anderen möglichst konstant bleiben, um vergleichbare Bedingungen zu erhalten. Die gezielte Einstellung der Betriebspunkte gestaltete sich schwierig, da einzelne Parameter nicht unabhängig voneinander verändert werden konnten. Eine Übersicht über die Einstellungen der durchgeführten Versuche gibt Tabelle 7.

*Tabelle 7: Übersicht über Einstellungen bei den Versuchsvariationen am TDS Powerfire*

Messintervall	Staubmessung	Brennstoff	PL-Einstellung	SL-Einstellung	Rezi-Einstellung
-	-	-	%	qualitativ	%
1	x	02A	72,8	1	0
2	x	02A	59,2	1	0
3	x	02A	40,0	1	0
4	x	02A	40,0	1	0
5	x	02A	40,0	4	0
6	-	02B	59,2	1	0
7	x	02B	48,0	4	0
8	-	02B	56,0	4	0
9	-	02B	76,0	2	20
10	-	02B	76,0	3	50
11	x	02B	80,0	4	20
12	x	02B	75,0	4	50
13	x	02B	75,0	4	60

*PL.....Primärluft                      SL.....Sekundärluft                      Rezi.....Rauchgasrezirkulation*



## 7 Ergebnisse

### 7.1 Eigenschaften der Versuchsbrennstoffe

#### 7.1.1 Vorversuche zur Additivauswahl

Im Rahmen von Vorversuchen werden 8 unterschiedliche Pelletschargen in kleinen Mengen (ca. 5 kg) unter Beimengung verschiedener Additive an einer Laborpellets Presse hergestellt. Basierend auf Ascheschmelzanalysen und Infusionstests (siehe Kapitel 5.2.1) werden Additive für die Produktion der Versuchspellets ausgewählt. Diese sollen einerseits die Verschlackungseigenschaften verbessern um so einen kontinuierlichen Betrieb mit den Versuchsbrennstoffen zu ermöglichen, und andererseits die Wechselwirkungen der Brennstoffasche mit den verwendeten Feuerfestwerkstoffen herabsetzen.

Die Erweichungspunkte (SOT) aller Pellets bewegen sich in einem sehr engen Bereich von 790°C bis 890°C, und innerhalb dieser Schwankungsbreite ist kein eindeutiger Trend zu beobachten. Unter Miteinbeziehen der weiteren charakteristischen Temperaturen wie Halbkugelpunkt, Sphärischpunkt und Fließpunkt zeigt vor allem die Beimengung von Bauxitmehl und Additiv C eine Verbesserung des Ascheschmelzverhaltens.

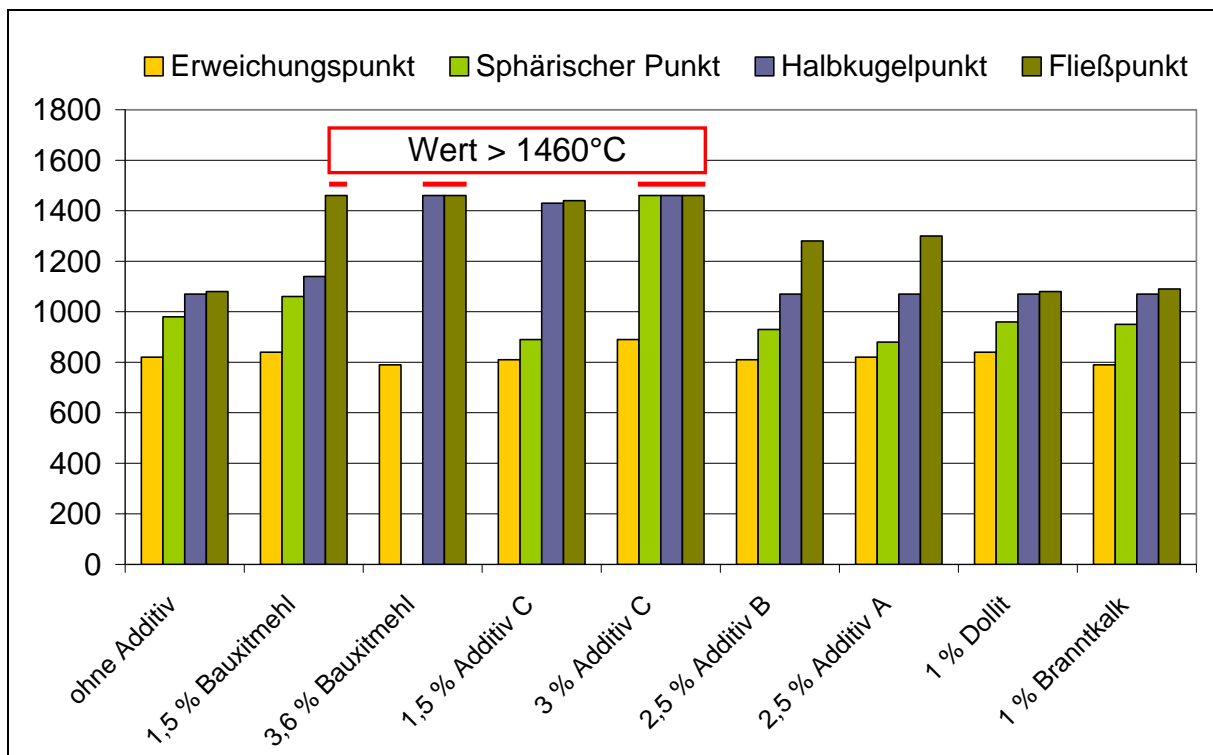


Abbildung 8: Charakteristische Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Pellets aus den Vorversuchen

Bei den Infusionstests unterscheiden sich die Aschen der Pellets vor allem durch einen unterschiedlichen Grad des Aufschmelzens. Auch hier behalten die Aschen der Pellets mit Aluminium hältigem Additiv trotz rigoroser Bedingungen noch teilweise ihre Struktur und werden nicht vollständig aufgeschmolzen (vgl. Bilder in Kapitel 12.1). Optische Unterschiede bezüglich des Eindringens in das Material werden nur in Abhängigkeit vom verwendeten Feuerfestwerkstoff und nicht von der Brennstoffasche beobachtet.

Beide Additive – Additiv C und Bauxitmehl - enthalten als Hauptkomponente Aluminium. Um verschiedene chemische Einflüsse zu untersuchen, wird nur eines der beiden Additive, **Additiv C**, ausgewählt und als zweites Additiv **Dollit** dazugenommen. Pellets mit Dollit zeigten die höchste Erweichungs- und Sphärisch-Temperatur unter den nicht Aluminium-hältigen Additiven. Darüber hinaus wurden mit Dollit additivierten Pellets in der Vergangenheit bereits gute Erfahrungen gemacht [Wopienka 2005, Carvalho 2007].

### 7.1.2 Versuchsbrennstoffe

Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche werden Pellets mit Additiv C und mit Dollit hergestellt, und darüber hinaus als Referenz eine Charge Pellets ohne Additivbeimengung produziert. Der Dollit-Anteil wird mit 3% höher angesetzt als in den Vorversuchen, um die charakteristischen Schmelztemperaturen stärker anzuheben (vgl. Wopienka 2005), die Beimengung an Additiv C ist durch die apparativen Möglichkeit der Zudosierung mit etwa 1,5% limitiert. In beiden Fällen wird die Additivkonzentration so gewählt, dass der Aschegehalt 8% nicht übersteigt, da zu große Aschemengen am Rost zu Problemen bei der Verbrennung führen können.

### Brennstoffeigenschaften

Die Pellets werden in Hinblick auf brennstofftechnisch relevante Parameter wie Heizwert, Wasser- und Aschegehalt sowie ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht. Pro Charge werden dabei je zwei Pelletsproben aus verschiedenen BigBags gezogen, um auch Informationen bezüglich der Homogenität des produzierten Brennstoffs zu bekommen.

Abbildung 9 zeigt die Anteile der Hauptaschebildner der produzierten Chargen im Vergleich. In der Elementanalyse sind deutlich erhöhte Werte für Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) bzw. Aluminium (Al) bei den jeweiligen Chargen durch die Beigabe der Additive zu erkennen. Darüber hinaus werden stark unterschiedliche Werte, vor allem für Silizium (Si) und Kalium (K), festgestellt, welche auf Schwankungen der Brennstoffqualität zurückgeführt werden können.

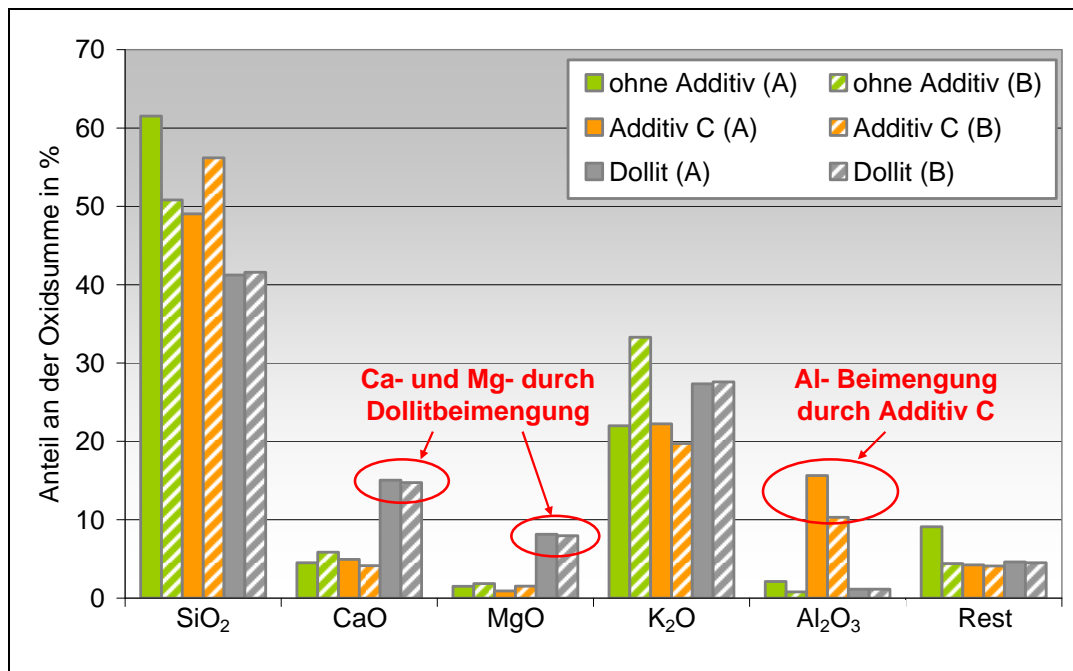


Abbildung 9: Anteil der Hauptaschebildner in den Pellets für die Verbrennungsversuche (Darstellung der einzelnen Elemente in oxidischer Form als Anteil an der Oxidsumme)

Auf Basis der Analysen von Rohstoff und Additiven wird für die Versuchspellets eine theoretische Elementarzusammensetzung errechnet. Ein Vergleich mit den gemessenen Konzentrationen zeigt für die im Additiv enthaltenen Elemente Ca und Mg eine gute Übereinstimmung bei einer Beimengung von 3% Dollit. Die Al-Konzentration in den Pellets mit Additiv C ist deutlich niedriger, als bei einer Additivbeimengung von 1,5 % zu erwarten wäre. Aufgrund produktionstechnischer Gründe – die Additivzufuhr konnte anlagenbedingt im Prozess nicht weiter erhöht werden – wird hier der vorgesehene Anteil von 1,5% nicht erreicht. Die auf Basis der Analysenergebnisse abgeschätzte Elementkonzentration liegt bei etwa 0,5%.

Die Ergebnisse der brennstofftechnischen Charakterisierung sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Brennstofftechnisch relevante Eigenschaften der Versuchspellets. (Probe 1 und Probe 2 wurden jeweils aus unterschiedlichen BigBags einer Charge gezogen.)

Charge	Probe	w	a	Heizwert	FIB	Dichte	Abrieb
Weizenstroh ohne Additiv	1	9,1	6,3	17,18	75,4	1291	1,7
	2	9,3	5,1	17,27	75,6	1226	1,6
	3 <sup>*)</sup>	9,1	8,1	-	-	-	-
Weizenstroh mit Additiv C	1	8,4	5,9	17,16	75,6	1232	1,9
	2	9,5	6,3	17,16	75,5	1229	2,0
	3 <sup>*)</sup>	11,0	5,0	-	-	-	-
	4 <sup>*)</sup>	9,5	6,8	-	-	-	-
Weizenstroh mit Dollit	1	8,5	8,9	16,62	73,3	1246	1,5
	2	9,3	8,7	16,77	73,4	1270	1,5
	3 <sup>*)</sup>	9,1	6,7	-	-	-	-

\*) Brennstoffprobe im Rahmen der Versuchsdurchführung

Der Wassergehalt der Pellets liegt mit Werten von 8,4 – 11,0% in einem auch für Holzpellets typischen Bereich. Die Aschegehalte schwanken beträchtlich und sind am höchsten bei den Pellets Dollit was durch den hohen Additivanteil zu erklären ist. Die Analyseergebnisse für *Pellets ohne Additiv* und *mit Additiv C* variieren stark und liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Bei den *Strohpellets ohne Additiv* kann ein Unterschied bis zu 3,0% absolut festgestellt werden. Aufgrund des hohen Aschegehalts sind Heizwert und Anteil an flüchtigen Bestandteilen bei den Pellets mit Dollit erniedrigt. Hinsichtlich Abrieb und Dichte entsprechen alle Pellets den Anforderungen für Holzpellets nach ÖNORM M 7135.

Aufgrund der starken Schwankungen beim Aschegehalt werden im Verlauf des Versuchsprogramms zusätzliche Proben analysiert (diese sind in Tabelle 8 gekennzeichnet). Die Ergebnisse der Analysen für den Aschegehalt sind in Abbildung 10 dargestellt. Die Graphik zeigt beträchtliche Unterschiede innerhalb der einzelnen Chargen. Da auch beim unadditivierten Brennstoff erhebliche Schwankungen zu beobachten sind, ist unregelmäßige Additivbeimengung als mögliche Ursache auszuschließen. Diese Variationen sowie die Tatsache, dass bei den additivierten Brennstoffen teils niedrigere Aschegehalte gemessen werden als bei Stroh ohne Additiv, deuten auf Schwankungen in der Rohstoffqualität hin.

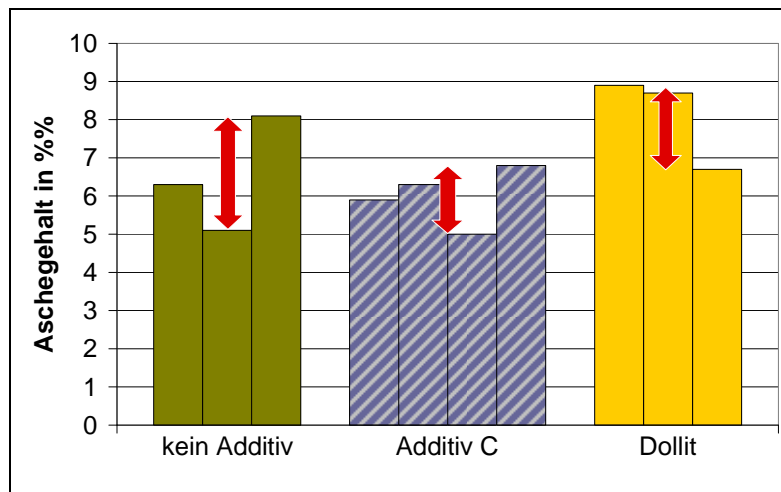


Abbildung 10: Aschegehalt der Brennstoffproben aus den Verbrennungsversuchen

### Verschlackungsneigung

Alle drei Brennstoffe zeigen eine ausgeprägte Verschlackungsneigung. Die Beschaffenheit der gebildeten Schlackebrocken variiert in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff bzw. Additiv, die Ausbildung von Schlackebrocken kann jedoch durch die Additivbeimengung nicht verhindert werden. Abbildung 11 zeigt Abbildungen der jeweiligen Verbrennungsrückstände.



Abbildung 11: Schlackebrocken aus der Verbrennung der drei Versuchsbrennstoffe

Bei den *Strohpellets ohne Additiv* sind die gebildeten Klumpen am deutlichsten verschmolzen, und es sind glatte glasartige Oberflächen erkennbar. Die *Pellets mit Additiv C* bilden ebenfalls stark versinterte Klumpen. Es sind jedoch deutlich weniger verschmolzene Bereiche erkennbar als bei den unadditvierten Pellets und die gebildeten Klumpen sind deutlich poröser und leichter zu zerbrechen. Die *Pellets mit Dollit* bilden ebenfalls Klumpen, welche im Vergleich am härtesten und auch am dichtesten sind. Trotz ihrer Größe von durchschnittlich etwa 5 – 10 cm können Schlackebrocken während des Betriebs eine Zeit lang ausgetragen werden. Je nach Brennstoff beginnen sich allerdings nach 2 bis 5 Stunden

Rückstände in der Verbrennungszone anzusammeln, was in weiterer Folge zu erhöhten Emissionen führt. Ein Verkleben, Verschmelzen oder Reaktionen der Schlacke mit dem Feuerfestmaterial kann dabei optisch nicht festgestellt werden.

### 7.1.3 Zusammenfassung Brennstoffe

Die Erweichungspunkte der unterschiedlich additivierten Pellets bewegen sich in einem sehr engen Bereich von 790°C bis 890°C, wobei keine eindeutige Tendenz in Abhängigkeit vom beigemengten Additiv zu beobachten ist. Die übrigen charakteristischen Temperaturen, wie Halbkugelpunkt, Sphärischpunkt und Fließpunkt, werden vor allem die Beimengung aluminiumhaltiger Additive erhöht.

Obwohl bei Ernte und Bereitstellung des Rohstoffs besonders sorgfältig vorgegangen wurde, ergeben die Analysen der Versuchsbrennstoffe starke Schwankungen, vor allem bezüglich des Aschegehalts bzw. der Konzentration einzelner Aschebildner (v.a. Kalium und Silizium). Die Ursache dafür ist in der Variation der Rohstoffqualität zu suchen. Die Additivbeimengung spiegelt sich in der Elementarzusammensetzung wider, wird jedoch stark durch die Schwankungen der Rohstoffqualität beeinflusst und teilweise sogar überlagert.

## 7.2 Ermittlung und Bewertung der Langzeitbeständigkeit von Feuerfestmaterial

### 7.2.1 Einflussnahme durch den Einsatz von Additiven

Wie auch in Kapitel 6.1 beschrieben erfolgte die Auswahl der verwendeten Additive anhand früherer Untersuchungen, welche gezeigt haben, dass vor allem die Beimengung kalzium-, magnesium- und aluminiumhaltiger Verbindungen das Ascheschmelzverhalten günstig beeinflusst (Figl 2006, Hartmann 2000, Reisinger 1993, Steenari 1998, Wopienka 2005). Jedoch ist ein möglicher Einfluss der Additive auf das in der Feuerung verwendete Feuerfestmaterial noch bei keiner der früheren Untersuchungen betrachtet worden.

Die Versuche zur Untersuchung der Einflussnahme durch den Einsatz von Additiven werden in der 15 kW Feuerung durchgeführt. Bei den Verbrennungsversuchen fiel auf, dass jene Brennstoffe mit Additiv ein besseres Verbrennungsverhalten aufwiesen. Die Schlacke war etwas poröser und ließ sich leichter zerkleinern. Abbildung 12 zeigt eine optische Gegenüberstellung von Material A nach dem Einsatz mit den verschiedenen Brennstoffen. Obwohl die Unterschiede nicht gravierend sind, lässt sich doch eindeutig feststellen, dass nach den Verbrennungsversuchen mit additivfreien Strohpellets die Oberfläche von Material A stark schwarz gefärbt ist. Bei diesen Versuchen kam es auch im größten Ausmaß zur Bildung von Schlacke, welche teilweise auf dem Material haften blieb, was besonders deutlich auf dem 2. Stein von unten auf dem Bild in Abbildung 12 zu sehen ist. Nach den Versuchen mit Strohpellets gemischt mit dem Additiv Dollit zeigte sich auf den

Materialoberflächen eine dünne Schicht hellgrauer Ablagerungen. Diese haftet sehr gut auf dem Material und stellt keine Schlackeanhaftungen dar, da sie auch auf den Steinen zu sehen ist, die nicht mit der Schlacke in Berührung gekommen sind. Es handelt sich dabei also um Ablagerungen, welche aus der Gasphase auf dem Material abgeschieden wurden.

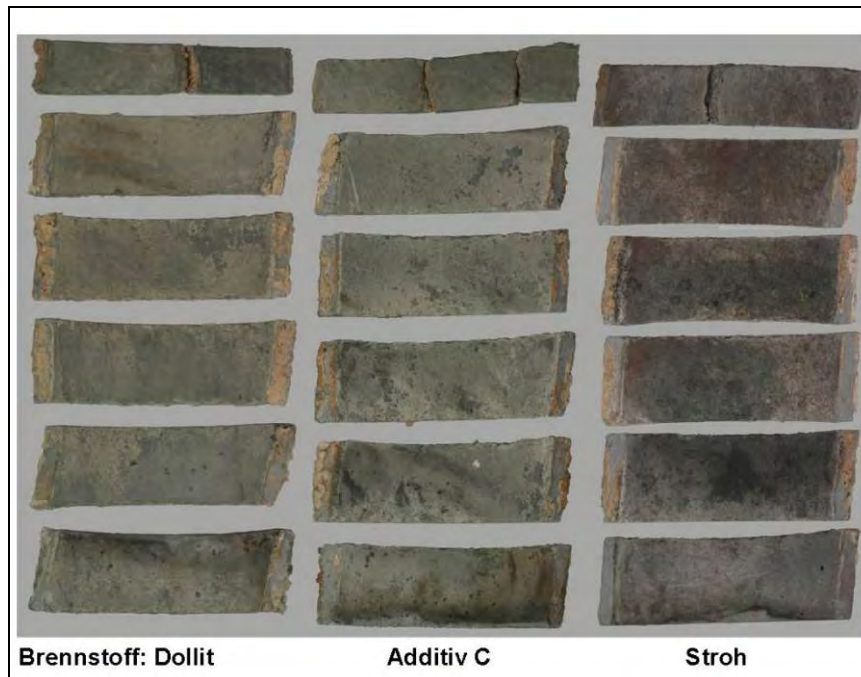


Abbildung 12: Einfluss des Brennstoffs auf das Material. Fotografischer Vergleich der Beeinflussung von Material A nach Einsatz mit allen drei Brennstoffen

Allein auf Grund der optischen Beurteilung ist eine Bewertung der Langzeitbeständigkeit der Materialien im gewünschten Einsatzgebiet allerdings nicht möglich. Daher, und im besonderen auch um Unterschiede in der Langzeitbeständigkeit zwischen den verschiedenen Feuerfestmaterialien besser bewerten zu können, werden Tiefenprofilmessungen der Elemente Kalium und Chlor mit Hilfe der EDX-Methode vorgenommen. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen für Material A in Abhängigkeit von den verschiedenen Brennstoffen und von unterschiedlichen Positionen in der keramischen Brennkammer.

Auffällig ist, dass nach den Verbrennungsversuch mit additvierten Strohpellets im Material höhere Konzentrationen von Kalium an der Oberfläche festgestellt werden, als nach der Verbrennung von additivfreiem Stroh. Bei dem Brennstoff Stroh mit 3 % Dollit zeigt sich eindeutig die stärkste Tendenz Kalium ans Feuerfestmaterial abzugeben.

Ein zweiter Effekt der ebenfalls sehr deutlich zu tragen kommt ist die Abhängigkeit der Eindringtiefe von Kalium von der Position des Materials in der Brennstoffkammer. Wie in Abbildung 4 skizziert liegen die unterschiedlichen Positionen in der Brennkammer in unterschiedlichen Temperaturzonen. Dabei entspricht Position 1 in der

Verbrennungskammer einem Temperaturbereich von 700 – 900°C und Position 5 entspricht einem Temperaturbereich von 1100 – 1300°C. Damit lässt sich erklären, warum die Eindringtiefen von Kalium in das Feuerfestmaterial bei Position 5 höhere Konzentrationen aufweisen als bei Position 1. Die Infusion des Materials mit Kaliumionen beruht auf einem diffusionskontrollierten Prozess, und diese Prozesse werden bei hohen Temperaturen verstärkt. Daher sind die Kaliumkonzentrationen bei den keramischen Proben, welche höheren Temperaturen ausgesetzt waren, auch dementsprechend höher, als bei den Proben, welche niedrigeren Umgebungstemperaturen bei der Verbrennung ausgesetzt waren.

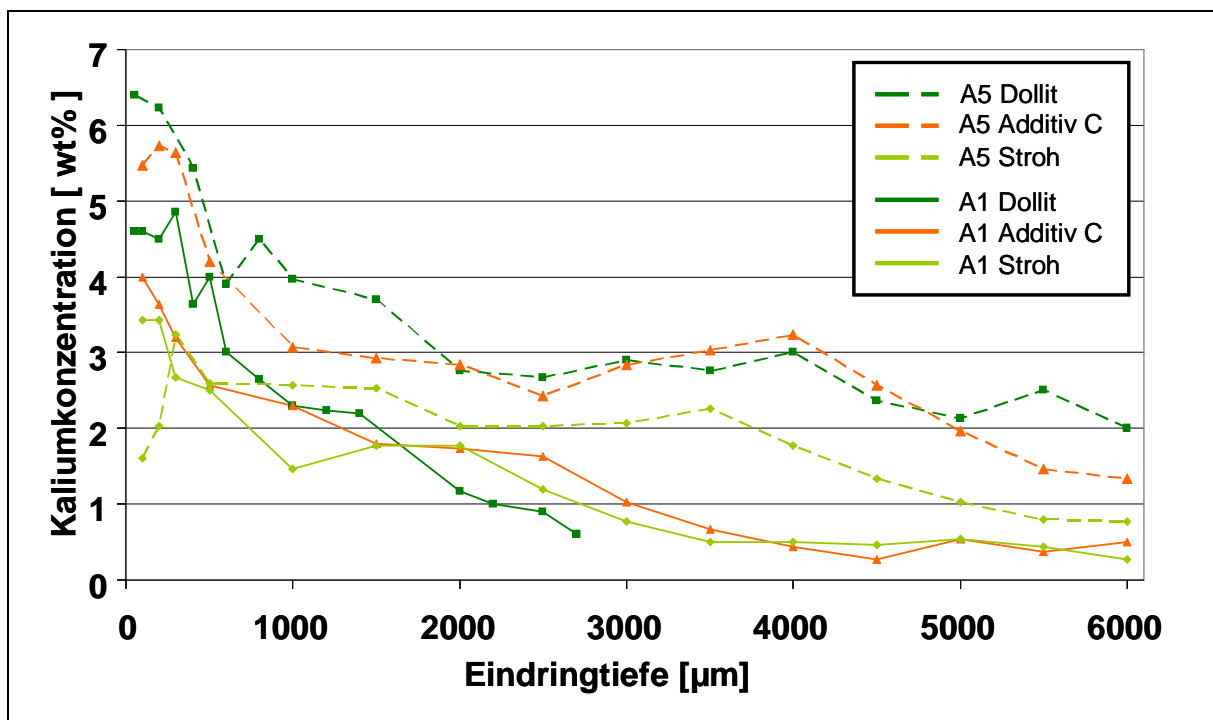


Abbildung 13: Mittelwerte der Eindringtiefen von Kalium ins Material in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Position in der Brennkammer beispielhaft an Material A

Bei der Infiltration der Feuerfestmaterialien mit Kaliumionen und Chloridionen handelt es sich um einen Gasphasenprozess. Bei hohen Temperaturen in der Brennkammer bilden Kalium und Chlor mit anderen Brennstoffkomponenten flüchtige Bestandteile, welche an kälteren Stellen der Feuerung wieder abgelagert werden und dort ins Material diffundieren können. Kommt es zur Bildung von flüssigen Schlacken, kann es auch zu einer direkten Diffusion der in der Schmelze gelösten Ionen ins Material kommen. Bei höheren Temperaturen läuft die Diffusion der Ionen ins Material schneller ab, dennoch könnte es noch einen weiteren Grund dafür geben, dass die Elementkonzentration von Kalium auf den Steinen von Position 5 höher ist, als auf tiefer gelegenen Positionen. Während der Verbrennung kam es bei allen 3 Brennstoffen zur Bildung von Schlacken, welche sich im hinteren Teil der Brennkammer ansammelte. Die „Schlackzone“ in der Brennkammer reichte niemals über die Höhe von



Position 3 in der Brennkammer. Möglicherweise bildete die Schlacke eine Art Sperrschicht in unmittelbarer Nähe zur Materialoberfläche aus, welche die Gasphasendiffusion der Ionen ins Material erschwert hat. Um diese Hypothese genauer zu untersuchen, bedürfte es allerdings weiterer Messungen, welche sich in geeigneter Weise mit diesem Phänomen auseinandersetzen. Ausserdem gilt es noch zu beweisen, dass es sich bei den unterschiedlichen Auswirkungen der Brennstoffe tatsächlich um Einflüsse bedingt durch die Additive handelt und nicht lediglich um Effekte hervorgerufen durch die stark schwankenden Qualitäten der verwendeten Brennstoffe.

## 7.2.2 Einfluss der Betriebsbedingungen

### Einfluss oxidierender/reduzierender Atmosphäre und Temperatur (15 kW Feuerung)

Die Brennkammer (schematisch dargestellt in Abbildung 4) teilt sich in eine relativ kleine reduzierende Zone im Bereich von Brennkammerposition 1 und eine große oxidierende Zone, Brennkammerposition 2-6. Abbildung 14 zeigt die fotografischen Aufnahmen aller drei Feuerfestmaterialien nach den Verbrennungsversuchen mit den mit Dollit additivierten Strohpellets. Am oberen Rand der Steine von Brennkammerposition 1 hat sich ein Rand aus schwarzen Verbrennungsrückständen gebildet. Die dunkle Färbung ist vermutlich auf Pyrolyseprodukte zurück zu führen, was darauf hindeutet, dass sich dort eine reduzierende Verbrennungszone ausgebildet hat. Dieser Rand ist auf den Steinen von Brennkammerposition 2 und höher nicht zu sehen.

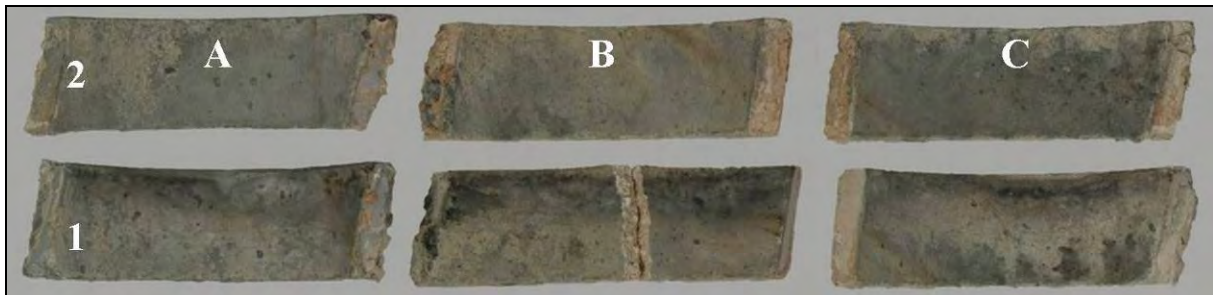


Abbildung 14: Keramisches Material nach der Verbrennungsversuche mit Dollit, Steine von Position 1 untere Reihe und Position 2 obere Reihe

Abbildung 15 zeigt die Eindringtiefen von Kalium in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsbedingungen exemplarisch am Material A nach den Verbrennungsversuchen mit Pellets mit Additiv C. Deutlich zu erkennen ist, dass die die Infiltration mit Kalium in einem wesentlich höheren Maß auf den Steinen in Position 3 und 5 stattgefunden hat, als auf Position 1. Dieser Trend zeigt sich für alle drei gewählten Feuerfestmaterialien bei jedem der drei verwendeten Brennstoffe. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass dieses Ergebnis allein auf die in den verschiedenen Brennkammerpositionen unterschiedlichen Temperaturzonen zurückzuführen ist. Wie in Kapitel 7.2.1 schon erläutert spielt bei diffusionskontrollierten Vorgängen der Parameter Temperatur eine entscheidende Rolle. Um

den Einfluss einer reduzierenden im Gegensatz zu einer oxidierenden Verbrennungsumgebung auf die Beständigkeit des Materials zu bestimmen, wären Experimente bei vergleichbaren Versuchstemperaturen notwendig.

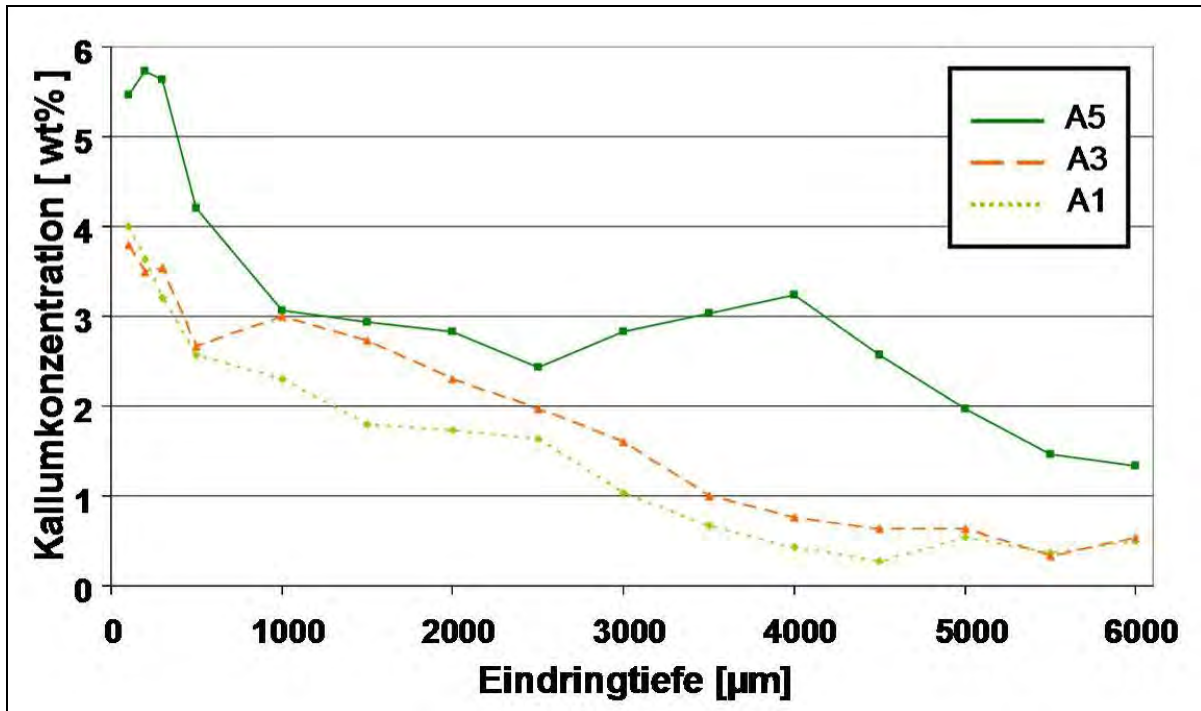


Abbildung 15: Eindringtiefen Kalium an Material A nach Verbrennungsversuchen mit Pellets mit Additiv C in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen; A1 reduzierend, A3 und A5 oxidierend

### Wechselwirkungen zwischen Schlacke und Feuerfestmaterial (150 kW Feuerung)

Beim Betrieb der großen Feuerungsanlage entstehen keine Zonen unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen im Bereich der Feuerfestproben. Auch die Brennraumtemperatur kann für die Bereiche der Probennahme als gleichbleibend eingestuft werden. Unterschiede zwischen den entnommenen Proben könnten sich daraus ergeben, dass die Proben aus den unteren Bereichen der Brennraumbür einen intensiveren Kontakt mit der bei der Verbrennung entstandenen Schlacke haben, als die Proben aus höheren Bereichen der Tür. In Abbildung 16 wird der Einfluss dieser Wechselwirkung dargestellt. Dabei zeigt sich, dass für die Dauer des Verbrennungsversuches keine signifikanten Unterschiede in der Eindringtiefe von Kaliumionen für die unterschiedlichen Brennkammerpositionen entstanden sind. Material G zeigt im Vergleich zu Material A in den obersten Oberflächenschichten sehr viel höhere Kaliumkonzentrationen, welche aber nach ca. 1500 µm auf etwa die gleichen Konzentrationswerte wie in Material A abfallen. Der Hersteller des Werkstoffes geht davon aus, dass die hohe Konzentration in Material G auf die Ausbildung einer Diffusionssperrschicht zurückzuführen ist, welche, einmal ausgebildet,

die weitere Infiltration von Kaliumionen ins Materialinnere erheblich behindert. Da die Infiltration für alle untersuchten Materialien nicht über eine Eindringtiefe von 2000  $\mu\text{m}$  nachgewiesen werden konnte, kann diese Annahme durch die Resultate nicht bestätigt werden.

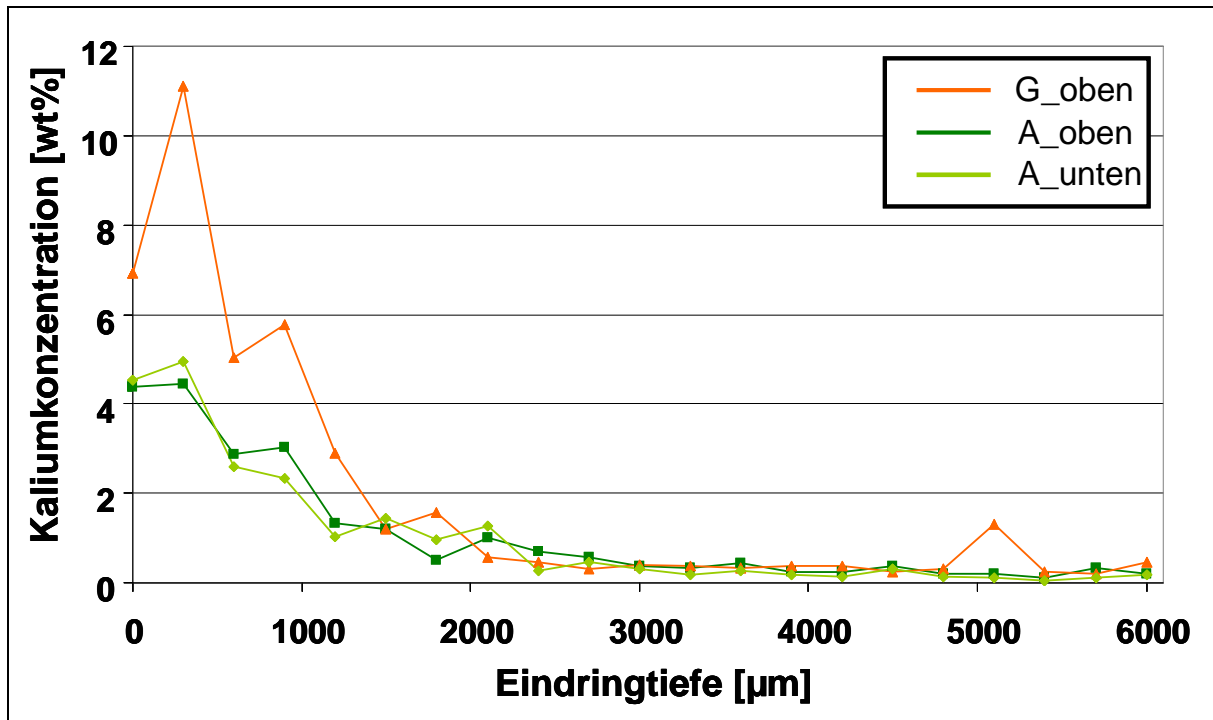


Abbildung 16: Einfluss der Wechselwirkung von Verbrennungsschlacke mit dem Feuerfestmaterial

### Einfluss der Temperatur (Vergleich der Proben aus den beiden Feuerungsanlagen)

Aus den bisher aufbereiteten Ergebnisse kann gezeigt werden, dass als entscheidende Korrosionsfaktoren in den Verbrennungsversuchen vor allem die Brennstoffzusammensetzung, die Zusammensetzung des Feuerfestmaterials und die Brennraumtemperatur wirken.

Ein Vergleich der Korrosionsergebnisse bei der 15 kW Anlage mit der 150 kW Anlage ist in diesem Sinne also zulässig, wenn die Parameter Brennstoff, Feuerfestmaterial und Betriebsstundenanzahl vergleichbar sind. Abbildung 17 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Eindringtiefe von Kalium ins Feuerfestmaterial A nach Verbrennung von Strohpellets mit Additiv C. Die gestrichelten Linien repräsentiert Ergebnisse der 15 kW Anlage. Die Temperaturen in der 150 kW Anlage sind in etwa vergleichbar mit den Temperaturen an Probe A1 aus der 15 kW Anlage. Die Proben A3 und A5 waren höheren Betriebstemperaturen ausgesetzt, daher auch die größeren Eindringtiefen.

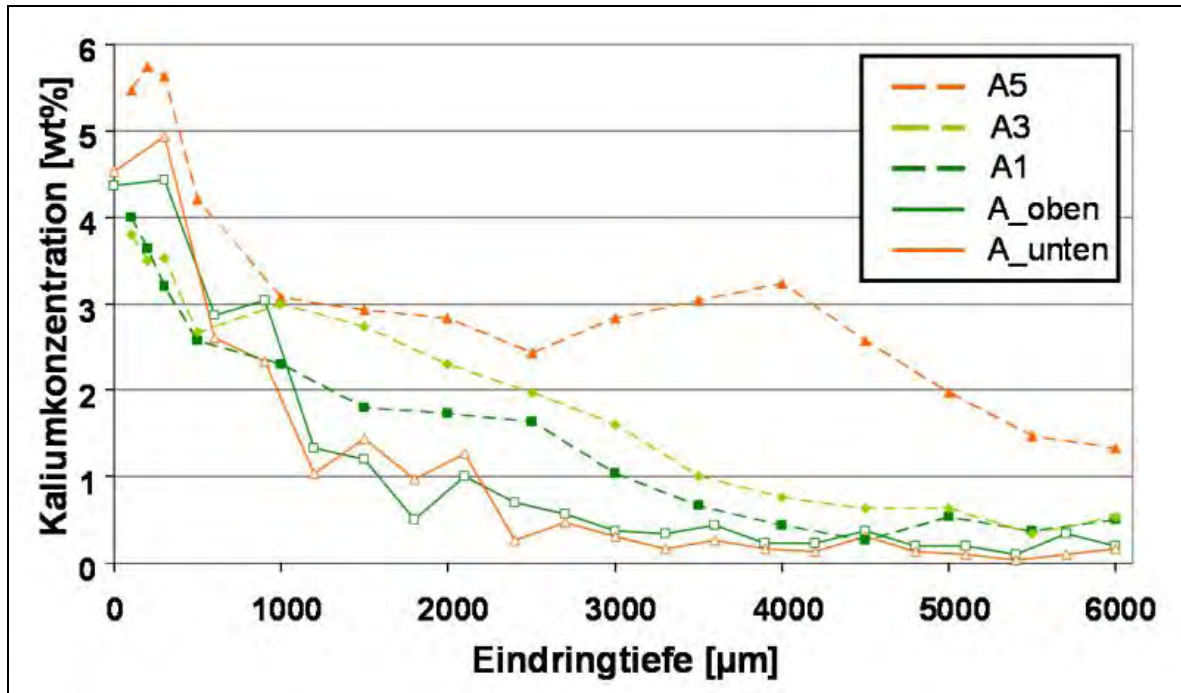


Abbildung 17: Vergleich der Korrosionsergebnisse der 15 kW mit der 150 kW Anlage; die durchgängigen Linien sind Ergebnisse der 150 kW Anlage

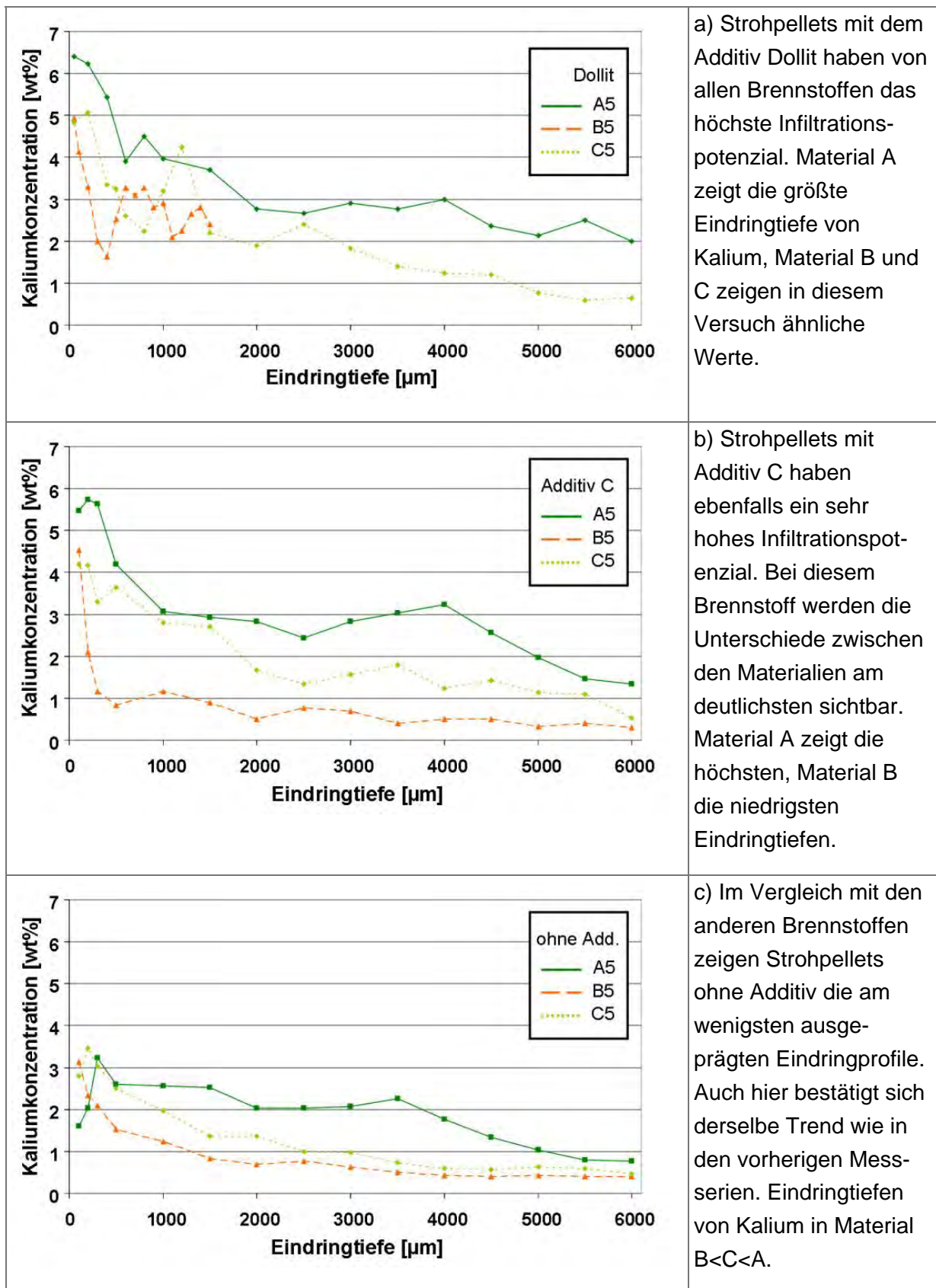
In den EDX-Untersuchungen können weder Spuren einer Chloridinfiltation am Material A, noch am Material G gemessen werden. Dieses Ergebnis kann ebenfalls im Licht der Temperaturabhängigkeit der Diffusionsprozesse gedeutet werden. Da die Brennraumtemperaturen mit ca. 700°C im Vergleich zur 15 kW Anlage sehr niedrig sind, wären längere Betriebszeiten notwendig, um ein Eindringen von Chlorid ins Material in für die Detektion ausreichender Konzentration zu erreichen.

### 7.2.3 Vergleich der Feuerfestmaterialien untereinander

#### 15 kW Feuerung

Im Vergleich untereinander unterscheiden sich die Feuerfestmaterialien in ihrer Versuchsbeständigkeit nach optischen Kriterien nicht. Alle drei Materialien erweisen sich für die gewählten Versuchsanforderungen als geeignet und es kann kein sich schädlich auswirkender äußerer Angriff auf den Steinen festgestellt werden.

Die EXD-Untersuchungen der Feuerfestmaterialien zeigen jedoch, dass die Eindringtiefen von Kalium- beziehungsweise Chloridionen stark vom Material abhängen. Abbildung 18 zeigt diese Abhängigkeit.



a) Strohpellets mit dem Additiv Dollit haben von allen Brennstoffen das höchste Infiltrationspotenzial. Material A zeigt die größte Eindringtiefe von Kalium, Material B und C zeigen in diesem Versuch ähnliche Werte.

b) Strohpellets mit Additiv C haben ebenfalls ein sehr hohes Infiltrationspotenzial. Bei diesem Brennstoff werden die Unterschiede zwischen den Materialien am deutlichsten sichtbar. Material A zeigt die höchsten, Material B die niedrigsten Eindringtiefen.

c) Im Vergleich mit den anderen Brennstoffen zeigen Strohpellets ohne Additiv die am wenigsten ausgeprägten Eindringprofile. Auch hier bestätigt sich derselbe Trend wie in den vorherigen Messerien. Eindringtiefen von Kalium in Material  $B < C < A$ .

Abbildung 18: Kaliumeindringtiefen in Abhängigkeit von Feuerfestmaterial und Brennstoff

Material A zeigt sich nicht nur beim Vergleich der Eindringtiefen von Kalium, als das Material mit dem höchsten Infiltrationspotential. Es ist auch das Material bei dem ein Eindringen von Chloridionen in einer signifikant hohen Konzentration gemessen werden konnte. Die Werte für Material C sind innerhalb der Nachweisgrenze der Methode und somit nicht aussagekräftig. Material B weist im Vergleich zu Material A tendenziell niedrigere Eindringtiefen für Chlorid auf. Das spontane Ansteigen der Chloridkonzentrationen im Material B ab einer Eindringtiefe von 1200  $\mu\text{m}$  kann phänomenologisch nicht zufriedenstellend erklärt werden, da das dazu notwendige Datenmaterial fehlt. Alle Daten im Vergleich werden in Abbildung 19 dargestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nachweisbar hohe Chloridkonzentrationen nur für jene Proben nachgewiesen werden konnte, welche sich an den Stellen mit den höchsten Verbrennungstemperaturen befanden und nur für den Verbrennungsversuch mit dem Brennstoff, der als jener mit dem höchsten Infiltrationspotenzial eingestuft wurde.

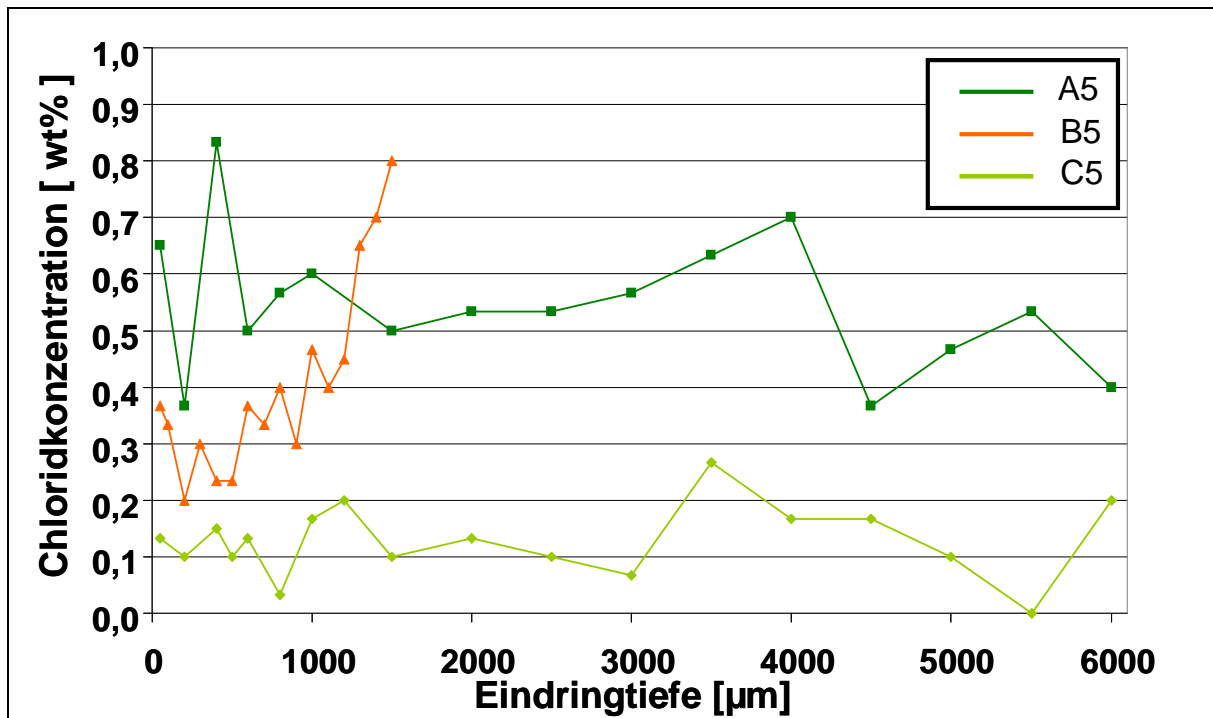


Abbildung 19: Eindringtiefen von Chlorid in Abhängigkeit vom Feuerfestmaterial, Versuchsbrennstoff Stroh mit Dollit

#### 7.2.4 Zusammenfassung Korrosion

Alle getesteten Feuerfestmaterialien erweisen sich als gut geeignet den an sie gestellten Anforderungen zu entsprechen. Durch optische Bewertung können keine signifikanten Unterschiede in der Leistungsfähigkeit oder gar ein Versagen eines der Materialien festgestellt werden. Untersuchungen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie zeigen Unterschiede im Infiltrationspotential der verschiedenen Materialien mit Kalium- und

Chloridionen, allerdings ist dies noch kein ausreichendes Argument für eine unterschiedliche Bewertung der keramischen Werkstoffe hinsichtlich möglicher Unterschiede in ihrer Langzeitbeständigkeit.

Da die bisherigen Ergebnisse keine signifikanten Auswirkungen der Faktoren Brennraumatmosfera und Wechselwirkungen zwischen Schlacke und Feuerfestmaterial gezeigt haben, wurden als entscheidende Korrosionsfaktoren in den Verbrennungsversuchen vor allem die Brennstoffzusammensetzung, die Zusammensetzung des Feuerfestmaterials, Einsatzdauer des Materials und die Brennraumtemperatur identifiziert.

## **7.3 Ermittlung und Bewertung der Emissionen aus KFAs die mit Strohpellets betrieben werden**

### **7.3.1 Reduktionspotential von NO<sub>x</sub> und partikelförmigen Emissionen durch Primärmaßnahmen**

Die Versuchsfeuerung ist für 150 kW bei Betrieb mit Holzpellets ausgelegt. Vorversuche haben gezeigt, dass mit Strohpellets nur dann ein zuverlässiger Betrieb möglich ist, wenn die maximale Brennstoffzufuhr begrenzt wird. Durch die geringere Menge an Brennstoff befindet sich auch weniger Asche im Rostbereich, was der Ausbildung von Zusammenbackungen und Schlackebrocken entgegenwirkt. Die tatsächlich abgenommene Leistung liegt somit zwischen 78 und 93 kW.

Um den Einfluss von Luftstufung, Luftüberschuss sowie Rauchgasrezirkulation zu untersuchen, wurden die Einstellungen so gewählt, dass jeweils eine Größe variiert wurde, und die restlichen Einstellungen nach Möglichkeit konstant blieben. Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die Einstellungen an den einzelnen Betriebspunkten, sowie den in diesen Messintervallen ermittelten Luftüberschuss und die abgenommene Leistung.

Eine besondere Herausforderung stellte die Einstellung von Primär- und Sekundärluftvolumenströmen dar, welche aufgrund der Druckverhältnisse im Brennraum nicht unabhängig voneinander variiert werden konnten. Um die tatsächlichen Luftmengen zu ermitteln wurde daher die Sekundärluftmenge über die Gasgeschwindigkeit im Ansaugrohr bestimmt, und der Primärluftvolumenstrom über die Differenz zur Gesamtluftmenge berechnet (bei der zweiten Messserie gingen die Daten zur Gasgeschwindigkeit aufgrund von Hardwareproblemen leider verloren, hier erfolgt eine qualitative Bewertung der Einstellungen (vgl. „SL-Einstellung“ in Tabelle 9). Aussagen über den Einfluss der Luftstufung können somit nur in eingeschränktem Ausmaß getroffen werden.

Tabelle 9: Übersicht über Einstellungen sowie Luftüberschuss und abgenommene Leistung bei den Versuchsvariationen am TDS Powerfire

Mess- intervall	Staub- messung	Brennstoff	PL- Einstellung	SL- Einstellung	Rezi- Einstellung <sup>4</sup>	SL- Menge	Leistung	Luft- überschuss
-	-	-	%	%	%		kW	-
			Einstellungen			Intervallmittelwert		
1	x	02A	72,8	1	0	13,7	87	2,34
2	x	02A	59,2	1	0	12,1	87	2,00
3	x	02A	40,0	1	0	9,2	91	1,68
4	x	02A	40,0	1	0	9,2	88	1,62
5	x	02A	40,0	4	0	36,8	89	1,92
6	-	02B	59,2	1	0	-	80	2,03
7	x	02B	48,0	4	0	-	79	1,80
8	-	02B	56,0	4	0	-	84	1,86
9	-	02B	76,0	2	20	-	89	1,82
10	-	02B	76,0	3	50	-	93	1,73
11	x	02B	80,0	4	20	-	79	2,23
12	x	02B	75,0	4	50	-	78	2,08
13	x	02B	75,0	4	60	-	82	2,08

PL.....Primärluft                      SL.....Sekundärluft                      RG.....Rauchgas

Im Folgenden ist der Einfluss der untersuchten Parameter auf die Freisetzung gas- und partikelförmiger Emissionen dargestellt und bewertet.

### 7.3.1.1 Stickoxidemissionen

Für den Betrieb mit Strohpellets im Rahmen der Dauerversuche zur Korrosionsuntersuchung (siehe Kapitel 7.2) wurde die maximale Brennstoffzufuhr herabgesetzt. Die übrigen Anlageneinstellungen blieben unverändert, sodass die Feuerung mit hohem Luftüberschuss betrieben wurde. Im Rahmen der Versuche zur Emissionsminderung wird der Luftüberschuss herabgesetzt, um einen Luftüberschuss einzustellen, wie er bei Betrieb mit Holzpellets üblich ist. Abbildung 20 zeigt die mittleren NO<sub>x</sub>- sowie CO-Emissionen für 3 Betriebszustände mit unterschiedlichem Luftüberschuss bei vergleichbarem Primär- zu Sekundärluftverhältnis.

<sup>4</sup> Die Einstellungen der Rauchgasrezirkulation beziehen sich auf die Gebläsedrehzahl des Ventilators und nicht auf den Anteil des rezirkulierten Stromes am gesamten Abgasstrom. Die Zahlen stellen daher nur qualitative Größen dar.



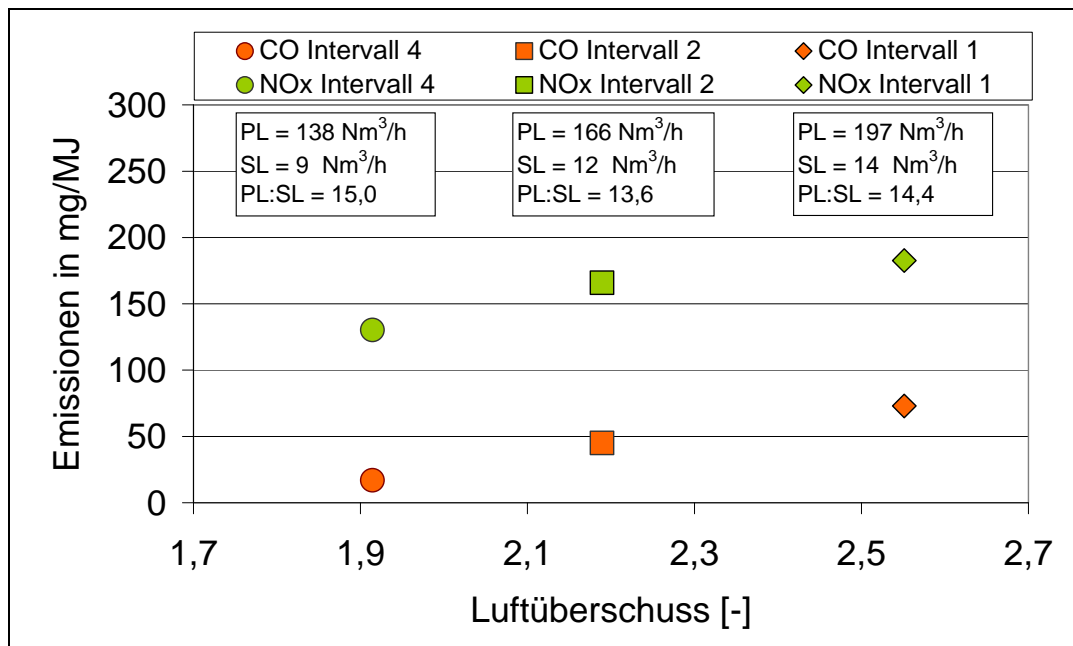


Abbildung 20: NO<sub>x</sub>- sowie CO-Emissionen für 3 Betriebszustände mit unterschiedlichem Luftüberschuss. (Die dargestellten Werte sind Mittelwerte über Intervalle von 60 Minuten.)

Stickoxidemissionen steigen mit zunehmendem Luftüberschuss [Eskilsson 2004]. Wie daher zu erwarten ist, kann eine Abnahme der NO<sub>x</sub>-Emissionen mit sinkendem Luftüberschuss festgestellt werden. Sie werden dabei von 183 mg/MJ um etwa 30% auf 130 mg/MJ bei einem durchaus üblichen Lambda-Wert von 1,9 reduziert. Auch der charakteristische Zusammenhang der CO-Emissionen in Abhängigkeit vom Luftüberschuss [vgl. Nussbaumer 1989] verläuft so, dass die Emissionen im untersuchten Bereich durch eine Reduktion des Luftüberschusses reduziert werden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Rauchgasrezirkulation wurden Versuche mit unterschiedlichen Rezirkulationsvolumenströmen bei zwei verschiedenen Betriebspunkten durchgeführt. Die ermittelten Emissionswerte sind graphisch in Abbildung 21 dargestellt.

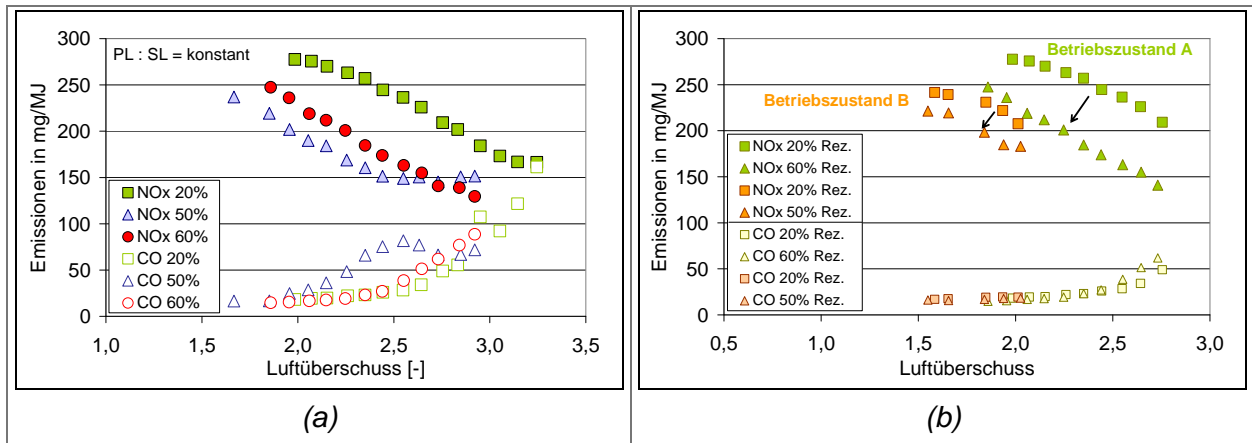


Abbildung 21: NO<sub>x</sub>- und CO-Emissionen bei unterschiedlichen Rauchgas-Rezirkulationsraten an einem Betriebspunkt (a) sowie bei zwei verschiedenen Betriebszuständen (b)

Graphik (a) zeigt den Verlauf der NO<sub>x</sub>- sowie der CO-Emissionen an einem Betriebspunkt bei konstantem Primär- zu Sekundärluftverhältnis. Der qualitative Kurvenverlauf der Stickoxidemissionen mit zunehmendem Luftüberschuss ist bei allen drei Rezirkulationseinstellungen gleich. Dabei ist mit zunehmendem Rezirkulationsvolumenstrom ein Absinken der Emissionswerte zu beobachten. Der Kurvenverlauf bei einer Rezirkulationseinstellung von 50% liegt, entgegen den Erwartungen, nicht zwischen den Werten bei 20% und 60%, sondern über weite Bereiche unter den Emissionswerten bei 50%. Dies ist durch die erhöhten CO-Werte in diesem Intervall zu erklären, welche zusätzlich reduzierend wirken und damit den Gehalt an oxidierten Stickstoffverbindungen weiter absenken können.

Graphik (b) stellt die Kurven für Rezirkulationseinstellungen von 20% und 60% aus Graphik (a) (Betriebszustand A) den Ergebnissen bei jeweils ähnlichen Rezirkulationsbedingungen an einem anderen Betriebspunkt (Betriebszustand B) gegenüber. Die Emissionswerte liegen unter jenen bei Betriebszustand A, es ist jedoch auch hier eine Reduktion bei Erhöhung der Rauchgasrezirkulation festzustellen. Bei einem Luftüberschuss von 2 liegt die Reduktion bei 15 – 20%.

### 7.3.1.2 Staubemissionen

Bei ausgewählten Betriebszuständen werden zusätzlich zur Bestimmung der gasförmigen Emissionen auch die partikelförmigen Emissionen quantifiziert. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der Einzelmessungen in Abhängigkeit von Kohlenmonoxid im Abgas. Die beiden Messserien sind mit „I“ bzw. „II“ gekennzeichnet, jene Messwerte, die bezüglich einer Einstellung verglichen werden können, sind in einheitlichen Farben markiert.

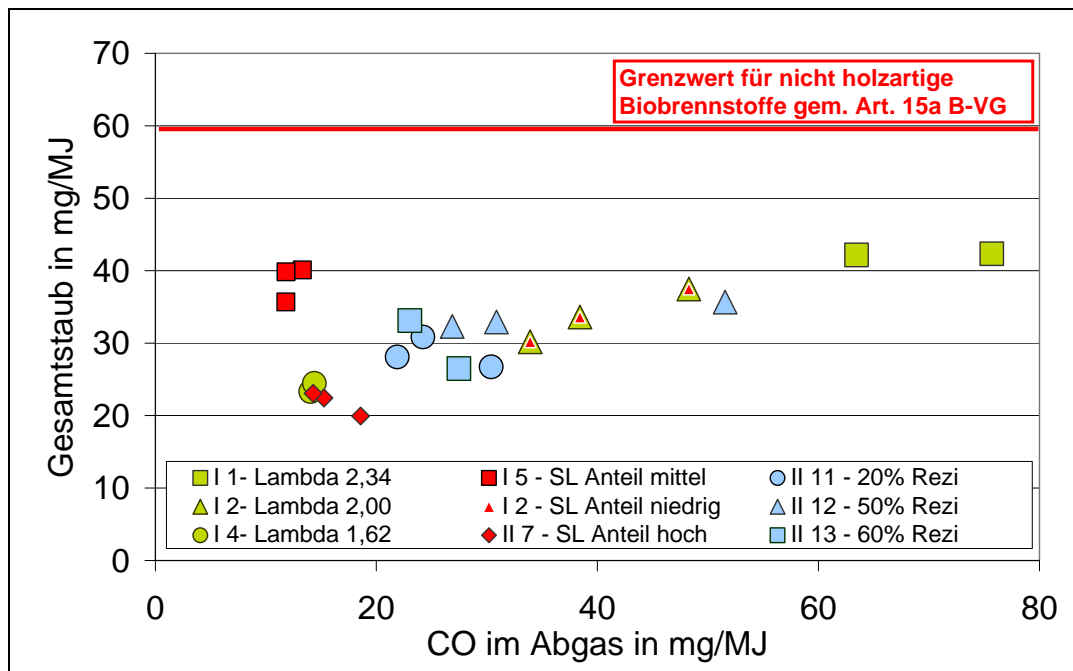


Abbildung 22: Staubemissionen aus der Verbrennung von Stroh im TDS Powerfire bei verschiedenen Betriebseinstellungen. (Die dargestellten Werte entsprechen Einzelmessungen.)

Alle Staubmessungen, die im Rahmen des Versuchsprogramms durchgeführt wurden, ergeben Emissionswerte unter 50 mg/MJ, und halten so den geplanten Grenzwert für Staubemissionen aus der Verbrennung nicht holzartiger Biomassen in automatisch beschickten Feuerungsanlagen von 60 mg/MJ ein. Im Vergleich zu Ergebnisse aus vorangegangenen Projekten oder anderen Messungen sind diese Werte relativ niedrig [Wopienka 2006b, Turowski 2008]. Mit Ausnahme einer Messung (I 5) zeigen die Werte beider Messserien eine gute Übereinstimmung. Dabei kann trotz des hohen Gasphasenausbrands ein Anstieg mit zunehmenden Kohlenmonoxidkonzentrationen im Abgas beobachtet werden. Die optische Begutachtung der Filterhülsen nach der Messung zeigte mitunter eine schwarze bis dunkelgraue Staubfarbe, was auf unvollständig verbrannte organische Kohlenstoffverbindungen hinweist. Ein messbarer Anteil an organischen Bestandteilen im Staub ist somit trotz der hohen Verbrennungsqualität denkbar.

Ein Vergleich der Werte bezüglich ihrer Betriebsbedingungen zeigt, dass die Staubemissionen mit abnehmendem Luftüberschuss geringer werden. Ein Vergleich der Messungen bei I 2 und I 7 lässt darüber hinaus eine Verringerung partikelförmiger Emissionen mit zunehmendem Sekundärluftanteil respektive abnehmendem Primärluftanteil vermuten. Die Variation der Rauchgasrezirkulationrate zeigt keinerlei Einfluss auf die freigesetzte Staubmenge.

## 7.3.2 Reduktionspotential von NO<sub>x</sub> und partikelförmigen Emissionen durch Einsatz eines Sekundärwärmetauschers mit Wäscherfunktion

### 7.3.2.1 Gasförmige Emissionen

O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> wurden über die gesamte Versuchsdauer hinweg aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die HCl Emissionen während einiger Staubmessversuche gemessen. In Tabelle 10 sind Emissionsmittelwerte während stabiler Verbrennungsphasen für die verschiedenen Betriebsbedingungen und Brennstoffe zusammengefasst.

*Tabelle 10: Emissionen während stabiler Verbrennungsphasen. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte stabiler Versuchsintervalle an mehreren Versuchstagen*

	Brennstoff	CO in mg/MJ		NO <sub>x</sub> in mg/MJ		SO <sub>2</sub> in mg/MJ		HCl in mg/MJ	
		STD	HC	STD	HC	STD	HC	STD	HC
Vollast	ohne Additiv	43	21	225	221	61	13	-	-
	Additiv C	48	44	221	219	63	16	15	4
	Dollit	77	74	238	224	46	8	13	4
Teillast	ohne Additiv	78	-	219	-	58	-	-	-
	Additiv C	82	66	210	213	61	9	11	4
	Dollit	77	63	209	215	40	8	-	-

Die im Abstand von einigen Stunden immer wieder entstehenden Verschlackungen im Brennraum verursachen eine Verschlechterung der Verbrennungsbedingungen und somit einen Anstieg der CO-Emissionen. Unter stabilen Verbrennungsbedingungen liegen die CO-Emissionen immer unter 100 mg/MJ, wobei die Werte im Teillastbetrieb deutlich erhöht sind. Der vorgeschriebene Grenzwert von 500 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)] kann somit jedenfalls eingehalten werden.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen lagen bei allen Brennstoffen in derselben Größenordnung. Mit 221 – 238 mg/MJ unter Vollastbedingungen und 209 – 219 mg/MJ im Teillastbetrieb konnte auch hier der Grenzwert von 300 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)] eingehalten werden.

Für Kleinfeuerungsanlagen existiert in Österreich kein Grenzwert für SO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Werte liegen hier bei etwa 58 – 63 mg/MJ für *Stroh ohne Additiv* und *Stroh mit Additiv C*. Bei der Verbrennung von Stroh mit Dollit werden etwas niedrigere Werte im Bereich von 40 – 46 mg/MJ gemessen. Hier könnte eine verstärkte Einbindung durch das Ca- und Mg-hältige Additiv erfolgt sein. Für HCl werden Emissionswerte im Bereich von 10 – 15 mg/MJ gemessen. Der Vergleich zeigt darüber hinaus eine deutliche Abnahme der SO<sub>2</sub> und HCl-

Emissionen bei Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup>, welche im Mittel um 81% (SO<sub>2</sub>) bzw. 68% (HCl) reduziert werden.

### 7.3.2.2 Partikelförmige Emissionen

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden der Einfluss der Betriebsweise und des Brennstoffs, sowie die Anwendung des Sekundärwärmetauschers mit Wäscher auf die Freisetzung partikelförmiger Emissionen untersucht. In Tabelle 11 sind durchschnittliche Staubemissionswerte bei Betrieb mit und ohne *Hydrocube*<sup>®</sup> für verschiedene Betriebszustände zusammengefasst.

*Tabelle 11: Durchschnittliche Staubemissionen mit und ohne Hydrocube<sup>®</sup> bei unterschiedlichen Betriebspunkten*

Brennstoffe	Emissionen in mg/MJ				
	Volllast			Teillast	
	Standard	HC	eHC	Standard	HC
Stroh ohne Additiv	68	54	20	n.d.	n.d.
Stroh mit Additiv C	74	59	17	91	71
Stroh mit Dollit	76	62	n.d.	86	76

Mit 68 – 76 mg/MJ unter Volllastbedingungen bzw. 86 – 91 mg/MJ im Teillastbetrieb sind die Staubemissionen relativ niedrig im Vergleich zu Ergebnisse aus vorangegangenen Projekten oder anderen Messungen [Wopienka 2006b, Turowski 2008]. Der Grenzwert von 60 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)] wird dennoch überschritten.

Überraschenderweise zeigen sich die niedrigsten Werte bei Verbrennung des unadditivierten Brennstoffs. Eine mögliche Ursache hierfür ist, dass die Schwankungen in der Brennstoffqualität unterschiedlich hohe Staubemissionen verursachen. Darüber hinaus könnte die verstärkte Schlackebildung bei *Stroh ohne Additiv* die Freisetzung partikelförmiger Emissionen beeinflussen.

Auf die Reduktion durch den Einfluss der Betriebsbedingungen der Feuerung sowie den Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup> wird im Folgenden näher eingegangen.

#### 7.3.2.2.1 Reduktionspotential durch Anwendung eines Sekundärwärmetauschers mit Wäscher

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden Staubmessungen bei Betrieb des Sekundärwärmetauschers sowie ohne Abscheidetechnologie als Referenz durchgeführt. Darüber hinaus wird eine Variation des *Hydrocube*<sup>®</sup>-Systems mit einer zusätzlich implementierten Elektrode getestet.

Für jeden Brennstoff und Betriebszustand wird der mittlere Abscheidegrad aus allen durchgeführten Versuchen errechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Staubabscheidung durch Anwendung des Hydrocube®

		Abscheidegrad in %		
		Stroh ohne Additiv	Stroh mit Additiv C	Stroh mit Dollit
Volllast	HC	11	22	19
	eHC	66	n.b.	61
Teillast	HC	n.b.	27	21

Bei Anwendung des Hydrocube® können Abscheidegrade von 20 – 25% erzielt werden. Mit dem System mit der zusätzlich implementierten Elektrode wird die Abscheidleistung auf bis zu 66% gesteigert. In Abbildung 23 sind die mittleren Staubemissionen bei der Verbrennung von *Stroh ohne Additiv* sowie *Stroh mit Additiv C* im Volllastbetrieb ohne Sekundärmaßnahme sowie bei Anwendung des Hydrocube® mit und ohne zusätzliche Elektrode dargestellt.

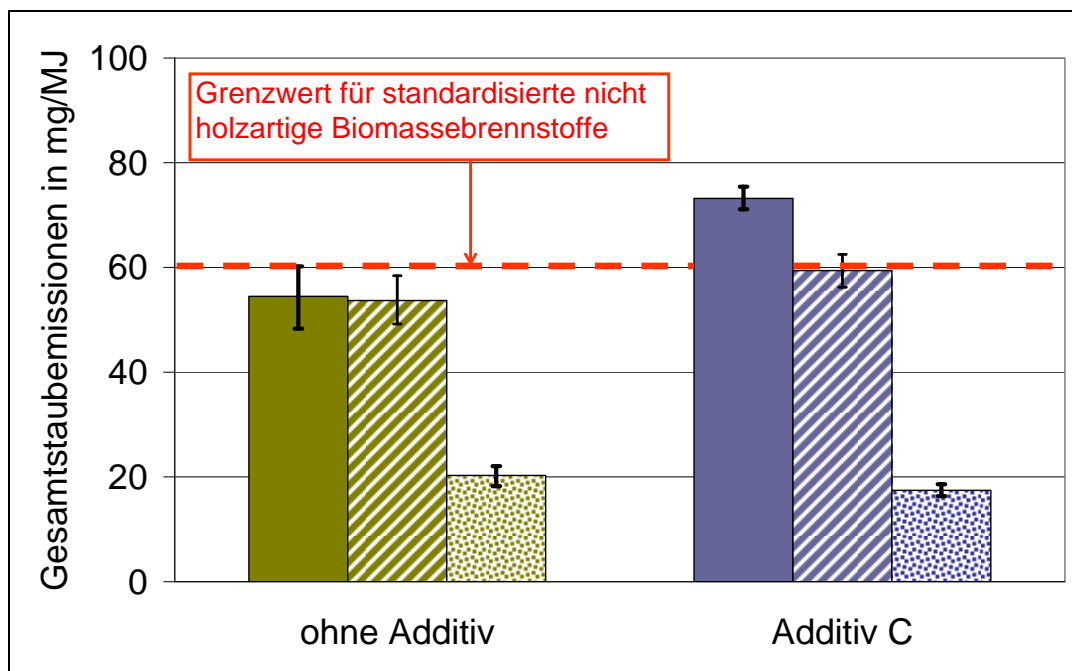


Abbildung 23: Mittlere Staubemissionen bei der Verbrennung von *Stroh ohne Additiv* sowie *Stroh mit Additiv C* im Volllastbetrieb ohne Sekundärmaßnahme, bei Anwendung des Hydrocube® sowie des Hydrocube® mit zusätzlich eingebauter Elektrode

Die Anwendung des Hydrocube® wirkt sich auch auf die Partikelgrößenverteilung aus. Die Grafiken in Abbildung 24 zeigen die Partikelanzahlverteilung (a) sowie die daraus, unter Annahme einer konstanten Partikeldichte, berechnete Partikelmassenverteilung (b) bei

Betrieb der Feuerung ohne und mit *Hydrocube*<sup>®</sup> sowie unter Verwendung des Sekundärwärmetauschers ohne nachgeschalteten Wäscher. Die in der Graphik dargestellten Ergebnisse sind Mittelwerte aus mehreren Versuchen (mit Ausnahme der Werte für „*Hydrocube*<sup>®</sup> ohne Wäscher“, für die nur ein Messergebnis zur Verfügung stand).

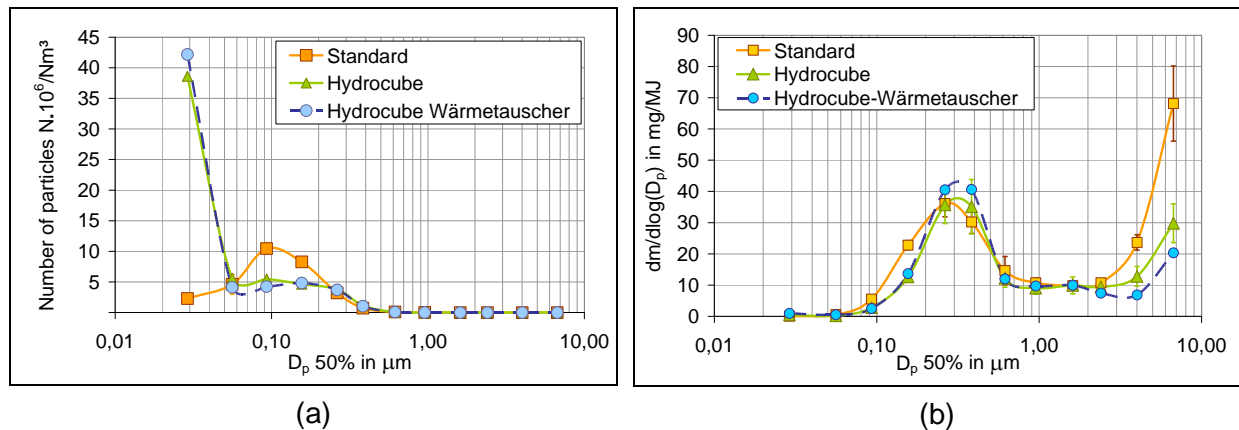


Abbildung 24: Partikelanzahl- (a) und daraus berechnete Massenverteilung (b) bei Betrieb der Strohfeuerung mit und ohne *Hydrocube*<sup>®</sup> sowie mit *Hydrocube*<sup>®</sup>-Wärmetauscher ohne Wäscher

Abbildung 24 (a) zeigt eine deutliche Reduktion der Partikelfraktion zwischen 0,06 µm und 0,26 µm bei Anwendung des Abscheidesystems, sowohl mit als auch ohne Wäscher. Darüber hinaus ist ein starker Anstieg der 30 nm Fraktion zu beobachten. Eine mögliche Erklärung für diesen Zuwachs der Partikelzahl ist, dass sich einzelne Komponenten in den durch Kondensation gebildeten Aerosoltröpfchen lösen, woraus dann in weiterer Folge durch Trocknung Partikel entstehen (ähnlich dem Prinzip welches technologisch bei der Sprühtrocknung angewendet wird) [Schwabl 2008].

Abbildung 24 (b) zeigt den typischen Verlauf einer Massenverteilung für Staubpartikel aus einer Biomassefeuerung mit einem Maximum bei etwa 0,3 µm (vgl. Oser 2003, Obernberger 2005). Das zweite Maximum ist im Bereich der größeren Partikelfraktion > 10 µm zu erwarten. Trotz der geringeren Zuverlässigkeit der verwendeten Methode (ELPI) für größere Partikelfraktionen [Nussbaumer 2008] kann tendenziell eine Reduktion der Partikel in diesem Bereich bei Einsatz des Sekundärwärmetauschers sowohl mit als auch ohne Wäscher festgestellt werden.

Im Allgemeinen sind kaum Unterschiede bei den Staubemissionen zwischen dem *Hydrocube*<sup>®</sup> und dem *Hydrocube*<sup>®</sup> ohne Wäscher zu beobachten. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Abscheidung der betrachteten Partikelfraktionen vor allem im Bereich des Wärmetauschers stattfindet. Eine Reduktion durch Einsatz des Wäschers wäre vor allem für größere Partikelfraktionen zu erwarten [Winiwarter 2007].

### 7.3.2.2 Einfluss des Lastverhaltens der Feuerung

Ein Vergleich der Lastzustände der Feuerung zeigt leicht erhöhte Staubemissionswerte bei Betrieb der Feuerung unter Teillastbedingungen. Die Graphik in Abbildung 25 zeigt durchschnittliche Staubemissionswerte mit und ohne Anwendung des *Hydrocube*<sup>®</sup> bei der Verbrennung von *Stroh mit Additiv C* unter Volllast- und Teillastbedingungen.

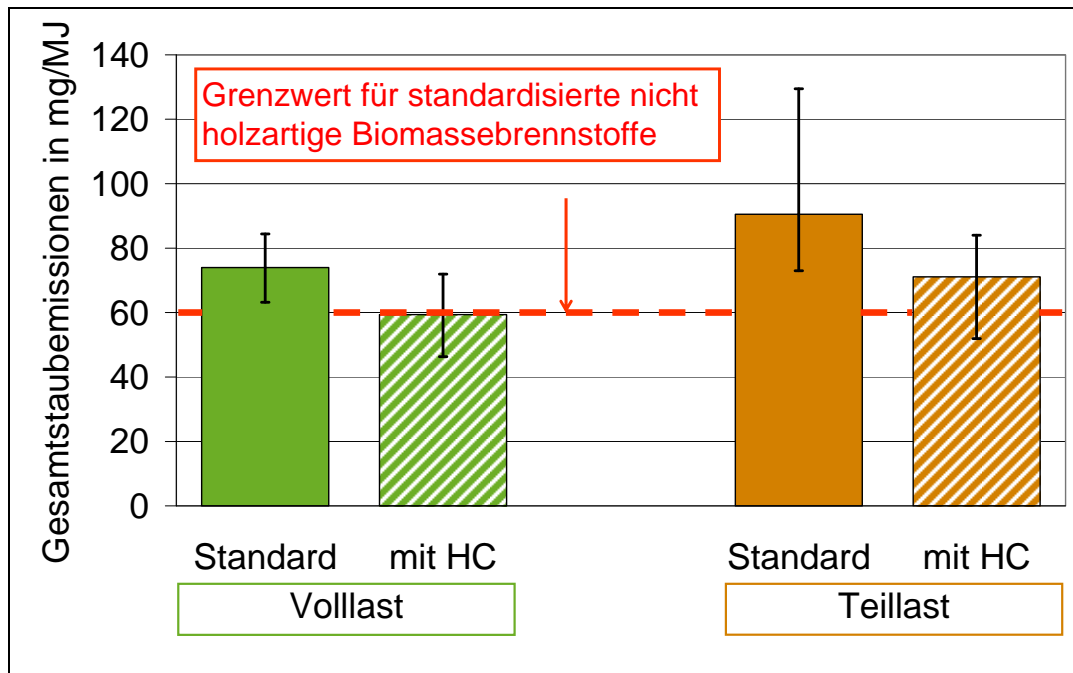


Abbildung 25: Durchschnittliche Staubemissionswerte mit und ohne Anwendung des *Hydrocube*<sup>®</sup> bei der Verbrennung von *Stroh mit Additiv C* unter Volllast- und Teillastbedingungen

Die Staubemissionen im Teillastbetrieb sind erhöht und darüber hinaus stärkere Schwankungen unterworfen. In beiden Betriebszuständen ist eine Reduktion durch Verwendung des Wärmetauschersystems festzustellen. Unter Volllastbedingungen kann durch den Betrieb des *Hydrocube*<sup>®</sup> eine Reduktion der Staubemissionen um 22% erreicht werden. Trotz reduzierter Emissionen wird der Grenzwert von 60 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)] bei einem großen Teil der Einzelversuche überschritten. Im Teillastbetrieb liegt der Abscheidegrad mit 27% im Mittel etwas höher (vgl. auch Tabelle 12). Aufgrund der höheren Ausgangswerte ist jedoch auch hier keine Reduktion bis unter den Grenzwert möglich.

Die Darstellung der Partikelgrößenverteilung in Abbildung 26 zeigt, dass die Partikelanzahl im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  im Teillastbetrieb gegenüber dem Volllastbetrieb verringert ist. Niedrigere Temperaturen im Brennraum und eine dadurch verminderte Entstehung von Partikeln über den Gas-Fest-Partikelpfad [Oser 2003, Livbjerg 2001] können als Ursache dafür angesehen werden. Messergebnisse ergeben, dass die Gesamtstaubmenge im Teillastbetrieb erhöht ist, die Partikelanzahl im Feinstaubbereich jedoch verringert. Es muss somit ein Anstieg der



Partikelfractionen mit größerem Durchmesser angenommen werden. Dieser Anstieg kann durch den Austrag feinsten Aschepartikel über den Fest-Partikel-Pfad bedingt durch veränderte Strömungsbedingungen im Brennraum aber auch durch unvollständige verbrannte Bestandteile erklärt werden.

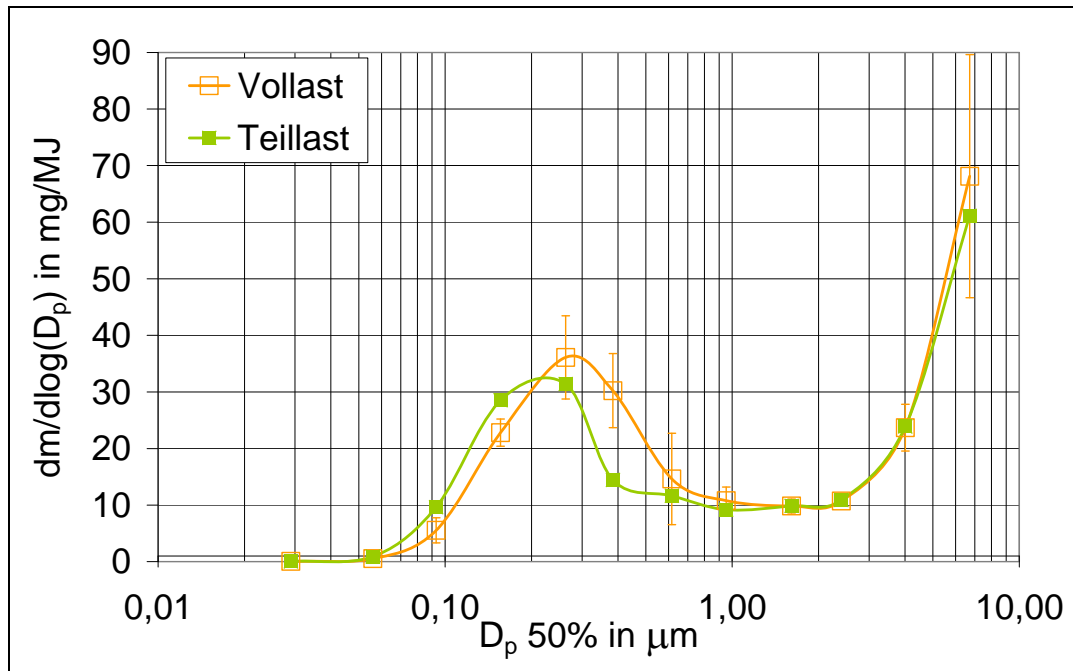


Abbildung 26: Partikelmasseverteilung (berechnet aus der via ELPI ermittelten

Ausgewählte Staubproben wurden auch hinsichtlich ihrer Elementarzusammensetzung untersucht. In Abbildung 27 ist die Elementarzusammensetzung der Staubemissionen aus der Verbrennung von *Stroh mit Additiv C* dargestellt.

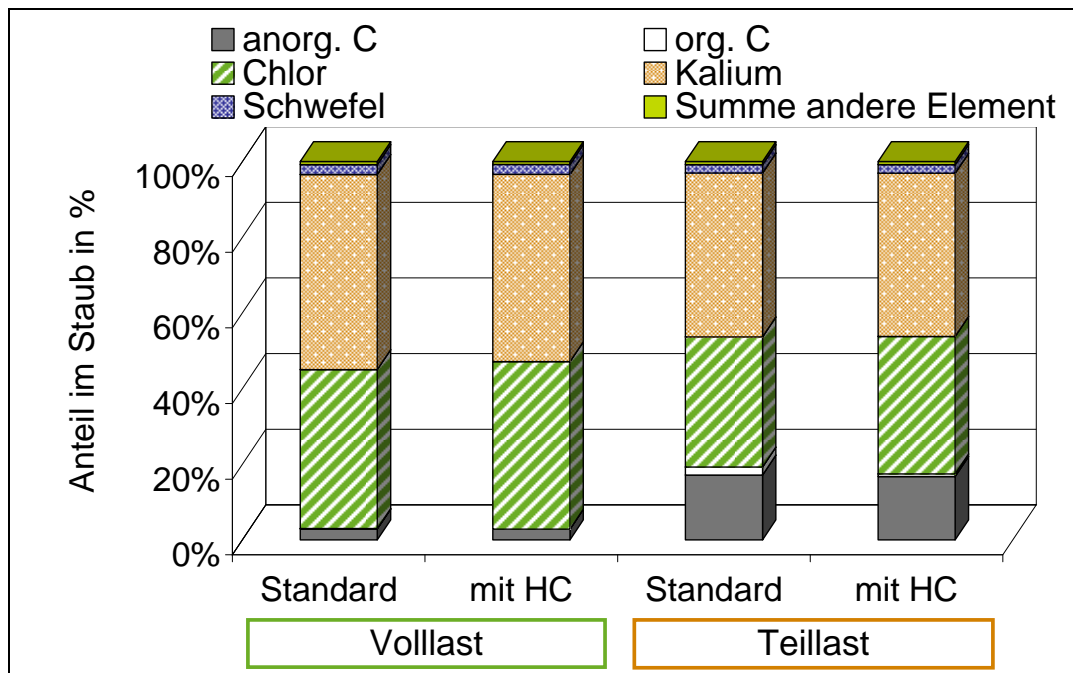


Abbildung 27: Elementarzusammensetzung der Staubemissionen aus der Verbrennung von Stroh mit Additiv C (100% = Summe der Elemente ohne Sauerstoff)

Die Hauptbestandteile der Staubproben sind Kalium und Chlor, welche zusammen 93% (bei Volllast) bzw. etwa 80% (bei Teillast) ausmachen. Der Schwefelanteil ist in allen untersuchten Proben etwa gleich hoch und beträgt 2,2 – 2,6%. Die Proben aus dem Volllastbetrieb enthalten einen deutlich geringeren Anteil an Kohlenstoff: Im Teillastbetrieb ist der Anteil an anorganisch gebundenem Kohlenstoff von 0,02 - 0,12% auf 0,7 - 2,0%, von organisch gebundenem Kohlenstoff von etwa 3% auf 17% erhöht. Die restlichen im Staub enthaltenen Aschebildner wie z.B. Aluminium, Eisen, Kalzium, Silizium oder Magnesium machen einen sehr kleinen Anteil aus, und ergeben in Summe etwa 0,8% der Gesamtstaubmasse.

Durch den Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup> sind nur geringfügige Änderungen in der Staubzusammensetzung zu beobachten: Es konnte eine Reduktion von karbonatisch (anorganisch) gebundenen Kohlenstoffverbindungen sowie von den Aschebildnern Al, Fe, Ca und Mg festgestellt werden. Die Konzentrationen an Kalium, Chlor und Schwefel sowie an organisch gebundenen Kohlenstoffverbindungen zeigten keine signifikanten Änderungen.

### 7.3.2.3 Elementbilanz und Kondensatqualität

Bei Betrieb des *Hydrocube*<sup>®</sup> ist eine deutliche Reduktion von SO<sub>2</sub> und HCl im Abgas zu beobachten. Auch Staubanalysen haben gezeigt, dass einzelne Bestandteile stärker reduziert werden und andere nur in geringem Ausmaß bzw. gar nicht.

Über die Elementanalysen sowie die gemessenen Massen- und Volumenströme können für einzelne Elemente Bilanzen gezogen werden, und so jene Anteile berechnet werden, die aus

dem Brennstoff in die jeweiligen Fraktionen übergehen. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse für die Elemente Kalium, Chlor und Schwefel dargestellt.

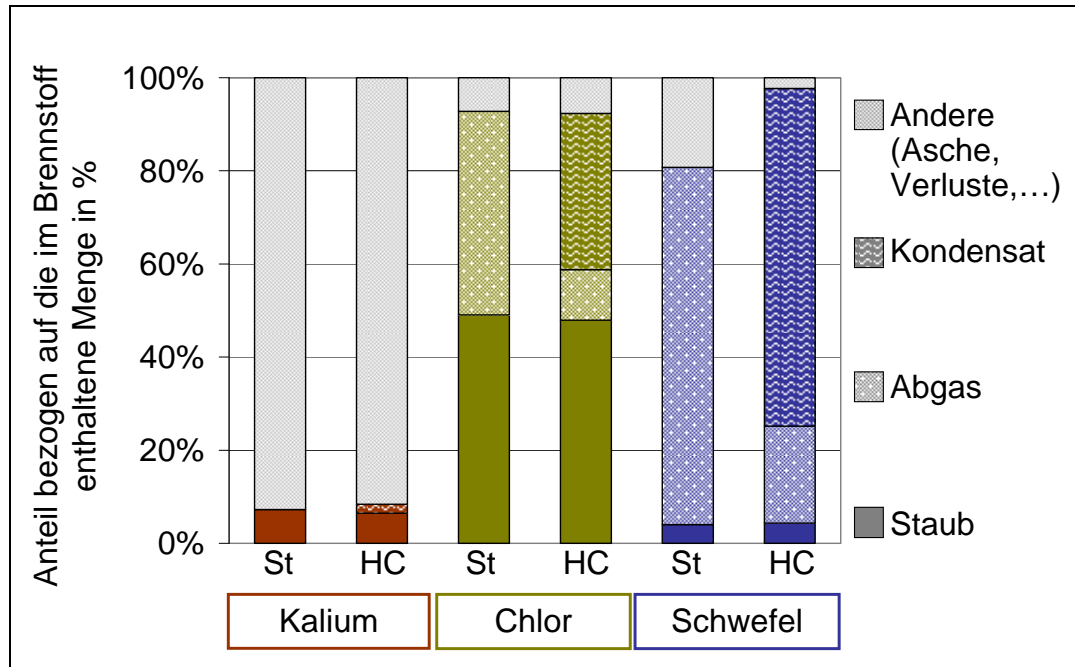


Abbildung 28: Elementbilanz für Kalium, Chlor und Schwefel bei einem Versuch ohne und mit Hydrocube® im Vergleich. Wiederfindung der Elemente in den einzelnen Fraktionen.

In der Graphik sind Elementfrachten dargestellt, die über Staubemissionen, im Kondensat sowie im Abgas freigesetzt werden. Wie bereits in Abbildung 27 dargestellt, wird die Staubzusammensetzung bei Einsatz des Hydrocube® kaum beeinflusst. Es zeigt sich, dass gasförmige Chlor- und Schwefelverbindungen bei Betrieb des Wäschers beträchtlich reduziert werden (vgl. Tabelle 10), und sich in gelöster Form im Kondensat wiederfinden.

Der nicht identifizierte Anteil, welcher unter „Andere“ zusammengefasst ist, beinhaltet vor allem die Anteile, die in Rost- und Wärmetauscherasche gebunden sind. Die ermittelten Werte stimmen gut mit den Ergebnissen vorangegangener Projekte überein, in denen etwa 5% an Chlor, 20% des Schwefels und zwischen 60% und 80% des Kaliums aus dem Brennstoff in der Rostasche wiedergefunden wurden [Wopienka 2006, Wopienka 2007].

Die Qualität des im Kreislauf befindlichen Kondensats wurde regelmäßig überprüft. Der pH-Wert wurde kontinuierlich erfasst und bei einzelnen Proben wurde eine vollständige Elementanalyse durchgeführt. Für viele Elemente wird eine Anreicherung im Kondensat mit zunehmender Betriebsdauer gemessen, bei anderen, wie z.B. Silizium, Kalzium und Magnesium, ist kein Anstieg zu beobachten. Eine Tabelle mit den vollständigen Elementanalysen findet sich in Kapitel 12.4. In Abbildung 29 (a) ist die Veränderung der Konzentration über die Betriebsdauer für die Elemente Schwefel, Chlor, Chrom und Zink dargestellt, Abbildung 29 (b) zeigt den Verlauf des pH-Werts mit zunehmender Zahl an Betriebsstunden.

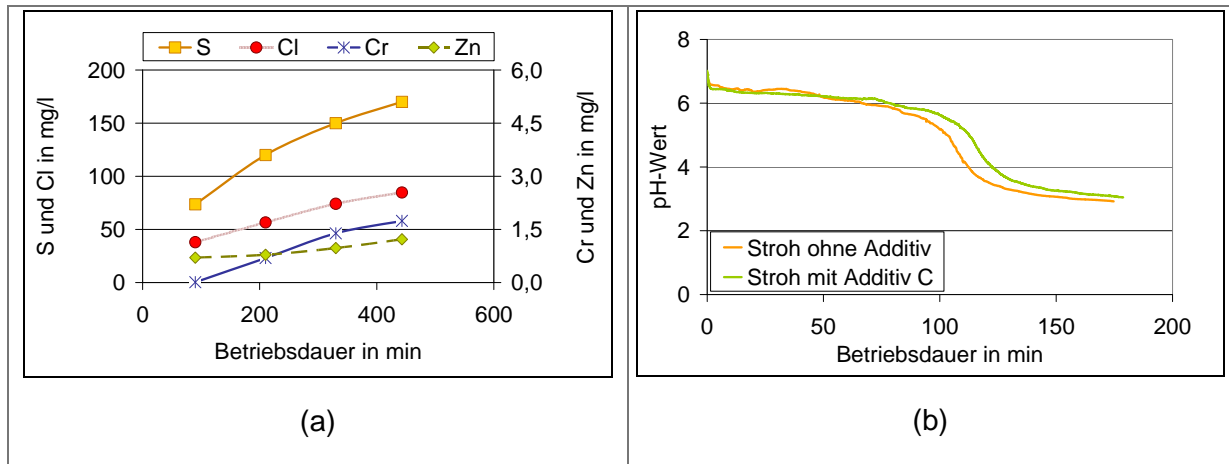


Abbildung 29: Konzentrationen einzelner Elemente im Kondensat (a) und pH-Wert des Kondensats (b) über die Betriebsdauer

Die dargestellten Elementkonzentrationen (S, Cl, Cr und Zn) zeigen einen deutlichen Konzentrationsanstieg mit zunehmender Betriebszeit, wobei bei einigen Kurven abzuflachen scheinen. Diese Abflachung kann auf eine Anreicherung und somit verringerte Aufnahme der einzelnen Komponenten in der Kondensatflüssigkeit zurückgeführt werden. Ein Konzentrationsanstieg mit zunehmender Betriebsdauer ist für die Elemente Schwefel, Chlor, Kalium, Eisen, Phosphor, Nickel, Chrom, Kupfer und Zink zu beobachten. Die Konzentration anderer Elemente wie z.B. Magnesium oder Kalzium ändert sich nicht oder liegt über den gesamten beobachteten Zeitraum hinweg unter der Nachweisgrenze. Gleichzeitig sinkt mit zunehmender Versuchszeit der pH-Wert des Kondensatums (vgl. Abbildung 29 (b)). Der Wäscher wird zu Beginn mit Wasser betrieben, welches sich zunehmend mit dem entstandenen Kondensat vermischt. Vor allem durch die Absorption saurer Gase wie HCl und SO<sub>2</sub> wird der pH-Wert abgesenkt.

Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang sind jene Elemente, für die im Rahmen der Abwassereinleitungsverordnung Grenzwerte festgelegt sind. Die Elementkonzentrationen im Kondensat nach 7 h Betriebsdauer sowie die nach Änderung der AEV Abluftreinigung 2005 festgelegten Grenzwerte sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Vergleich der Elementkonzentrationen nach 7 h Betriebszeit mit dem gesetzlich zulässigen Maximalgrenzwert nach Änderung der AEV Abluftreinigung 2005.

Element	Cadmium Cd	Chrom Cr	Kupfer Cu	Nickel Ni	Blei Pb	Zinn Sn	Zink Zn
Grenzwert	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2
Konzentration nach 7 h	< 0,003	1,7	0,14	4,1	< 0,05	n.n.	1,2
Tendenz mit zunehmender Betriebsdauer	n.n.	steigend	steigend	steigend	n.n.	n.n.	steigend

n.n.....nicht nachweisbar

Für Chrom und Kupfer ist die maximal zulässige Konzentration bereits nach 7 Betriebsstunden überschritten. Des Weiteren zeigen die Werte für Kupfer und Zink eine steigende Tendenz, was mit fortschreitendem Betrieb ebenfalls zu einer Überschreitung des Grenzwertes führt. Die Werte für Cadmium, Blei und Zinn bewegen sich unterhalb der Nachweisgrenze der verwendeten Methode, über ihre Entwicklung mit zunehmender Betriebsdauer können daher keine Abschätzungen getroffen werden.

Ein Vergleich der Konzentrationen im Kondensat mit den im Brennstoff enthaltenen Elementfrachten zeigt, dass neben der Aufnahme von im Brennstoff enthaltenen Bestandteilen auch Eisen, Chrom und Nickel durch Korrosion und Auflösung des Stahls in das Kondensat eingetragen worden sein müssen.

Allgemein ist dazu zu bemerken, dass sich zu Beginn des Betriebs Wasser im Kondensatkreislauf befindet, welches sich zunehmend mit dem entstandenen Kondensat vermischt. Interessant wären daher in weiterer Folge jene Konzentrationswerte, die sich nach längerer Betriebsdauer einstellen, wenn der Verdünnungseffekt durch das anfänglich vorhandene Wasser keinen nennenswerten Einfluss mehr hat.

#### 7.3.2.4 Leistungsbilanz

Durch die Verwendung des *Hydrocube*<sup>®</sup>-Systems wird Wärme aus dem Abgas zurück gewonnen und zur Rücklaufvorwärmung sowie zur Warmwasserbereitstellung verwendet. In Tabelle 14 ist die Erhöhung des Wirkungsgrads als Mittelwerte über alle Versuche für Volllast- sowie für Teillastbetrieb dargestellt. Die Wirkungsgradsteigerung bezieht sich auf eine Brennstoffwärmeleistung von 16 mg/MJ bei einer Rücklauftemperatur von 50°C.

Tabelle 14: Wirkungsgradsteigerung durch Einsatz des Hydrocube®

Energierückgewinnung aus dem Abgas in %	Volllast	Teillast
Wärme zur Warmwasserbereitstellung	6.8	7.7
Wärmerückgewinnung in den Heizkreislauf	3.8	2.5
Gesamtmenge an rückgewonnener Energie	10.6	10.2

Der Wirkungsgrad des Systems kann unter den Versuchseinstellungen sowohl im Volllast- als auch im Teillastbetrieb um ca. 10% erhöht werden. Der größere Teil - etwa 2/3 der Energiemenge – steht dabei zur Heißwasseraufbereitung zur Verfügung.

### 7.3.2.5 Zusammenfassung zu Emissionen aus mit Strohpellets betriebenen Kleinf Feuerungsanlagen

Beide Anlagen zeigen eine hohe Verbrennungsqualität hinsichtlich des Gasphasenausbrands. Die CO-Emissionen liegen bei beiden Feuerungen im Mittel unter 100 mg/MJ. Dies spiegelt sich zum Teil auch bei Betrachtung der Ergebnisse der partikelförmigen Emissionen wider.

Bei der 150 kW Anlage liegen die Gesamtstaubmengen mit 25 – 45 mg/MJ deutlich unter dem Grenzwert von 60 mg/MJ [Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)]. Die Gesamtstaubemissionen bei der 15 kW Anlage bewegen sich im Bereich von 60 – 90 mg/MJ, und sind damit niedrig im Vergleich zu bisherigen Messungen und Ergebnissen aus der Literatur [Wopienka 2006b, Turowski 2008], wobei der Grenzwert jedoch überschritten wird.

Sowohl der Luftüberschuss als auch die rezirkulierte Abgasmenge zeigen einen Einfluss auf die Bildung von Stickoxidemissionen. Dabei nimmt der Stickstofffreisetzungsgrad mit zunehmendem Rauchgasrezirkulationsstrom ab, sodass – ohne weitere Optimierung – eine Reduktion der Emissionen von ca. 15 – 20% erreicht wird.

Die Staubemissionen korrelieren, trotz der geringen Werte, mit dem Gasphasenausbrand, sodass mit zunehmenden CO-Emissionen auch ein Anstieg der Staubmengen festgestellt werden kann. Des Weiteren ist eine Abnahme der Emissionswerte mit zunehmendem Sekundärluftanteil sowie mit abnehmendem Luftüberschuss zu beobachten.

Tests mit dem Hydrocube® ergeben einen Abscheidegrad des Systems von etwa 20%. Durch den zusätzlichen Einbau einer Elektrode wird dieser auf 65% gesteigert. Die Untersuchung der Wirksamkeit der einzelnen Anlagenteile bestätigt, dass die Hauptabtrennung des Feinstaubes im Wärmetauscher des Systems erfolgt, und der Wäscher im Bereich größerer Partikel wirksam ist.

Die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung zeigt einen deutlichen Anstieg der Partikelfraktion mit 30 nm. Eine mögliche Erklärung für diesen Zuwachs der Partikelzahl ist,

dass sich einzelne Komponenten in den durch Kondensation gebildeten Aerosoltröpfchen lösen, woraus dann in weiterer Folge durch Trocknung Partikel entstehen [Schwabl 2008]. Eine Absicherung dieser Hypothese war im Rahmen der Projektarbeit nicht möglich.

Im Hinblick auf gasförmige Emissionen – und dabei vor allem SO<sub>2</sub> und HCl – ist eine Reduktion im Abgas durch Einsatz des *Hydrocube*<sup>®</sup> zu beobachten.

Das Kondensat aus dem Abgas weist teils beträchtliche Konzentrationen einzelner aschebildender Elemente auf, sowie einen Anstieg dieser Konzentrationen mit zunehmender Betriebsdauer. Gleichzeitig sinkt auch der pH-Wert des Kondensats, welcher sich nach einigen Stunden Wäscherbetrieb (etwa 3 h bei Volllastbetrieb der Feuerung) im Bereich von pH = 2 einstellt.

Der Wirkungsgrade wird durch den Einsatz des Systems um etwa 10% erhöht.

## 7.4 Wirtschaftliche Bewertung der Nutzung von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen

### 7.4.1 Grundkalkulation

Folgende Wärmebereitstellungssysteme wurden im Wirtschaftlichkeitsvergleich einbezogen und werden mit folgenden Abkürzungen in diesem Bericht weitergeführt:

Heizsystem	Abkürzung
Strohpellets	SP
Holzpellets	HP
Waldhackgut	WH
Heizöl extra leicht	HEL

*Tabelle 15: betrachtete Wärmebereitstellungssysteme*

Der Vergleich findet innerhalb verschiedener Leistungsbereiche statt. In Tabelle 16 sind die untersuchten Nennleistungsbereiche, der unterstellte Auslastungsgrad sowie der damit abgedeckte Heizwärmebedarf dargestellt.

Nennleistung	Bezugsleistung [kW]	Volllaststunden [h/a]	Heizwärmebedarf [kWh/a]
8 kW	8	1.600	12.800
10-12 kW	10	1.600	16.000
20-25 kW	20	1.600	32.000
40-45 kW	40	1.600	64.000
75-80 kW	75	1.600	120.000

*Tabelle 16: Nennleistung, Volllaststunden und Heizwärmebedarf*

### 7.4.1.1 Kapitalgebundene Kosten

Diese Kostengruppe enthält die Kosten der Anlage, der Brennstoffförderung und etwaiger Ascheaustragung, sowie die Kosten des Brennstofflagers (dimensioniert für die Fassung eines Jahresbedarfs), sämtlichen Zubehörs und der Montage und Inbetriebnahme.

In folgender Tabelle sind die kapitalgebundenen Kosten zusammengefasst.

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Anlagekosten [€]</b>			
8 kW	14.924	10.136		
10-12 kW	14.924	10.136		4.170
20-25 kW	17.353	11.787	17.353	4.849
40-45 kW	17.829	16.496	17.829	5.773
75-80 kW	22.971	22.367	22.971	7.392
<b>Nennleistung</b>	<b>Lagerkosten [€]</b>			
8 kW	3.744	3.507		
10-12 kW	3.961	3.664		4.196
20-25 kW	5.041	4.447	9.709	5.651
40-45 kW	7.202	6.015	16.538	7.887
75-80 kW	10.984	8.758	28.489	12.744
<b>Nennleistung</b>	<b>Montage-, Inbetriebnahme- und Zubehörkosten [€]</b>			
8 kW	4.488	2.953		
10-12 kW	4.488	2.953		1.753
20-25 kW	4.588	3.053	4.588	1.853
40-45 kW	4.869	3.220	4.869	1.861
75-80 kW	4.979	3.298	4.979	1.968
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe [€]</b>			
8 kW	<b>23.156</b>	<b>16.596</b>		
10-12 kW	<b>23.373</b>	<b>16.753</b>		<b>10.119</b>
20-25 kW	<b>26.982</b>	<b>19.287</b>	<b>31.650</b>	<b>12.353</b>
40-45 kW	<b>29.900</b>	<b>25.731</b>	<b>39.236</b>	<b>15.521</b>
75-80 kW	<b>38.934</b>	<b>34.423</b>	<b>56.439</b>	<b>22.104</b>
<b>Nennleistung</b>	<b>Spezifische kapitalgebundene Kosten [€/kW]</b>			
8 kW	2.895	2.074		
10-12 kW	1.948	1.396		843
20-25 kW	1.079	771	1.266	494
40-45 kW	664	572	872	345
75-80 kW	487	430	705	276

Tabelle 17: Zusammenfassung der kapitalgebundenen Kosten

Wie anhand der oberen Tabelle zu entnehmen ist, fallen die höchsten kapitalgebundenen Kosten bei Wärmebereitstellungssystemen mit Waldhackgut an. Dies ist vor allem auf die hohen Lagerungskosten aufgrund der geringen Energiedichte des Brennstoffes und des damit hohen Lagerraumbedarfs zurückzuführen. Systeme mit Strohpellets weisen geringere Investitionskosten als Holzhackgutsysteme auf, liegen aber aufgrund der aufwändigeren



Feuerungstechnologie über den Kosten von Holzpellets. Systeme mit HEL verursachen die mit Abstand geringsten Investitionskosten.

#### 7.4.1.2 Verbrauchsgebundene Kosten

In folgender Tabelle sind die Rahmendaten, welche für die Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten herangezogen werden, zusammengefasst.

Heizsystem	Heizwert Brennstoff [kWh/kg], [kWh/l*]	Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt [%]	Preis [€/kg], [€/kWh]	Abfüllpauschale [€]
SP	4,4	600	8	0,1850	34,68
HP	4,7	650	8	0,1791	34,68
WH	4,3	170	20	0,0590	34,68
HEL	10,0*	835		0,8126	33,75

Tabelle 18: Daten zur Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten

In Tabelle 19 sind die verbrauchsgebundenen Kosten dargestellt. Diese beinhalten neben den Brennstoffkosten auch Kosten, die für Hilfsenergie, Hilfsmittel (z.B. Schmiermittel) und Abfüllpauschalen.

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Brennstoffkosten [€/a]</b>			
8 kW	769	585		
10-12 kW	961	731		1.625
20-25 kW	1.922	1.462	549	3.250
40-45 kW	3.844	2.924	1.098	6.501
75-80 kW	7.208	5.483	2.058	12.189
<b>Nennleistung</b>	<b>Hilfsenergie-, Hilfsmittelkosten, Abfüllpauschalen [€/a]</b>			
8 kW	56	56		
10-12 kW	57	57		54
20-25 kW	56	56	56	62
40-45 kW	118	118	118	109
75-80 kW	200	165	165	173
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe [€/a]</b>			
8 kW	<b>825</b>	<b>641</b>		
10-12 kW	<b>1.018</b>	<b>788</b>		<b>1.679</b>
20-25 kW	<b>1.978</b>	<b>1.518</b>	<b>605</b>	<b>3.312</b>
40-45 kW	<b>3.962</b>	<b>3.042</b>	<b>1.216</b>	<b>6.610</b>
75-80 kW	<b>7.408</b>	<b>5.648</b>	<b>2.223</b>	<b>12.362</b>

Tabelle 19: Zusammenfassung der verbrauchsgebundenen Kosten

Ersichtlich ist, dass das System mit HEL die höchsten verbrauchsgebundenen Kosten verursacht aufgrund des hohen Brennstoffpreises. Strohpellets sind günstiger als HEL, jedoch teurer als Waldhackgut und Holzpellets.

### 7.4.1.3 Betriebsgebundene Kosten

Bei den betriebsgebundenen Kosten handelt es sich um Kosten der Wartung der gesamten Anlage und um Kosten für den Rauchfangkehrer. Bei den Kosten für die Wartung wurde ein üblicher Stundensatz für landwirtschaftliche Betriebshelfer von 9 €/h angenommen. Der Zeitaufwand pro Jahr basiert auf Aufzeichnungen von Betreibern, welche in Projekten der Austrian Bioenergy Centre GmbH involviert waren. Die Preise für die Rauchfangkehrungen und deren Häufigkeit wurden aus der aktuellen Rauchfangkehrerfibelf<sup>5</sup> entnommen.

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Rauchfangkehrerkosten [€/a]</b>			
8 kW	37	37		
10-12 kW	37	37		31
20-25 kW	37	37	37	31
40-45 kW	37	37	37	31
75-80 kW	42	42	42	33
<b>Nennleistung</b>	<b>Entsorgungs-, Reinigungs- und Wartungskosten [€/a]</b>			
8 kW	45	18		
10-12 kW	45	18		9
20-25 kW	54	27	36	9
40-45 kW	63	36	45	18
75-80 kW	99	54	72	27
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe [€]</b>			
8 kW	<b>82</b>	<b>55</b>		
10-12 kW	<b>82</b>	<b>55</b>		<b>40</b>
20-25 kW	<b>91</b>	<b>64</b>	<b>73</b>	<b>40</b>
40-45 kW	<b>100</b>	<b>73</b>	<b>82</b>	<b>49</b>
75-80 kW	<b>141</b>	<b>96</b>	<b>114</b>	<b>60</b>

Tabelle 20: Zusammenfassung der betriebsgebundenen Kosten

Wie in Tabelle 20 zu sehen ist, sind die betriebsgebundenen Kosten bei jenen Heizsystemen welche mit Strohpellets betrieben werden, die höchsten. Dies ist vor allem durch den erhöhten Zeitaufwand für Kesselreinigung und Ascheentnahmen aufgrund des höheren Aschegehaltes von Strohpellets begründet.

### 7.4.1.4 Zusammenfassung aller Kostenarten

In folgender Aufstellung werden alle kapitalgebundenen, verbrauchsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten zusammenfassend dargestellt.

<sup>5</sup> Vgl.: Kammer für Arbeiter und Angestellte für Niederösterreich: Rauchfangkehrerfibelf. Wien 2007. S.: 12ff.

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe der kapitalgebundenen Kosten [€]</b>			
8 kW	23.156	16.596		
10-12 kW	23.373	16.753		10.119
20-25 kW	26.982	19.287	31.650	12.353
40-45 kW	29.900	25.731	39.236	15.521
75-80 kW	38.934	34.423	56.439	22.104
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe der verbrauchsgebundenen Kosten [€/a]</b>			
8 kW	825	641		
10-12 kW	1.018	788		1.679
20-25 kW	1.978	1.518	605	3.312
40-45 kW	3.962	3.042	1.216	6.610
75-80 kW	7.408	5.648	2.223	12.362
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe der betriebsgebundenen Kosten [€/a]</b>			
8 kW	82	55		
10-12 kW	82	55		40
20-25 kW	91	64	73	40
40-45 kW	100	73	82	49
75-80 kW	141	96	114	60

Tabelle 21: Zusammenfassung aller Kostenarten

#### 7.4.1.5 Mittlere jährliche gebundene Kosten

Nachfolgend werden die erhobenen kapital-, verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten auf mittlere jährliche Kosten umgerechnet und die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt.

##### 7.4.1.5.1 Leistungsbereich 8 kW

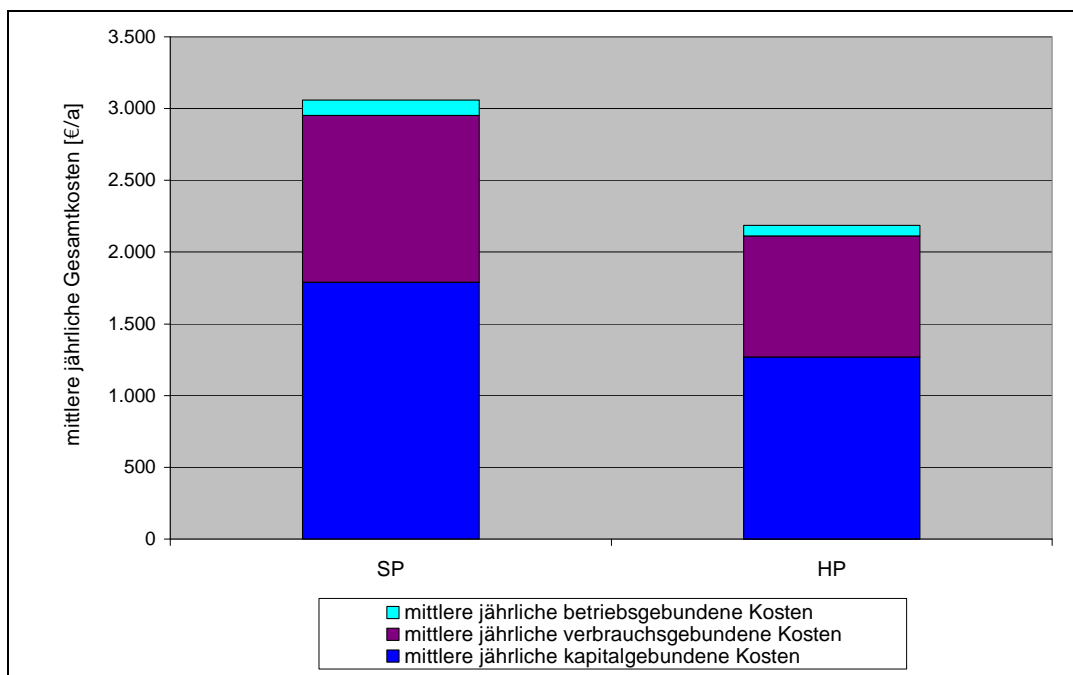


Abbildung 30: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 8 kW

Wie in der Abbildung ersichtlich, sind die mittleren jährlichen Gesamtkosten bei Holzpelletsheizungen im Leistungsbereich von 8 kW niedriger als jene bei Heizungen welche mit Strohpellets betrieben werden. Verursacht werden diese sowohl durch höhere mittlere jährliche kapital- als auch verbrauchsgebundene Kosten.

#### 7.4.1.5.2 Leistungsbereich 10-12 kW

Im Leistungsbereich von 10-12 kW sind ebenfalls Heizungen welche mit Strohpellets betrieben werden am teuersten, wobei die in diesem Leistungsbereich einbezogenen HEL-Systeme nur mehr geringfügig günstiger sind. Holzpelletsheizungen verursachen auch in diesem Leistungsbereich die geringsten Kosten.

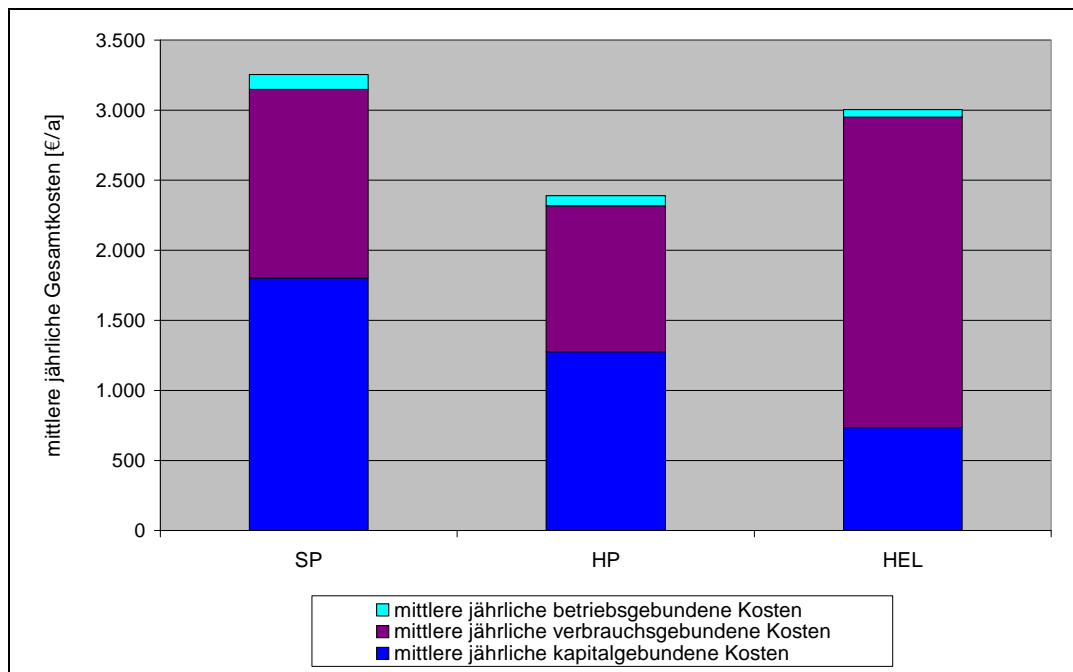


Abbildung 31: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 10-12 kW

#### 7.4.1.5.3 Leistungsbereich 20-25 kW

Zwischen 20 und 25 kW Kesselleistung, sind Heizsysteme welche mit HEL beheizt werden am kostenintensivsten. Am günstigsten sind Waldhackgutheizungen, die ab diesem Leistungsbereich bereits häufig zum Einsatz kommen. Strohpellets sind auch hier gegenüber Holzbrennstoffen nicht konkurrenzfähig.

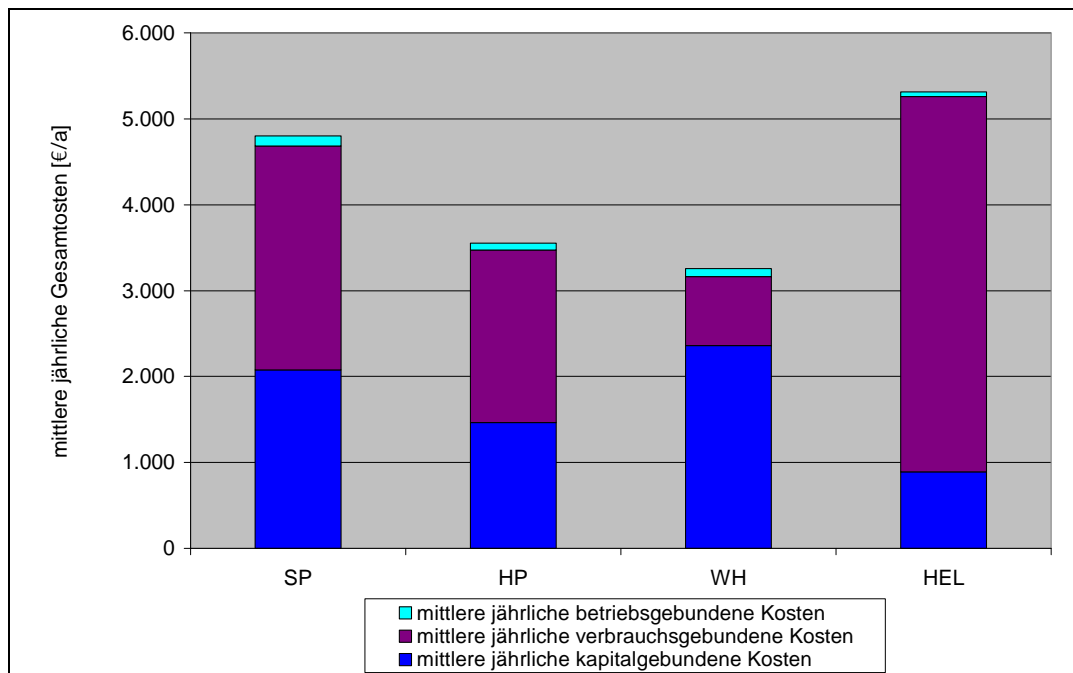


Abbildung 32: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW

#### 7.4.1.5.4 Leistungsbereich 40-45 kW

Ein ähnliches Bild ergibt die Betrachtung der mittleren jährlichen Kosten im Leistungsbereich 40-45 kW. Durch die hohen Kosten für HEL wird dieses System aufgrund der steigenden Bedeutung der verbrauchsgebundenen Kosten sehr teuer im Vergleich zu allen Biomassensystemen.

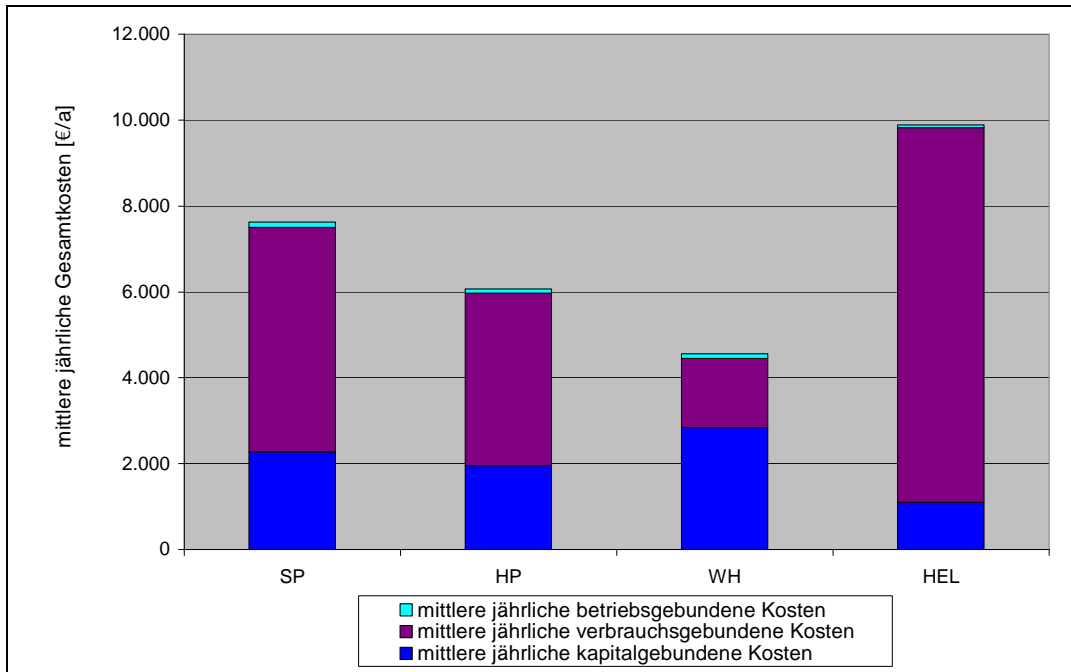


Abbildung 33: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 40-45 kW

#### 7.4.1.5.5 Leistungsbereich 75-80 kW

Im Leistungsbereich 75-80 kW verstärkt sich der Trend, der in den kleineren Leistungsbereichen erkennbar war. Mit Steigerung der Nennleistung, steigt auch der relative Anteil der mittleren jährlichen verbrauchsgebundenen Kosten an den mittleren jährlichen Gesamtkosten. Folglich werden bei den gegenwärtigen Rahmenbedingungen Systeme mit Strohpellets bei größeren Leistungsbereichen wirtschaftlich immer weniger interessant gegenüber Systemen mit Holzbrennstoffen, im Vergleich zu Systemen mit HEL jedoch vorteilhafter.

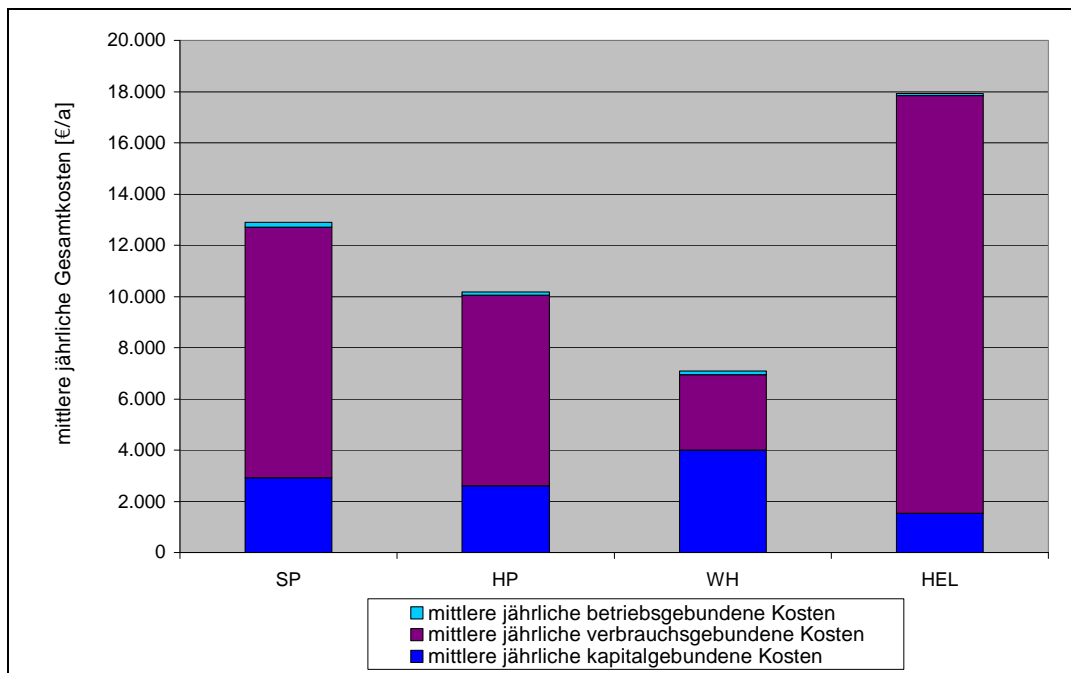


Abbildung 34: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW

## 7.4.2 Sensitivitätsanalysen

### 7.4.2.1 Sensibilität der Wirtschaftlichkeit der Heizsysteme durch Variation der Reparaturkosten

In folgendem Abschnitt wird die Sensibilität der Wärmebereitstellungssysteme durch Variation der Reparaturkosten betrachtet. Es ist zu beachten, dass Reparaturen im Ausmaß von 6 %/a der Investitionskosten nur bei Systemen mit Strohpellets berücksichtigt werden. Dies entspricht den Kosten, die anfallen, wenn der Kessel nach 10 Jahren Laufzeit aufgrund erhöhter Korrosion bei diesem Brennstoff getauscht werden muss.

#### 7.4.2.1.1 Leistungsbereich 8 kW

Aus folgender Abbildung ist ersichtlich, dass sich die Wärmegestehungskosten durch Variation der Reparaturkosten bei allen Systemen ähnlich entwickeln und einen relativ großen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten haben. So steigen diese bei dem System mit SP von gut 0,30 €/kWh auf deutlich über 0,35 €/kWh bei einem vorzeitigen Kesseltausch nach 10 Jahren Laufzeit.

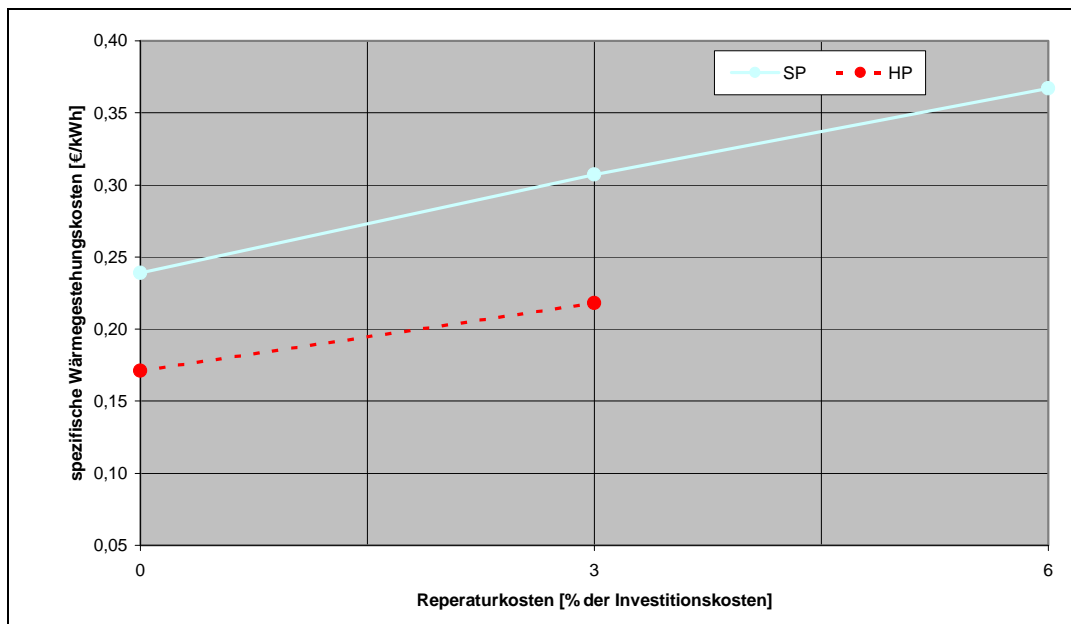


Abbildung 35: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 8 kW

#### 7.4.2.1.2 Leistungsbereich 20-25 kW

Ersichtlich ist, dass vor allem beim System mit Waldhackgut, ein rascher Anstieg der Kosten bei notwendigen Reparaturen erfolgt. Bei Reparaturen, welche 3 % der Investitionskosten ausmachen, ist das System bereits teurer als Holzpellets. Für den Fall, dass beim System mit Strohpellets ein Kesseltausch bereits nach 10 Jahren notwendig wird, würde dieses System im Vergleich zu HEL höhere Kosten verursachen und somit wirtschaftlich nicht mehr konkurrenzfähig sein.



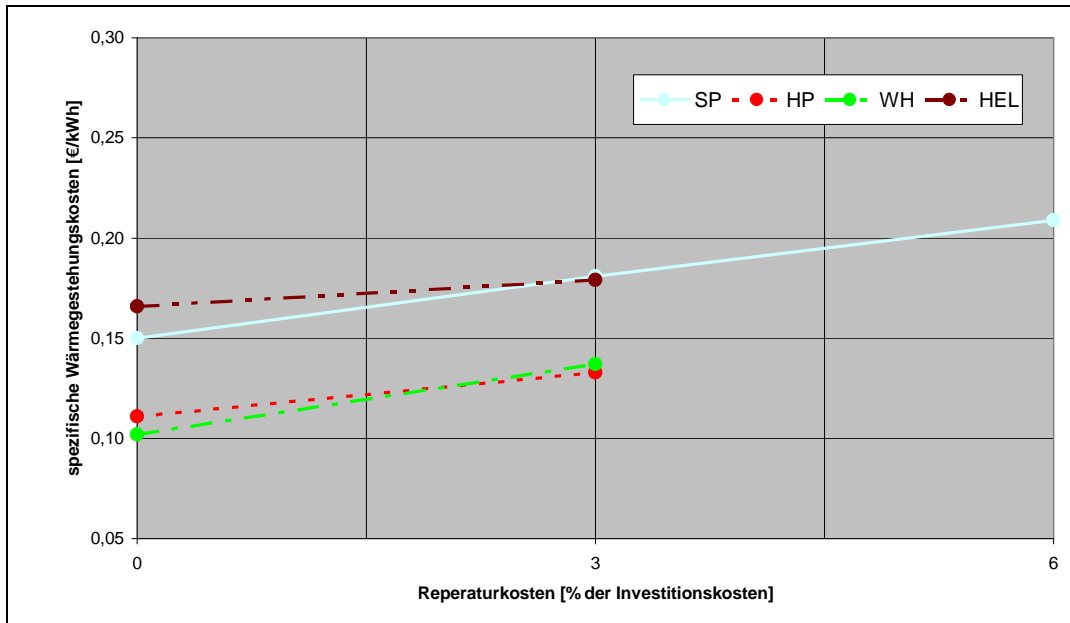


Abbildung 36: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW

#### 7.4.2.1.3 Leistungsbereich 75-80 kW

Aufgrund der geringeren Bedeutung der kapitalgebundenen Kosten gibt es in diesem Leistungsbereich keine Verschiebung innerhalb der Rangfolge hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, wenngleich bei einem vorzeitigen Kesseltausch die Wärmegestehungskosten bei Strohpellets doch merklich steigen.

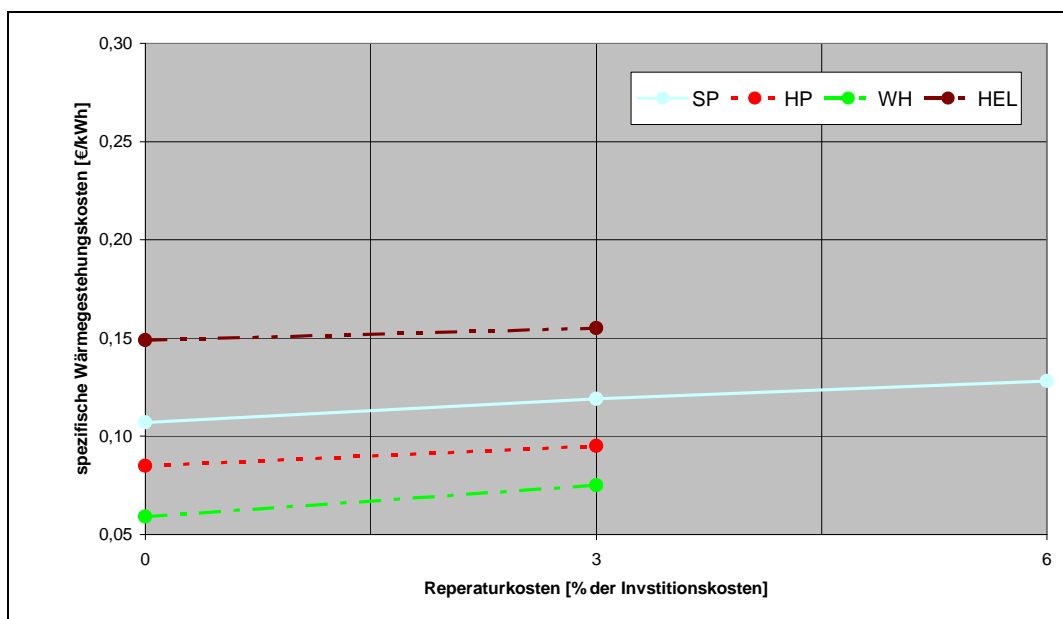


Abbildung 37: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW

### 7.4.2.2 Sensibilität der Wirtschaftlichkeit der Heizsysteme durch Variation der Investitionskosten in Bezug auf sekundäre Abreinigungssysteme

Bei dieser Sensitivitätsanalyse ist zu beachten, dass die beiden Abreinigungssysteme (Abgaswärmetauscher (AW) und Elektrofilter (EF) immer nur bei den Kosten der Systeme mit Strohpellets als optionale Ausrüstung kalkuliert werden. Beim System mit dem Abgaswärmetauscher wird ein Anstieg des Wirkungsgrades von 10 % berücksichtigt. Eine Beurteilung, ob eines der beiden Systeme technisch für den Einsatz bei diesen Systemen geeignet ist, bzw. ob ein für die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten notwendiger Abscheidegrad erreicht wird, erfolgt an dieser Stelle nicht.

#### 7.4.2.2.1 Leistungsbereich 8 kW

In folgender Abbildung ist die Zusammensetzung der mittleren jährlichen Gesamtkosten zu sehen, wenn bei Systemen, welche mit Strohpellets betrieben werden, ein Abgaswärmetauschers (AW) zur Abgasreinigung angeschlossen wird. Ersichtlich ist, dass vor allem die kapitalgebundenen und die betriebsgebundenen Kosten höher sind, als beim Wärmebereitstellungssystem mit Holzpellets. Gegenüber der Grundkalkulation steigen die mittleren jährlichen Gesamtkosten beim Einsatz von Strohpellets um etwa 300 € (siehe auch Abbildung 30).

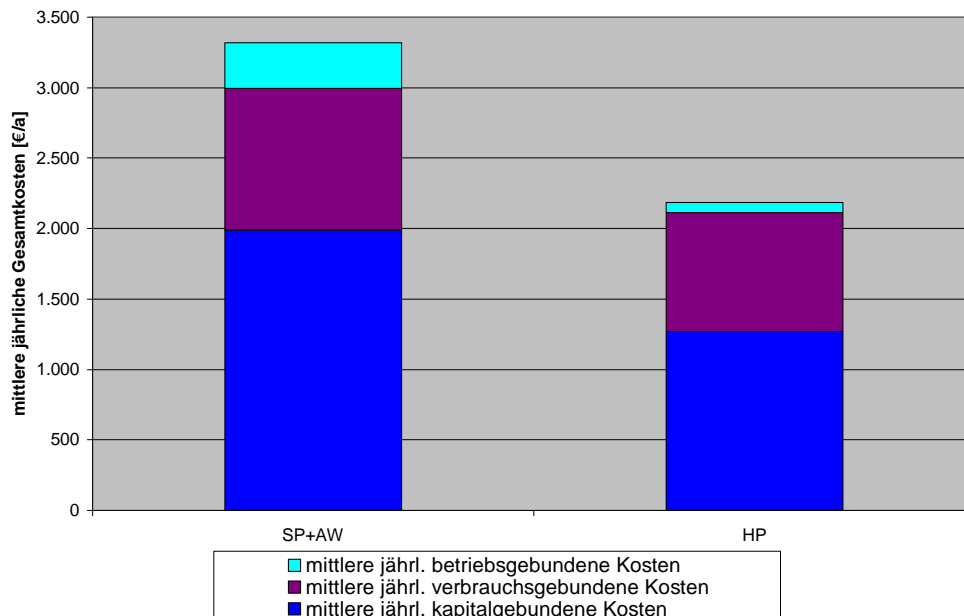


Abbildung 38: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 8 kW

#### 7.4.2.2 Leistungsbereich 20-25 kW

In folgender Grafik ist zu erkennen, dass die mittleren jährlichen Gesamtkosten bei Ausrüstung der Feuerungsanlage für Strohpellets mit einem Elektrofilter (EF) höher sind, als durch Anschluss des Abgaswärmetauschers (AW), weil dadurch lediglich Kosten verursacht werden und keine Erhöhung des Wirkungsgrades eintritt. Dadurch verstärkt sich der Kostennachteil der Systeme mit Strohpellets gegenüber den Systemen, die mit Holzpellets oder Waldhackgut betrieben werden zusätzlich. Gegenüber dem System mit HEL bleiben Strohpelletsfeuerungen jedoch selbst bei einem notwendigen Einbau von sekundären Rauchgasreinigungssystemen zumindest gleich teuer oder sogar günstiger.

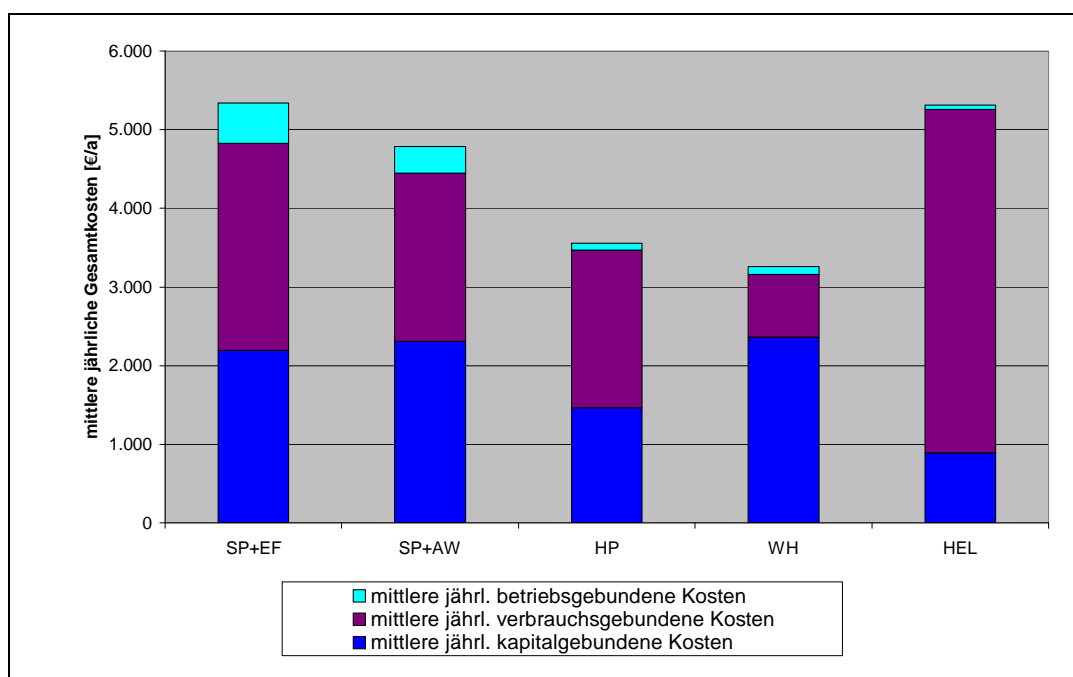


Abbildung 39: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW

#### 7.4.2.3 Leistungsbereich 75-80 kW

Auch im Nennleistungsbereich 75-80 kW sind bei Installation eines Abgaswärmetauschers (AW) die mittleren jährlichen Gesamtkosten geringer, als beim Einbau eines Elektrofilters (EF). Insgesamt fallen die Kosten für den Einbau von sekundären Rauchgasreinigungssystemen bei größeren Anlagen weniger ins Gewicht, weil die Bedeutung der kapitalgebundenen Kosten abnimmt. Dagegen kann die Einsparung von Brennstoff, wie etwa durch die Steigerung des Wirkungsgrades beim Einbau eines Abgaswärmetauschers zur Rauchgasreinigung bei Systemen, die größere Brennstoffmengen benötigen auch entsprechende Einsparungen bringen.

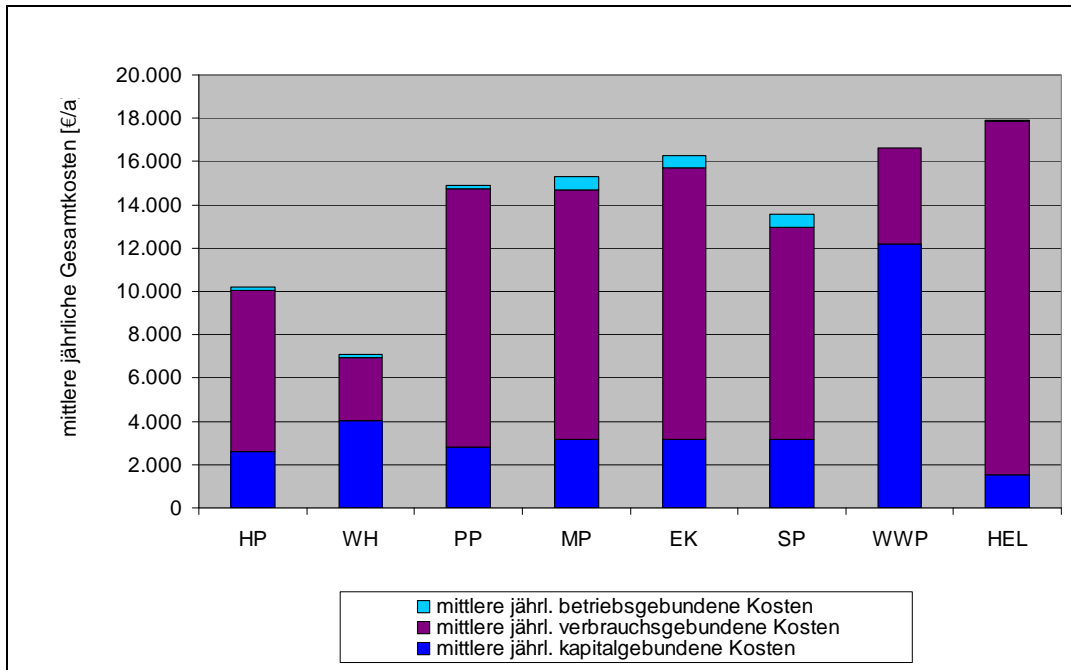


Abbildung 40: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW

### 7.4.3 Zusammenfassung Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Die Installation und der Betrieb von Feuerungen mit Strohpellets sind gekennzeichnet sowohl von hohen kapitalgebundenen Kosten, und - bei den gegenwärtigen Preisen für Strohpellets - von hohen verbrauchsgebundenen Kosten. Aufgrund des hohen Zeitaufwandes für die Wartung der Anlagen sind auch die betriebsgebundenen Kosten verhältnismäßig hoch.
- In der Grundkalkulation bei Unterstellung gleich langer Lebensdauern aller betrachteten Systeme und ohne Installation von Rauchgasreinigungssystemen sind Strohpelletsfeuerungen gegenüber Systemen mit Holzbrennstoffen in keinem Leistungsbereich konkurrenzfähig. Gegenüber HEL werden Strohpellets ab einem Leistungsbereich von 20-25 kW wirtschaftlich.
- Bei einem notwendigen Wechsel des Wärmetauschers nach halber Nutzungsdauer bei Strohpelletsfeuerungen erhöhen sich die Wärmegestehungskosten beträchtlich. In diesem Fall wäre der Einsatz von Strohpellets gegenüber HEL auch im Leistungsbereich 20-25 kW unwirtschaftlich. Anders im Leistungsbereich 75-80 kW, wo die kapitalgebundenen Kosten geringere Bedeutung haben.
- Bei einem notwendigen Einbau von sekundären Rauchgasreinigungssystemen verändert sich wenig in der Rangfolge innerhalb der Wärmebereitstellungssysteme.

Am günstigsten bleiben Systeme mit Holzbrennstoffen, gefolgt von Strohpellets, die im Leistungsbereich 20-25 kW ähnliche Kosten verursachen wie Ölfeuerungen. Bei höheren Nennleistungen sind Strohpelletsfeuerungen selbst beim Einbau einer Rauchgasreinigung günstiger als Ölfeuerungen. Nichtsdestotrotz können bei einem Einbau von Wärmetauschern zur Abgasreinigung beträchtliche Mengen an Brennstoff eingespart werden und somit die Kosten gegenüber der Anlage ohne Abgasreinigung sogar gesenkt werden.

## 8 Detailangaben in Bezug auf die Ziele der Programmlinie

### 8.1 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie

- Stroh ist ein erneuerbarer Energieträger, der überdies als Reststoff der landwirtschaftlichen Produktion verfügbar ist. Durch die Verarbeitung zu Pellets wird die Bereitstellung von Stroh optimiert und seine Nutzung wesentlich vereinfacht. Die energetische Nutzung von Stroh in Form von Pellets zielt – in Anlehnung an die Nutzung von Holzpellets – auch darauf ab, die **Dienstleistung Raumwärme in möglichst effizienter Form und für den Konsumenten** mit einem Minimum an Aufwand zur Verfügung zu stellen.
- Der **Reststoff Stroh** ist gerade in den waldarmen Regionen Österreichs in ausreichender Menge vorhanden und damit eine regional verfügbare Alternative, die sinnvoller Weise auch **regional verarbeitet und energetisch genutzt** wird. Durch die energetische Nutzung von Strohpellets werden Arbeitsplätze geschaffen und ein **hoher Anteil an Wertschöpfung bleibt in der Region**, da die Verarbeitung schon allein aus betriebswirtschaftlichen Gründen regional erfolgt: Lange Transportwege für die Anlieferung der Strohballen verursachen zu hohe Kosten.
- Die energetische Nutzung des Reststoffes Stroh trägt zur Reduktion von THG-Emissionen bei. Durch die Regionalität von Anfall, Verarbeitung und Nutzung sind die erforderlichen Transportwege kurz, und die Verarbeitung des Strohs zu Pellets reduziert die erforderlichen Transportvolumina – auch dadurch werden die Emissionen an THG, Stickoxiden und Staub durch den Verkehr reduziert.

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche zeigen, dass bei der Verbrennung von Strohpellets die derzeit gültigen Emissionsgrenzwerte für Kleinf Feuerungsanlagen eingehalten werden können. Darüber hinaus ist eine weitere Reduktion durch Optimierung der Feuerungstechnologie und der Anlageneinstellungen möglich. Auch eine Anwendung einfacher Sekundärmaßnahmen ist denkbar, und in größeren Leistungsbereichen auch wirtschaftlich. Somit können **schädliche Emissionen aus der Verbrennung selbst auf ein Mindestmaß reduziert** werden.

- Ständige Weiterentwicklung bestärkt die **Technologieführerschaft österreichischer Hersteller im Bereich der Feuerungstechnologie**. Stroh stellt aufgrund seiner Brennstoffeigenschaften in vieler Hinsicht eine Herausforderung dar, und dient damit als benchmark für verschiedenste Entwicklungsfelder im Zusammenhang mit der Verwendung einer breiteren Rohstoffbasis. Vor allem im Bereich der

Materialentwicklung aber auch -prüfung, sowie der Sekundärmaßnahmen im kleinen Leistungsbereich werden im Rahmen des Projekts neue Impulse gesetzt.

## **8.2 Beitrag zu den 7 Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung**

### **1. Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzenorientierung**

Pelletiersversuche und Analysen zeigen, dass Strohpellets auch in großen Anlagen in einer hohen mechanischen Qualität produziert werden können. In dieser Form ist eine effizienter Transport vom Versorger zum Konsumenten möglich, aber auch eine regelmäßige Beförderung und Zufuhr in die Verbrennungsanlagen, um zuverlässig Raumwärme und Warmwasser bereitstellen zu können.

### **2. Prinzip der Nutzung erneuerbarer Ressourcen**

Stroh ist ein nachwachsender Rohstoff. Große Mengen an Getreidestroh stehen als ungenutzter Reststoff der Landwirtschaft zur Verfügung. Vor allem in den Trockengebieten Ostösterreichs muss Stroh vom Feld oft abtransportiert werden, da es aufgrund fehlender Niederschläge nicht zur Verrottung in den Boden eingearbeitet werden kann. Durch die Nutzbarmachung von Stroh als erneuerbarer Energieträger kann zusätzlich auch die Frage der Entsorgung gelöst werden.

### **3. Effizienzprinzip**

Durch die energetische Nutzung des Reststoffes Stroh wird der Grad der Ausnutzung der Getreidepflanzen erhöht – die Verwendung dieses landwirtschaftlichen Produkts wird damit effizienter.

Durch die Verwertung eines regional anfallenden Rohstoffs werden die Wege des Rohstofftransports verkürzt. Zudem ist durch die Pelletierung der Aufwand für Transport- und Lagerung des fertigen Brennstoffes reduziert, wodurch Kosten wie auch benötigte Energiemengen verringert werden.

Der Betrieb von Biomassefeuerungen ist effizienter bei einer stabilen und gleichmäßigen Verbrennung, welche durch die gleichmäßige Zufuhr des pelletierten Brennstoffs begünstigt wird. Eine Optimierung des Gasphasenausbrands führt nicht nur zu einer Minimierung der unverbrannten Bestandteile im Abgas, sondern erhöht gleichzeitig die Ausnutzung der im Brennstoff gebundenen Energie, und damit des Wirkungsgrades. Die untersuchte Anlage zur Abgasnachbehandlung – der *Schröder Hydrocube*<sup>®</sup> – trägt neben dem Effekt der Emissionsminderung auch zur Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems bei, indem durch Brennwerttechnologie zusätzliche Wärmemengen nutzbar gemacht werden, wodurch sich die Effizienz des Systems um etwa 10% erhöht.

Eine geeignete Materialauswahl erhöht die Standzeit der Anlagen und verringert den Aufwand für Servicearbeiten und Reparaturen. Die durch die Korrosionsuntersuchungen am Feuerfestmaterial gewonnenen Daten stellen grundlegendes Wissen um die Einflusswirkung verschiedener Verbrennungsparameter (Gasatmosphäre, Temperatur) auf die Lebensdauer des Materials dar. Diese Informationen helfen durch die Auswahl geeigneter Materialien und Konzeption von Feuerungen die Lebensdauer der Feuerung insgesamt zu erhöhen, und gleichzeitig die Service- und die Ersatzteilkosten während des Betriebes zu erniedrigen.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden verschiedenste Aspekte der Nutzung von Stroh als Brennstoff zusammengefasst. Aus diesen Ergebnissen sowie der darauf aufgesetzten Sensitivitätsanalyse wird deutlich, in welchen Leistungsbereichen der Brennstoff Stroh sinnvoll und effizient eingesetzt werden kann.

#### **4. Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit**

Die bei der thermischen Nutzung von Stroh anfallende Asche kann grundsätzlich – wenn die Schadstoffgehalte nicht zu hoch sind – als Mineralstofflieferant wieder in den landwirtschaftlichen Produktionskreislauf rückgeführt werden. Dies ist vor allem angesichts der derzeit steigenden Düngemittelpreise von Interesse. War dies auch nicht Hauptthema der Untersuchungen, so wurde bei der Brennstoffproduktion darauf geachtet, die natürlichen Eigenschaften des Brennstoffes nicht nachteilig zu beeinflussen.

#### **5. Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionfähigkeit und Lernfähigkeit**

Die Vermarktung von Stroh ist für die Landwirtschaft eine attraktive Einkommensalternative und wird heute bereits von vielen Landwirten als Chance gesehen. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Produktion von Pflanzen für die energetische Nutzung, wie z.B. Miscanthus aber auch „Energiekorn“, auf großes Interesse stößt und sich breiter Akzeptanz erfreut. Die Etablierung von Strohpellets eröffnet hier weitere Möglichkeiten in Richtung Erzeugung von landwirtschaftlichen Brennstoffen.

Korrosionstests ermöglichen es, geeignete Feuerfestwerkstoffe für Brennräume in Strohfeuerungen auszuwählen. Ein grundlegendes Verständnis des Einflusses von Brennstoffeigenschaften und Umgebungsbedingungen auf die Korrosion von Feuerfestmaterialien im Brennraum ermöglicht darüber hinaus auch für andere Anforderungen (z.B. andere Brennstoffqualität), ohne langwierige Vorversuche, passende Materialien für den jeweiligen Einsatzzweck zu wählen.

#### **6. Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge**

Die Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen zeigen, dass beim Rohstoff Stroh auch bei sorgfältiger Ernte und einheitlicher Rohstoffquelle (Region, Strohsorte,...) mit starken Qualitätsschwankungen gerechnet werden muss. Diese Unterschiede können das Verbrennungsverhalten und damit die Zuverlässigkeit der mit diesem Brennstoff betriebenen Anlagen beträchtlich beeinflussen. Die zu erwartenden Schwankungen müssen bei der



Auslegung und Konzeption miteinbezogen werden, um Feuerungstechnologien entwickeln zu können, die hinsichtlich der Brennstoffqualität toleranter sind, um so Störfälle zu verringern.

Durch ein verbessertes Verständnis der Mechanismen, welche hinter der Schädigung von keramischen Brennkammermaterialien stehen, kann die Materialauswahl gezielter auf die Anforderungen in der Feuerung abgestimmt werden. Dies verlängert die Lebensdauer der Feuerungsanlage, und spart Kosten bei Service und Wartung, da Störfälle verhindert werden können.

In Kenntnis der zu erwartenden Kondensatqualitäten können bestehende Methoden zur Prüfung von Abgassystemen weiterentwickelt, und so Störfälle durch den Einsatz ungeeigneter Materialien vermieden werden.

#### **7.Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität**

Die Nutzung des Reststoffes Getreidestroh schafft Arbeit und stärkt so die regionale Wirtschaft. Darüber hinaus stellt sie eine neue Einkommensquelle in der Landwirtschaft dar.

Im Vergleich zur Nutzung von Strohballen erhöht die Verarbeitung zu Pellets nicht nur Komfort und Zuverlässigkeit bei der Bereitstellung dieses Energieträgers, die vergleichsweise deutlich niedrigeren Schadstoffemissionen und der geringere Betreuungsaufwand der Feuerungsanlage bringen ebenfalls verbesserte Lebensqualität.

### **8.3 Einbeziehung der Zielgruppen und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt**

#### **Pelletsproduzent**

Die Anlageneinstellungen bei Produktion der Strohpellets sowie die Beimengung von Additiven und damit verbundene Besonderheiten im Pelletierprozess wurden mit dem Anlagenbetreiber abgestimmt.

#### **Hersteller von Feuerfestmaterialien**

Untersuchungen über den Einfluss verschiedener Parameter auf die Langzeitbeständigkeit des keramischen Brennkammermaterials sind von entscheidender Bedeutung, wenn es um die Investitions- und Servicekosten der gesamten Feuerungsanlage im Betrieb mit „problematischen“ Brennstoffen geht. Auf Wunsch der Firma Intocast (Hersteller von Feuerfestmaterial) und der Firma KWB (Hersteller von Feuerungsanlagen) wurden daher verschiedene Parameter (Brennstoffqualität, Zusammensetzung des Feuerfestmaterials und Parameter im Verbrennungsraum) auf ihre Bedeutung bei Korrosionsvorgängen untersucht. Die Erstellung von Eindringtiefenprofilen der Elemente Kalium und Chlor in die Oberfläche des keramischen Materials ist für die Firma Intocast von besonderem Interesse.

### **Feuerungshersteller**

Die Adaptierung der Feuerungsanlagen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Firma KWB. Dabei konnten vor allem aus umfangreichen Verbrennungsversuchen in der 15 kW Prototyp Feuerung für den Hersteller zusätzliche Erkenntnisse gezogen werden. Auch die Untersuchung und Bewertung eines Abscheidesystems, welches gegebenenfalls in Feuerungsanlagen implementiert werden könnte, war für die Firma KWB von Interesse.

### **Komponentenlieferant der Sekundärmaßnahme**

Im Rahmen der Tests mit dem Hydrocube® wurden mögliche Fragestellungen und Versuchseinstellungen in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Firma Schröder diskutiert und entwickelt. Es konnten so Ergebnisse bisheriger Untersuchungen am Wäschersystem miteinbezogen und Adaptierungen an der Anlage schneller bewältigt werden.

### **Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen**

Die Austrian Bioenergy Centre GmbH ist aufgrund ihrer Position als *Kplus*-Zentrum und ihrer breiten Kooperation mit Firmen und Forschungseinrichtungen im einschlägigen Bereich ein entscheidender Multiplikator und technologischer know-how Träger, und somit geeignet, die Erkenntnisse des Projekts in weiterführenden F&E-Projekten bestmöglich umzusetzen.

## **8.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotential) für die Projektergebnisse**

### **Marktpotential - Rohstoffbereitstellung**

Mengenmäßig ist das Marktpotenzial für Strohpellets abhängig von der Gesamtanbaufläche für Getreide, dem Strohertrag je Hektar und dem Strohbedarf von Konkurrenzmärkten. Die Anbaufläche von Getreide verringerte sich zwischen 1980 und 2007 von 875.000 ha/a auf unter 600.000 ha/a. Gleichzeitig erfolgte eine konsequente Züchtung von kurzstrohigen Getreidesorten. Der Gesamtertrag von Getreide verringerte sich folglich im selben Zeitraum von etwa 4,5 Mio. t auf etwa 2,7 Mio. t/a. Die tatsächlich erntbare Strohmenge kann nach Abzug von Ernteverlusten (Stoppel- und Bröckelverluste) auf etwa 2 Mio. t/a geschätzt werden. Relevante Konkurrenzmärkte für die energetische Nutzung von Stroh sind vor allem der Markt für Einstreu und indirekt der Markt für Handelsdünger. Der Strohbedarf für Einstreu ist aufgrund der Umstellung vieler Vieh haltender Betriebe auf Flüssigmistsysteme derzeit rückläufig. Gleichzeitig steigt die Bereitschaft der Landwirte, Stroh zur Rückdüngung unterzupflügen, da die Preise für Handelsdünger in den letzten Monaten eine enorme Steigerung erfahren haben, mit denen der Nährstoffentzug durch Verbringen des Strohs vom

Feld ausgeglichen werden muss. Das wirtschaftliche Potenzial, welche Strohmenen für die energetische Nutzung bereitstehen, wird somit stark von den Preisen von Handelsdüngern abhängig sein. Als Ausnahme sind die Trockengebiete Ostösterreichs anzusehen, wo aufgrund fehlender Niederschläge und dem damit verbundenen gehemmten Rottevorgang, Stroh aus pflanzenbaulichen Gründen vom Feld zu verbringen ist.

Verschiedene Studien weisen ein freies Strohpotenzial für die energetische Nutzung im Bereich zwischen 0,4 und 1,1 Mio. t/a aus. Diese breite Variation zeigt die Schwierigkeit einer haltbaren Potenzialabschätzung.

### **Marktpotential - Feuerungsanlagen**

Bei konservativer Unterstellung von 500.000 t/a frei verfügbarem Stroh könnten rund 13.500 Strohpelletsfeuerungen mit einer Nennleistung von 100 kW betrieben werden. Bei Anlagen in diesem Leistungsbereich, wie sie z.B. in Kleinbetrieben wie Bäckereien oder landwirtschaftlichen Betrieben oder öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden, ist auch die Anwendung einer Sekundärmaßnahme wirtschaftlich sinnvoll. Darüber hinaus ist in dieser Größenordnung auch eine gezielte Implementierung der Abscheidetechnologie in das Wärmebereitstellungssystem möglich, wodurch der Effekt der Effizienzsteigerung optimal ausgenutzt werden kann. Die Anwendung des untersuchten Systems ist daher für Feuerungen in diesem Leistungsbereich mit Strohpellets denkbar.

1983 waren in Österreich 2.000 Strohfeuerungen trotz der bereits vielfach genannten Probleme im Hausbrand in Betrieb. Das tatsächliche Potenzial für Strohpelletsfeuerungen in Österreich beträgt mittelfristig 5.000 – 10.000 installierte Anlagen – stark konzentriert auf die Getreideanbaugebiete. Zusätzlich können Nah- und Fernwärmanlagen mit Energiestrohpellets versorgt werden, sodass das Potenzial auf 20.000 bis 30.000 Objekte geschätzt wird, die ihren Wärmebedarf mit Energiestrohpellets decken.

### **Verbreitungs- bzw. Umsetzungspotenzial**

Im Projekt sind die wichtigsten technologieorientierten Zielgruppen (Verarbeiter, Hersteller und Lieferant der Feuerungstechnik, Hersteller und Lieferant des Werkstoffs, Hersteller und Lieferant des Rauchgaswäschers) umfassend berücksichtigt, sodass das Verbreitungs- und Umsetzungspotenzial hoch einzuschätzen ist. Die Firma KWB als beteiligter Feuerungshersteller gehört in seinen Marktsegmenten zu den europäischen Marktführern, und kann somit für die Umsetzung auf ihr existierendes, weit über die Grenzen Österreichs hinausgehendes Vertriebsnetz zugreifen. Der beteiligte Hersteller von Feuerfestmaterial, die Firma Intocast, hat seinen Stammsitz in Deutschland, ist damit ebenfalls ein international agierendes Unternehmen. Dasselbe gilt sinngemäß für den Hersteller des Rauchgaswäschers (Firma Schröder).

## **8.5 Potential für Demonstrationsvorhaben – Chancen, Schwierigkeiten, Risiken bei der Realisierung und Umsetzung in Richtung Demonstrationsprojekt**

Die Ergebnisse der Kondensatanalysen lassen auf einen Angriff auf den Werkstoff des Wäschersystems bei Betrieb mit Strohpellets rückschließen. Ein großes Risiko für die Realisierung eines Demonstrationsprojektes liegt in der unzureichenden Lösung dieses Korrosionsproblems, welches unter Umständen auch erst nach längerem Betrieb erkennbar wird.

Im Rahmen der Verbrennungsversuche war mit beiden Feuerungen ein stabiler Betrieb mit Strohpellets über einen längeren Zeitraum hinweg möglich. Nichts desto trotz kam es immer wieder zu Störungen durch die Ausbildung von Verschlackungen im Verbrennungsbereich, was eine personelle Betreuung der Feuerung notwendig machte. Im Hinblick auf die Realisierung eines Demonstrationsprojekts ist ein solcher Personalaufwand nicht denkbar. Die Entwicklung eines robusteren Rost- bzw. Ascheaustragssystems ist daher eine notwendige Voraussetzung für diesen Schritt.

Durch den Betrieb des Wäschersystems über einen längeren Zeitraum im Rahmen eines Demonstrationsprojekts könnten anwendungsbezogene Problemstellungen und Herausforderungen untersucht werden. Im Rahmen von Untersuchungen unter realen Wärmeanforderungsbedingungen könnten Betriebsparameter dahingehend optimiert werden, dass neben einer maximalen Abscheidung unerwünschter Emissionen auch eine optimale Ausnutzung der Wärmerückgewinnung durch das Wäschersystem verwirklicht wird. Der Dauerbetrieb würde darüber hinaus weitere Erkenntnisse über die Kondensatqualität sowie das Ausmaß der Korrosionsreaktionen bringen.

## **9 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen**

### **9.1 Fachlichen Erkenntnisse für das Projektteam**

#### **Brennstoffeigenschaften und Brennstoffproduktion**

Die Brennstoffeigenschaften von Stroh variieren, vor allem in bezüglich ihres Aschegehalts bzw. der Konzentration einzelner aschebildender Elemente wie z.B. Kalium oder Silizium. Diese Schwankungen können beträchtlich sein, auch wenn Ernte und Aufbereitung kontrolliert erfolgen, und der Einfluss durch unterschiedlichen Standort und Erntezeitpunkt weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Durch Additive können die Verbrennungseigenschaften positiv beeinflusst werden, indem ein vollständiges Aufschmelzen verhindert, und so für eine bessere Durchströmbarkeit des Glutbettes erzielt wird. Im Prozess wäre eine kontrollierte Beimengung notwendig, da ein zu hoher Gehalt an Additiv den Aschegehalt und gleichzeitig auch die Kosten erhöht. Die Ausbildung von Schlacke und Ascheklumpen kann jedoch bei Verwendung von Stroh als Brennstoff auch durch die Beimengung von Additiven nicht vollständig vermieden werden. Der positive Effekt von Additiven wird bisweilen deutlich durch die Schwankungen in der Rohstoffqualität überlagert.

Vor allem für die Produktion von Versuchsbrennstoffen ist die Beimengung von Additiven eine sinnvolle Möglichkeit, um gezielt Brennstoffeigenschaften zu variieren. In Anbetracht des zusätzlichen Aufwands und nicht garantierbarer Vorzüge scheint eine Lösung der Verschlackungsprobleme von Seiten der Verbrennungstechnologie sinnvoller.

### **Verbrennungsverhalten von Stroh**

Die Verbrennung von Strohpellets bei gutem Gasphasenausbrand ist möglich, und wird durch die Ausbildung von Verschlackungen nicht notwendigerweise negativ beeinflusst. So können derzeit gültige Grenzwerte für CO und NO<sub>x</sub>, aber auch für Staub eingehalten werden.

Die Ausbildung von Schlackeklumpen stellt in Hinblick auf die Verbrennungsqualität und die vollständige Ausnutzung des Brennstoffes kein Hindernis dar. Es ist jedoch ein geeignetes Rost- und Ascheaustragssystem notwendig, um die gebildeten Verbrennungsrückstände aus der Verbrennungszone zu entfernen, und Störungen durch die Ausbildung zu großer Schlackebrocken und deren Ansammlung im Brennraum zu verhindern.

### **Korrosion von Feuerfestwerkstoffen im Brennraum**

Bei den untersuchten Materialien können unterschiedliche Infiltrationstiefen für Kalium- und Chloridionen gemessen werden. Als wichtigste Einflussgrößen erweisen sich die Faktoren Brennstoffzusammensetzung, Zusammensetzung des Brennkammermaterials sowie die Temperatur im Brennraum. Noch zu klären bleibt, welchen Einfluss die Wechselwirkung zwischen Schlacke und Feuerfestmaterial im Langzeittest zeigt, und ob die Bedingungen in der Gasatmosphäre der Verbrennung (oxidierend/reduzierend) die Korrosion am Material nachhaltig beeinflusst.

### **Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung**

Die Freisetzung von Stickoxidemissionen kann sowohl durch optimale Einstellung des Luftüberschusses als auch durch den Einsatz von Rauchgasrezirkulation deutlich reduziert werden. In Hinblick auf die Staubemissionen zeigt sich eine Abnahme der Emissionswerte mit zunehmendem Sekundärluftanteil sowie mit abnehmendem Luftüberschuss.

Hinsichtlich der Emissionsreduktion besteht auch bei Feuerungen am Stand der Technik noch Optimierungspotential. Besonders bei der Verbrennung von Stroh ist darauf zu achten, wie sich die Änderungen bei der Luftführung auf Temperatur- und Strömungsbedingungen im Glutbett, und damit auf die Verschlackungsneigung auswirken.

### **Untersuchung der Sekundärmaßnahme**

Eine Reduktion der Staubemissionen durch Einsatz des Abgaswärmetauschers mit Wäscher wurde nachgewiesen. Die Abscheidewirkung liegt im Bereich von 20%, und es kann gezeigt werden, dass die Hauptabtrennung des Feinstaubes im Wärmetauscher des Systems erfolgt. Durch den Einbau einer Elektrode zur Aufladung der Partikel wird die Reduktion auf 65% erhöht.

Für weiterführende Entwicklungen muss beachtet werden, dass verschiedene Abscheideprinzipien in einem System wirksam sind. Es gilt zu beachten, welche Partikelgrößenfraktionen durch das jeweilige Prinzip (Trägheit, elektrostatische Anziehung) abgeschieden werden, und durch welche Parameter die Abscheidewirkung beeinflusst wird, um die Anlage systematisch zu optimieren. Die Effizienzsteigerung durch die Rückgewinnung von Energie aus dem Abgas sowie die Reduktion der Luftschadstoffe SO<sub>2</sub> und HCl bringt einen Zusatznutzen, welcher für die Bewertung des Systems in Betracht gezogen werden muss.

Aufgrund der Brennstoffeigenschaften – vor allem durch die hohen Konzentrationen an Chlor und Schwefel – weist das Kondensat aus dem Abgas bei der Verbrennung von Stroh sehr niedrige pH-Werte auf. Dadurch besteht hohes Korrosionspotential für jene Werkstoffe, die im Bereich der Abgasführung und –nachbehandlung verwendet werden. Aufgrund der enthaltenen Bestandteile ist die Kondensatqualität aber auch hinsichtlich der Einleitung in kommunale Abwässer zu prüfen.

### **Wirtschaftliche Betrachtung**

Strohpelletsanlagen sind vor allem im kleinen Leistungsbereich die teuersten unter den untersuchten Feuerungen. Ausgehend von einer vergleichbaren Lebensdauer aller betrachteten Systeme und ohne Installation von Rauchgasreinigungssystemen sind Strohpelletsfeuerungen gegenüber Systemen mit Holzbrennstoffen in keinem Leistungsbereich konkurrenzfähig. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass bei erhöhten kapital- und betriebsgebundenen Kosten, aufgrund der relativ hohen Kosten für Strohpellets, keine signifikanten Einsparungen im Bereich der Brennstoffkosten möglich sind. Gegenüber HEL werden Strohpellets ab einem Leistungsbereich von 20 – 25 kW wirtschaftlich.

Im Leistungsbereich 75 – 80 kW, wo die kapitalgebundenen Kosten geringere Bedeutung haben, kann der Einbau von Wärmetauschern zur Abgasreinigung die Kosten gegenüber der

Anlage ohne Abgasreinigung sogar senken werden, indem beträchtliche Mengen an Brennstoff eingespart werden.

## **9.2 Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?**

### **Brennstoffeigenschaften und Verbrennungsverhalten von Stroh**

Die Analyseergebnisse ergänzen bereits vorhandene Daten über die Brennstoffeigenschaften von Stroh. Die Kenntnis möglicher Schwankungsbreiten sowie Erfahrungen der Auswirkung einzelner Brennstoffparameter auf das Verbrennungsverhalten bilden die Basis, um Grenzwerte und Anforderungen für Brennstoffe im Rahmen von Produktnormen festlegen zu können.

Im Rahmen eines bereits beantragten Projekts werden die Verbrennungseigenschaften unterschiedlichster Brennstoffqualitäten grundlegend untersucht. Die Grundlage für die Konzeption des Versuchsprogramms bilden die Erfahrungen die bei der Verbrennung von Stroh aber auch anderer landwirtschaftlicher Brennstoffe in Kleinf Feuerungsanlagen gemacht wurden.

Die Kenntnis um die Auswirkungen von Brennstoffeigenschaften könnte auch die Grundlage bilden, um Brennstoffe gezielt zu kombinieren und so Mischpellets mit bestimmten Eigenschaften herzustellen.

### **Langzeittests zur Untersuchung von Korrosionserscheinungen**

Von besonderem Interesse für die Firma Intocast ist die Beantwortung der Frage, ob sich mit zunehmender Betriebsdauer im Werkstoff eine Diffusionssperre ausbildet, welche weiteren korrosiven Angriff verhindert. Auch den Einfluss der Wechselwirkung zwischen flüssiger Schlacke und dem porösen Feuerfestmaterial im Gegensatz zu einer reinen Gasphasen-Oberflächen Wechselwirkung im Brennraum gilt es weiterhin zu untersuchen.

Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, dass für derartige Untersuchungen eine höhere Zahl an Betriebsstunden nötig ist. Es sind dazu Langzeitversuche notwendig, welche im Rahmen von Monitoringprojekten durchgeführt werden könnten.

### **Untersuchung von Sekundärmaßnahmen**

Bei der Untersuchung von Sekundärmaßnahmen zur Emissionsreduktion werden nicht nur Staubmengen betrachtet, sondern auch die Wirkungsweise bezüglich der abgeschiedenen Partikelgrößen und chemischen Verbindungen untersucht.

Das beobachtete Phänomen der erhöhten Partikelanzahl im submikronen Bereich bei Einsatz des Sekundärwärmetauschers soll systematisch untersucht werden. Es gilt dabei vor

allem die Messmethoden für diese Anwendung sowie die aufgestellte Hypothese zur Ausbildung dieser Partikel zu hinterfragen.

### **Kondensatqualität**

Ein zentrales Thema weiterer Untersuchungen ist die Qualität der Kondensate aus dem Abgas, welche bei Anlagen mit Brennwertechnologie aber auch bei ungünstigen Anlageneinstellungen entstehen. Dabei steht vor allem die Frage im Vordergrund, inwieweit ein Zusammenhang zwischen den Brennstoffeigenschaften und der Qualität des gebildeten Kondensats hergestellt werden kann.

Eine Abschätzung der Kondensateigenschaften ist vor allem hinsichtlich der Einleitung in kommunale Abwässer von Interesse. Die Fragestellung soll aber auch unter dem Blickwinkel der Materialprüfung erfolgen, bei der eine Einteilung von Werkstoffen in unterschiedliche Korrosionsklassen erfolgt – je nachdem welchen Kondensatqualitäten sie ausgesetzt sind.

### **Wirtschaftlichkeit**

Im Bereich der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden zukünftig vor allem Daten über den Aufwand durch Wartung und Austausch von Teilen benötigt, mit denen bei Betrieb der Anlagen mit problematischen Brennstoffen wie z.B. Stroh zu rechnen ist. Diesbezüglich liegen nur wenige Erfahrungswerte vor, der Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnung ist jedoch beträchtlich.

## **9.3 Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?**

### **Arbeitsgruppen zur Erstellung von Produkt- und Prüfnormen**

- Die Kenntnis der Brennstoffeigenschaften sowie möglicher Schwankungsbreiten beim Rohstoff Stroh können als Basis für die Festlegung von Grenzwerten und Anforderungen für Brennstoffe im Rahmen von Produktnormen herangezogen werden. Dabei ist nicht nur der Wertebereich von Interesse, sondern auch, inwiefern sich die jeweiligen Eigenschaften in Hinblick auf die Verwendung von Stroh als Brennstoff auswirken.
- Im Bereich der Werkstoffprüfung werden – je nach Anforderung – Korrosionstests mit Kondensaten und Abgasen aus Normbrennstoffen durchgeführt. In diesen sind derzeit die Brennstoffe Öl, Gas und Holz berücksichtigt. Die Vielfalt der verwendeten Brennstoffe macht eine Adaptierung der Norm notwendig, wobei die Herausforderung



darin besteht, eine Prüfkondensat-Qualität festzulegen, die die Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe adäquat widerspiegelt.

### **Hersteller von Kaminsystemen**

Das Wissen um die Qualität von Abgas, aber vor allem Kondensat, ist auch für die Hersteller von Kaminsystemen von Interesse, um, je nach Brennstoffqualität, geeignete Materialien einsetzen zu können, und so Schäden durch Korrosion zu vermeiden.

## 10 Ausblick

Der Einsatz von Strohpellets in Kleinf Feuerungsanlagen ist prinzipiell möglich. In Österreich steht eine relevante Menge an Stroh für die energetische Nutzung zur Verfügung, gleichzeitig können derzeit gültige Emissionswerte bei Einsatz der entsprechenden Technologien eingehalten werden. Diesen Argumenten stehen Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit dieser Anlagen gegenüber, vor allem aufgrund von Verschlackungen aber auch möglicher Korrosionserscheinungen bedingt durch die problematischen chemischen Eigenschaften von Abgas bzw. entstehendem Kondensat.

Die wirtschaftliche Bewertung im Rahmen des Projekts hat gezeigt, dass, aufgrund der genannten Problemstellungen, ein Einsatz von Strohpellets in Anlagen ab einem Leistungsbereich von 75 kW und darüber zu bevorzugen ist. Auch Maßnahmen zur Emissionsreduktion sind in dieser Größenordnung effizienter und zumeist leichter zu verwirklichen.

Die Effizienz des Einsatzes von Strohpellets hängt als stark von der Größe der verwendeten Anlagen ab. Um diesbezüglich konkretere Aussagen treffen zu können, wird mehr Information vor allem darüber benötigt, wie sich die Verwendung des Brennstoffes Stroh auf die Standzeiten der Anlagen bzw. einzelner Anlagenteile (vor allem in Hinblick auf Korrosion) auswirkt.

Unabhängig vom Leistungsbereich sind für einen zuverlässigen Betrieb mit Strohpellets weiterführende Entwicklungen im Bereich von Rostsystemen und Ascheaustrageeinrichtungen notwendig.

### **Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten**

#### **Mischpellets mit Stroh**

Ein möglicher Weg, um Brennstoffe mit definierten Eigenschaften herzustellen und gleichzeitig eine möglichst breite Rohstoffbasis nutzbar zu machen, ist die Herstellung von Mischpellets. So können Rohstoffe wie z.B. Stroh mit anderen Materialien sinnvoll kombiniert werden. Zentrale Fragestellung dabei ist, wie genau die Eigenschaften solcher Brennstoffe eingestellt werden können, und wie sich die Kombination verschiedener Rohstoffe auf den Pelletierprozess auswirkt.

#### **Freisetzung von Komponenten aus dem Brennstoff**

Grundlegende Untersuchungen von Brennstoffen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften unter variierenden Verbrennungsbedingungen würden eine Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens ermöglichen. So kann eine Abschätzung getroffen werden, welche Elemente bzw. chemischen Verbindungen in Abhängigkeit von Brennstoffqualität und

Verbrennungsbedingungen (Temperatur, Luftüberschuss,...) aus dem Brennstoff in die Gasphase freigesetzt werden, und sich in weiterer Folge in Ablagerungen in Brennraum- und Wärmetauscherbereich, im Abgas oder im Kondensat wiederfinden.

Praktisch könnten diese Erkenntnisse z.B. zur Erarbeitung von Anforderungskriterien für Normkondensate zur Prüfung verschiedener Werkstoffklassen angewendet werden.

#### **Langzeitkorrosionsversuche – Monitoring**

Hinsichtlich der bisher erzielten Ergebnisse aus den Korrosionsuntersuchungen wird empfohlen, die identifizierten Einflussparameter auch in Langzeittests auf ihre Auswirkung hin zu untersuchen. Des Weiteren gilt es zu klären, welchen Einfluss oxidierende oder reduzierende Eigenschaften des Verbrennungsgases auf die Korrosionsmechanismen an der Materialoberfläche zeigen. Dies könnte in Versuchen mit Anlagen, welche mit unterschiedlichem Luftüberschuss betreiben werden, untersucht werden.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt sollte sich damit auseinandersetzen, ab welchen Konzentrationen an Fremdionen es zu einer Schädigung des Materials kommt, und ob auch keramische Werkstoffe in der Lage sind, Schutzschichten an den Oberflächen aus zu bilden, und so fortschreitende Materialschädigung zu verhindern bzw. zu verzögern. Langzeitversuche unter realen Betriebsbedingungen z.B. im Rahmen von Monitoringprojekten erscheinen diesbezüglich als geeignet.

#### **Parameterstudie und Optimierung des *Hydrocube*<sup>®</sup>**

Hinsichtlich der verwendeten sekundären Abscheidetechnologie ist eine Untersuchung der Wirksamkeit der einzelnen Systemkomponenten notwendig. Durch Variation verschiedener Betriebseinstellungen sollen die Haupteinflussparameter auf die Abscheidewirkung der jeweiligen Anlagenteile identifiziert, und durch ein geeignetes Zusammenspiel die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert werden.

Des Weiteren sind Untersuchungen hinsichtlich einer möglichen Aufbereitung bzw. Regeneration des Kondensats empfehlenswert.

## 11 Referenzen

### 11.1 Literaturverzeichnis

Bundesanstalt für Landtechnik 1995

Bundesanstalt für Landtechnik (Hrsg.): Strohfeuerung – Bericht über Untersuchungen der Bundesanstalt für Landtechnik. Wieselburg 1995.

Carvalho 2007

Carvalho, L.; Wopienka, E.: Landwirtschaftliche Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen. Abschlussbericht zu Arbeitspaket 4: Abbrandversuche. Austrian Bioenergy Centre (Hrsg.), Wieselburg, 2007

Eder 2006

Eder, G.; Luisser, M.; Wörgetter, M.: Energiekornmonitoring - Erforschung der technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten für die thermische Nutzung von Energiekorn und Strohpellets in Kleinfeuerungsanlagen im Praxisbetrieb. Endbericht, Austrian Bioenergy Centre, Wieselburg, 2006

Eder 2008

Eder, G.; Pointner, C.; Reder, M.; Wopienka, E.: Machbarkeitsstudie über die Brikettierung und die thermische Nutzung von Landschaftspflegeheu in Kleinfeuerungsanlagen. Austrian Bioenergy Centre (Hrsg.), Wieselburg 2008.

Eskilsson 2004

Eskilsson D., Rönnbäck M., Samuelsson J. und Tullin C.: Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners. Biomass and Bioenergy Vol. 27, pp. 541 – 546, 2004.

Figl 2006

Figl, F.; Haslinger, W.; Wopienka, E.: Entwicklung von Strohpellets für Kleinfeuerungsanlagen (Abschlussbericht). Austrian Bioenergy Centre, Wieselburg, 2006

Hansen 2000

Hansen, L.; Nielsen, H.; Frandsen, F.; Dam-Johansen, K.; Hørlyck, S.; Karlsson, A.: Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler, Fuel Processing Technology, 64, 189-209, 2000

Hartmann 2000

Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München, 2000

Lasselsberger 2000

Lasselsberger, L.: Kleinfeuerungen für Holz, Verbrennungstechnik/Stand der Technik/Regelwerke/Entwicklungen. Darstellung der Umsetzung von Entwicklungsarbeiten an Kleinfeuerungen für Holz in Österreich. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Landtechnik (Hrsg.), Wieselburg 1995.

Lechner/Egger/ Schauer 1999

Lechner, K.; Egger A.; Schauer R.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Linde Verlag: Wien: 1999.

Livbjerg 2001

Livbjerg, H.: Aerosol formation from straw combustion – Danish experiences. Aerosol from biomass combustion, international seminar, International Energy Agency (IES) and Swiss Federal Office of energy, Zurich 2001.

Montgomery 2002a

Montgomery M.; Karlsson, A.; Larsen, O.: Field test corrosion experiments in Denmark with biomass fuels Part 1: Straw-firing, Materials and Corrosion, 53, 121-131, 2002.

Montgomery 2002b

Montgomery M.; Larsen, O.: Field test corrosion experiments in Denmark with biomass fuels Part 2: Co-firing of straw and coal, Materials and Corrosion, 53, 185-194, 2002.

Nikolaisen 2008

Nikolaisen, L.: Straw for Energy Production in Denmark. 1. Internationale Fachtagung - Strohenergie 2008, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, April 2008.

Nussbaumer 1989

Nussbaumer, T.: Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz. Dissertation, ETH Zürich, 1989.

Nussbaumer 2003

Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. Energy and Fuels 2003, Volume 17, p.1510-1521.

Nussbaumer 2006

Nussbaumer, T.: 9.Holzenergie-Symposium: Feinstaubminderung und Stromerzeugung im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung. Tagungsband, ETH Zürich, Oktober 2006

Nussbaumer 2008

Nussbaumer, T.; Czasch, C.; Klippel, N.; Johansson, L.; Tullin, C.: Particulate emissions from biomass combustion in IEA countries. Report on behalf of IEA Bioenergy Task 32, January 2008.

Obernberger 2005

Obernberger, I.; Brunner, T.: Fly ash and aerosol formation in biomass combustion processes an introduction. In Proceedings of the International workshop "Aerosols in Biomass combustion", Series "Thermal Biomass Utilization", Graz 2005.

Oser 2003

Oser, M.; Nussbaumer, T.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Technischer Bericht, April 2003.

Oser 2004

Oser, M., Nussbaumer, T.: Low-Particle-Pelletsfeuerung im Leistungsbereich von 100 – 500 kW. Bericht im Auftrag des Bundesamt für Energie; Zürich, 2004.

Winiwarter 2007

Winiwarter, W.; Schmidt-Stejskal, H.; Windsperger, A.: Aktualisierung und methodische Verbesserung der österreichischen Luftschadstoffinventur für Schwebstaub. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamt, Austrian Research Centres, Dezember 2007.

### Reisinger 1993

Reisinger, K.: Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens verschiedener Biomassearten und Auswertung der Ergebnisse im Hinblick auf eine sinnvolle thermische Nutzung. Diplomarbeit, Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Wien 1993

### Rezaie 2004

Rezaie, A.; Headrick, W.; Fahrenholtz, W.; Moore, E.; Velez, M.; Davis, W.: Interaction of refractories and alkaline containing corrodants, *Refractories Applications and News*, Vol. 9, 5, 26-31, 2004

### Sattler 2007

Sattler, M.: Staubabscheider für den Hausbrand (<50 kW). Bericht Ökozentrum Langenbruck, Mai 2007.

### Schwabl 2008

Schwabl, M.: Untersuchung der Staubemissionen einer Prototyp Strohpelletsfeuerung sowie Ermittlung des Potentials einer Emissionsreduktion durch einen Brennwertwärmetauscher mit Wäscher. Diplomarbeit (in Arbeit), TU-Wien, 2008.

### Steenari 1998

Steenari, B.-M. and Lindqvist, O.: High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14(1), pp. 67-76

### Thrän 2008

Thrän, D.; Junold, M.: Energetische Nutzung von Stroh in Europa – Rahmenbedingungen, Potenziale und Entwicklungen. 1. Internationale Fachtagung - Strohenergie 2008, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, April 2008.

### Turowski 2008

Turowski, P.: Emissionen und deren Minderung beim Einsatz von Halmgütern in Kleinf Feuerungsanlagen. 1. Internationale Fachtagung - Strohenergie 2008, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena, April 2008.

### Wopienka 2005

Wopienka, E.; Eder, G.; Figl, F.; Padouvas, E.; Friedl, G.; Hofbauer, H.; Wörgetter, M.: Ash melting behaviour of agricultural biomass fired in small scale pellets boilers. *Proceedings of the 14th European Biomass Conference & Exhibition, Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, Paris: October 2005

### Wopienka 2006a

Wopienka E., Jöller, M.: ProPelletl – Schlackebildung und Korrosion in Holzpelletskesseln und Holzpelletsöfen (Abschlussbericht), Arbeitspaket 5: Analysen der Aschen und Schlacken, Technischer Bericht, Austrian Bioenergy Centre (Hrsg.), Wieselburg 2006.

### Wopienka 2006b

Wopienka, E.; Carvalho, L.; Eder, G.: Landwirtschaftliche Biomassen als Brennstoffe für Kleinf Feuerungsanlagen – Technikumsversuche und Praxisbetrieb im Vergleich. *ÖIAZ - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, Volume 14, Dezember 2006.

Wopienka 2007

Wopienka, E.: Jöller, M.: Landwirtschaftliche Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen. Abschlussbericht zu Arbeitspaket 2: „Brennstoffeigenschaften von Rohstoffen und Pellets“ und Arbeitspaket 5: Untersuchung von Aschen, Schlacken und Korrosion. Technischer Bericht, Austrian Bioenergy Centre (Hrsg.), Wieselburg 2007.

## 11.2 Normen und Gesetze

Art. 15 a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinfeuerungen (1998)

Vereinbarung zwischen dem Bund und den Ländern gemäß Art. 15a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinfeuerungen. Wien, 1998.

Art. 15 a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen (2006)

Entwurf einer Vereinbarung zwischen dem Bund und den Ländern gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen und Überprüfung von Feuerungsanlagen. Wien, 2006.

Art. 15 a B-VG über die „Einsparung von Energie (1995)

Vereinbarung zwischen dem Bund und den Ländern gemäß Art. 15a B-VG über die Einsparung von Energie. Wien, März 1995

AAEV 1996

AAEV 1996 - Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen.

Änderung der AEV Abluftreinigung 2005

Änderung der AEV Abluftreinigung 2005: 62. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der die AEV Abluftreinigung geändert wird. Ausgegeben am 4. März 2005

Feuerungsanlagen-Verordnung – FAV 1998

331. Verordnung (Feuerungsanlagen-Verordnung – FAV) über die Bauart, die Betriebsweise, die Ausstattung und das zulässige Ausmaß der Emission von Anlagen zur Verfeuerung fester, flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe

CEN/TS 14961

ÖNORM CEN/TS 14961: Feste Biobrennstoffe, Brennstoffspezifikationen und –klassen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Mai 2005.

ÖNORM M 7135

ÖNORM M 7135: Presslinge aus naturbelassenem Holz oder naturbelassener Rinde/ Pellets und Briketts/ Anforderungen für die Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, November 2000.

VORNORM ÖNORM M 7139

VORNORM ÖNORM M 7139: Energiekorn - Anforderungen und Prüfbestimmungen (Nationale Ergänzung zu VORNORM ÖNORM CEN/TS 14961), Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Oktober 2006.

VORNORM ÖNORM C 4000

VORNORM ÖNORM C 4000: Miscanthuspresslinge - Anforderungen und Prüfbestimmungen (Nationale Ergänzung zu VORNORM ÖNORM CEN/TS 14961 und VORNORM ÖNORM CEN/TS 15234), Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, November 2007.

VORNORM ÖNORM C 4001 (Entwurf)

VORNORM ÖNORM C 4001 (Entwurf): Miscanthushäcksels - Anforderungen und Prüfbestimmungen (Nationale Ergänzung zu VORNORM ÖNORM CEN/TS 14961 und VORNORM ÖNORM CEN/TS 15234), Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.), Wien, Juli 2008.

VDI 2066

VDI 2066/Blatt 01: Messen von Partikeln/ Staubmessungen in strömenden Gasen/ Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Verein deutscher Ingenieure 2006.

### 11.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tiegel für Infusionstest (schematisch).....	27
Abbildung 2: Exemplarisch 2 Proben aus dem Tiegeltest im Vergleich (a) deutliche Veränderungen des Feuerfestmaterials in der Randzone (b) keine Veränderung des Materials erkennbar .....	35
Abbildung 3: Anlagenschema 15 kW Feuerung .....	36
Abbildung 4: Schematische Darstellung der keramischen Brennkammer.....	38
Abbildung 5: Variationen im Versuchsprogramm zur Emissionsmessung (a) Standard, (b) mit Hydrocube®, (c) mit Hydrocube® mit zusätzlich eingebauter Elektrode und (d) nur mit dem Wärmetauscher des Hydrocube® - Systems.....	40
Abbildung 6: Querschnittsansicht des TDS Powerfire .....	42
Abbildung 7: Position der Feuerfestproben an der Brennkammertür in 150 kW Anlage..	43
Abbildung 8: Charakteristische Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens der Pellets aus den Vorversuchen.....	45
Abbildung 9: Anteil der Hauptaschebildner in den Pellets für die Verbrennungsversuche (Darstellung der einzelnen Elemente in oxidischer Form als Anteil an der Oxidsumme) .	47
Abbildung 10: Aschegehalt der Brennstoffproben aus den Verbrennungsversuchen .....	49
Abbildung 11: Schlackebrocken aus der Verbrennung der drei Versuchs Brennstoffe .....	49
Abbildung 12: Einfluss des Brennstoffs auf das Material. Photographischer Vergleich der Beeinflussung von Material A nach Einsatz mit allen drei Brennstoffen.....	51
Abbildung 13: Mittelwerte der Eindringtiefen von Kalium ins Material in Abhängigkeit vom Brennstoff und der Position in der Brennkammer beispielhaft an Material A.....	52
Abbildung 14: Keramisches Material nach der Verbrennungsversuche mit Dollit, Steine von Position 1 untere Reihe und Position 2 obere Reihe .....	53
Abbildung 15: Eindringtiefen Kalium an Material A nach Verbrennungsversuchen mit Pellets mit Additiv C in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen; A1 reduzierend, A3 und A5 oxidierend .....	54
Abbildung 16: Einfluss der Wechselwirkung von Verbrennungsschlacke mit dem Feuerfestmaterial .....	55
Abbildung 17: Vergleich der Korrosionsergebnisse der 15 kW mit der 150 kW Anlage; die durchgängigen Linien sind Ergebnisse der 150 kW Anlage .....	56
Abbildung 18: Kaliumeindringtiefen in Abhängigkeit von Feuerfestmaterial und Brennstoff .....	57
Abbildung 19: Eindringtiefen von Chlorid in Abhängigkeit vom Feuerfestmaterial, Versuchs Brennstoff Stroh mit Dollit .....	58



Abbildung 20: NO<sub>x</sub>- sowie CO-Emissionen für 3 Betriebszustände mit unterschiedlichem Luftüberschuss. (Die dargestellten Werte sind Mittelwerte über Intervalle von 60 Minuten.) ..... 61

Abbildung 21: NO<sub>x</sub>- und CO-Emissionen bei unterschiedlichen Rauchgas-Rezirkulationsraten an einem Betriebspunkt (a) sowie bei zwei verschiedenen Betriebszuständen (b) ..... 62

Abbildung 22: Staubemissionen aus der Verbrennung von Stroh im TDS Powerfire bei verschiedenen Betriebseinstellungen. (Die dargestellten Werte entsprechen Einzelmessungen.) ..... 63

Abbildung 23: Mittlere Staubemissionen bei der Verbrennung von Stroh ohne Additiv sowie Stroh mit Additiv C im Volllastbetrieb ohne Sekundärmaßnahme, bei Anwendung des Hydrocube<sup>®</sup> sowie des Hydrocube<sup>®</sup> mit zusätzlich eingebauter Elektrode ..... 66

Abbildung 24: Partikelanzahl- (a) und daraus berechnete Massenverteilung (b) bei Betrieb der Strohfeuerung mit und ohne Hydrocube<sup>®</sup> sowie mit Hydrocube<sup>®</sup>-Wärmetauscher ohne Wäscher ..... 67

Abbildung 25: Durchschnittliche Staubemissionswerte mit und ohne Anwendung des Hydrocube<sup>®</sup> bei der Verbrennung von Stroh mit Additiv C unter Volllast- und Teillastbedingungen ..... 68

Abbildung 26: Partikelmasseverteilung (berechnet aus der via ELPI ermittelten) ..... 69

Abbildung 27: Elementarzusammensetzung der Staubemissionen aus der Verbrennung von Stroh mit Additiv C (100% = Summe der Elemente ohne Sauerstoff) ..... 70

Abbildung 28: Elementbilanz für Kalium, Chlor und Schwefel bei einem Versuch ohne und mit Hydrocube<sup>®</sup> im Vergleich. Wiederfindung der Elemente in den einzelnen Fraktionen. .... 71

Abbildung 29: Konzentrationen einzelner Elemente im Kondensat (a) und pH-Wert des Kondensats (b) über die Betriebsdauer ..... 72

Abbildung 30: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 8 kW ..... 79

Abbildung 31: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 10-12 kW ..... 80

Abbildung 32: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW ..... 81

Abbildung 33: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 40-45 kW ..... 82

Abbildung 34: mittlere jährliche Gesamtkosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW ..... 83

Abbildung 35: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 8 kW ..... 84

Abbildung 36: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW ..... 85

Abbildung 37: Variation der Reparaturkosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW ..... 85

Abbildung 38: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 8 kW ..... 86

Abbildung 39: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 20-25 kW ..... 87

Abbildung 40: Variation der Investitionskosten im Nennleistungsbereich 75-80 kW ..... 88

## 11.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über verwendete Analysemethoden ..... 26

Tabelle 2: Übersicht über verwendete Messgeräte bei den Versuchen an der 15 kW Feuerung ..... 30

Tabelle 3: Übersicht über verwendete Messgeräte bei den Versuchen an der 150 kW Feuerung .....	31
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Additive .....	34
Tabelle 5: Beschreibung der untersuchten Feuerfestmaterialien .....	34
Tabelle 6: Versuchsvariationen bei der Untersuchung gas- und partikelförmiger Emissionen.....	41
Tabelle 7: Übersicht über Einstellungen bei den Versuchsvariationen am TDS Powerfire	44
Tabelle 8: Brennstofftechnisch relevante Eigenschaften der Versuchspellets. (Probe 1 und Probe 2 wurden jeweils aus unterschiedlichen BigBags einer Charge gezogen.) .....	48
Tabelle 9: Übersicht über Einstellungen sowie Luftüberschuss und abgenommene Leistung bei den Versuchsvariationen am TDS Powerfire .....	60
Tabelle 10: Emissionen während stabiler Verbrennungsphasen. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte stabiler Versuchsintervalle an mehreren Versuchstagen .....	64
Tabelle 11: Durchschnittliche Staubemissionen mit und ohne Hydrocube® bei unterschiedlichen Betriebspunkten.....	65
Tabelle 12: Staubabscheidung durch Anwendung des Hydrocube® .....	66
Tabelle 13: Vergleich der Elementkonzentrationen nach 7 h Betriebszeit mit dem gesetzlich zulässigen Maximalgrenzwert nach Änderung der AEV Abluftreinigung 2005.	73
Tabelle 14: Wirkungsgradsteigerung durch Einsatz des Hydrocube® .....	74
Tabelle 15: betrachtete Wärmebereitstellungssysteme.....	75
Tabelle 16: Nennleistung, Volllaststunden und Heizwärmebedarf.....	75
Tabelle 17: Zusammenfassung der kapitalgebundenen Kosten .....	76
Tabelle 18: Daten zur Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten .....	77
Tabelle 19: Zusammenfassung der verbrauchsgebundenen Kosten .....	77
Tabelle 20: Zusammenfassung der betriebsgebundenen Kosten .....	78
Tabelle 21: Zusammenfassung aller Kostenarten .....	79
Tabelle 22: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch.....	112
Tabelle 23: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch, Querschnitt Teil 1 .....	113
Tabelle 24: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch, Querschnitt Teil 2 .....	114
Tabelle 25: Zusammensetzung der Pellets- und Pelletsaschen aus den Vorversuchen .	115
Tabelle 26: Brennstofftechnische Parameter der Versuchspellets .....	116
Tabelle 27: Chemische Zusammensetzung der Versuchspellets .....	116
Tabelle 28: Chemische Zusammensetzung der Kondensatanalysen.....	117

## **12 Anhang**

### **12.1 Ergebnisse der Infusionstests**

Tabelle 22: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch

	1550 SiC	853 T MOD	SF 60 ZR	C50/S 51	1550 SiC (Corhart-ZaC)	1550 SiC (98/99 SiC)
N12_V00						
N12_V01						
N12_V02						
N12_V03						
N12_V04						
N12_V05						
N12_V06						
N12_V07						
N12_V08						

Tabelle 23: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch, Querschnitt Teil 1





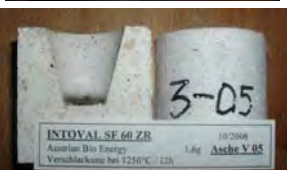

	INTOVAL 1550 SiC	INTOVAL 853 T MOD	INTOVAL SF 60 ZR
N12_V00			
N12_V01			
N12_V02			
N12_V03			
N12_V04			
N12_V05			
N12_V06			
N12_V07			
N12_V08			

Tabelle 24: Tiegelübersicht aus Korrosionsvorversuch, Querschnitt Teil 2

	INTOVAL C 50/S 51	INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC)	INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC)
N12_V00	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.00	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.00	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.00
N12_V01	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.01	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.01	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.01
N12_V02	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 4,0g Asche V.02	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 4,0g Asche V.02	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 4,0g Asche V.02
N12_V03	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.03	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.03	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.03
N12_V04	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 2,0g Asche V.04	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 2,0g Asche V.04	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 2,0g Asche V.04
N12_V05	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.05	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.05	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,8g Asche V.05
N12_V06	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,6g Asche V.06	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,6g Asche V.06	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,6g Asche V.06
N12_V07	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,9g Asche V.07	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,9g Asche V.07	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,9g Asche V.07
N12_V08	 INTOVAL C 50/S 51 Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,7g Asche V.08	 INTOVAL 1550 SiC (Corhart-ZaC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,7g Asche V.08	 INTOVAL 1550 SiC (98/99 SiC) Austrian Bio Energy Verschleißkante bei 1250°C / 12h 1,7g Asche V.08

## 12.2 Analyseergebnisse der Pellets aus den Vorversuchen

Bezeichnung Weizenstroh	Verwendung	Elementkonzentration in mg/kg (bezogen auf den wasserfreien Brennstoff)												
		Al	Ba	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Zn	Cl
ohne Additiv	Vorversuch	108	32	3237	101	14791	1026	37	190	411	886	12340	4	2905
mit 1,5 % Bauxitmehl	Vorversuch	1940	33	3304	435	14763	1041	39	194	405	865	13684	4	2740
mit 3,6 % Bauxitmehl	Vorversuch	3806	33	3219	808	14660	1027	40	191	412	841	13411	4	2650
mit 1,5 % Additiv C	Vorversuch	6135	32	3293	171	14868	1045	38	216	403	897	13341	4	2944
mit 3 % Additiv C	Vorversuch	11664	31	3222	186	14909	1029	37	236	389	880	13157	4	2721
mit 2,5 % Additiv B	Vorversuch	573	32	3239	131	14774	1038	49	193	465	912	17689	6	2876
mit 2,5 % Additiv A	Vorversuch	240	33	3396	139	15079	1078	62	200	509	895	21917	7	2896
mit 1 % Dollit	Vorversuch	166	32	5323	117	15029	2015	37	195	426	901	12765	4	2856
mit 1 % Branntkalk	Vorversuch	122	32	7661	100	15162	1076	37	192	416	907	13169	4	2913

Asche aus Weizenstroh	Verwendung	Elementkonzentration in mg/kg (bezogen auf die wasserfreie Ascheprobe)												
		Al	Ba	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Zn	Cl
ohne Additiv	Vorversuch	2560	579	56100	2430	178000	18000	703	4370	6930	12100	222000	75	25900
mit 1,5 % Bauxitmehl	Vorversuch	52200	478	46300	6090	149000	14700	560	3280	5930	8960	186000	62	21600
mit 3,6 % Bauxitmehl	Vorversuch	69100	240	34500	8780	112000	5000	447	2650	4800	7300	150000	51	14800
mit 1,5 % Additiv C	Vorversuch	78200	456	47300	2360	149000	14600	549	3330	5950	10400	178000	64	25000
mit 3 % Additiv C	Vorversuch	127000	374	38000	2360	126000	10500	455	2980	4810	8950	152000	51	22400
mit 2,5 % Additiv B	Vorversuch	8920	479	46200	2140	148000	15000	721	2980	6380	11800	238000	86	26100
mit 2,5 % Additiv A	Vorversuch	2990	462	43800	1960	143000	14400	806	2770	6540	9670	268000	100	24200
mit 1 % Dollit	Vorversuch	3310	517	81900	2160	161000	31400	592	3120	6270	10900	195000	67	29500
mit 1 % Branntkalk	Vorversuch	2440	502	114000	1710	159000	16900	567	2880	6180	11100	192000	65	27800

Tabelle 25: Zusammensetzung der Pellets- und Pelletsaschen aus den Vorversuchen

## 12.3 Analyseergebnisse der Pellets aus den Verbrennungsversuchen

Probencode	Bezeichnung	Verwendung	Heizwert wf MJ/kg	w nach Produkt.	a	Roh- dichte	Abrieb in %	Flüchtige Bestandt. in %	Wassergehalt vor Versuch				Dichte, gewichtet	
									I	II	III	IV		
NK1112_01A	Weizenstroh ohne Add.	Abbrand	17,18	-	6,30	1291	1,7	75,4	-	-	-	-	-	1274
NK1112_01B	Weizenstroh ohne Add.	Abbrand	17,27	-	5,10	1226	1,6	75,6	9,3	8,92	-	-	-	1226
NK1112_02A	Weizenstroh mit Additiv C	Abbrand	17,16	-	5,90	1232	1,9	75,6	-	8,4	-	-	-	1231
NK1112_02B	Weizenstroh mit Additiv C	Abbrand	17,16	-	6,30	1229	2,0	75,5	-	-	-	-	-	1230
NK1112_03A	Weizenstroh mit Dolllit	Abbrand	16,62	-	8,90	1246	1,5	73,3	8,46	9,47	-	-	-	1249
NK1112_03B	Weizenstroh mit Dolllit	Abbrand	16,77	-	8,70	1270	1,5	73,4	-	-	-	-	-	1268

Tabelle 26: Brennstofftechnische Parameter der Versuchspellets

Probencode	Bezeichnung	Angaben in [%]										Angaben in mg/kg TS									
		C	H	N	Al	Ba	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Zn	Cl				
NK1112_01A	Weizenstroh ohne Add.	46,5	5,59	0,39	391	32	2250	167	6380	633	29	73	673	534	20100	6	1120				
NK1112_01B	Weizenstroh ohne Add.	46,8	5,76	0,52	128	25	2570	85	8490	689	21	33	459	676	14600	7	574				
NK1112_02A	Weizenstroh mit Additiv C	46,4	5,60	0,46	3160	30	2690	158	7050	422	29	67	581	644	17500	6	849				
NK1112_02B	Weizenstroh mit Additiv C	46,1	5,59	0,51	2140	33	2320	188	6420	723	29	65	764	619	20600	7	784				
NK1112_03A	Weizenstroh mit Dolllit	45,8	5,58	0,52	248	30	8810	155	9300	4020	28	54	565	741	15800	7	1180				
NK1112_03B	Weizenstroh mit Dolllit	45,8	5,6	0,51	241	30	8510	148	9250	3880	28	50	543	751	15700	6	1010				

Tabelle 27: Chemische Zusammensetzung der Versuchspellets



## 12.4 Kondensatanalysen

Probencode	Brennstoff	Betriebsstunden	Last	pH Ende der Messung	Elementkonzentration in mg/kg																	
					Al	Ca	Cd	Cl	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Na	Ni	P	Pb	S	Si	Sn	Zn	
<b>Grenzwert</b>					<b>0,05</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>			
071003_K	03B	140	VL	3,6	0,1	85	< 0,0005	51	0,2	0,2	0,1	0,7	16	23	7,7	3,2	< 0,1	< 0,005	97	n.b.	< 0,005	0,2
071009_K	03B	159	TL	5,4	< 0,15	88	< 0,005	24	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,01	8	24	5,5	0,4	< 0,1	< 0,05	51	3,5	0,0	0,1
071030_K	02A	336	VL	2,6	0,1	81	< 0,005	48	1,5	0,2	0,2	7,2	23	22	5,1	1,0	0,1	0,048	133	3,6	0,0	0,3
071203_K	02A	190	VL	2,9	0,2	90	< 0,005	66	1,5	0,1	0,1	6,2	31	25	5,4	3,8	< 0,1	0,045	108	3,7	0,0	0,6
071204_K	02A	228	TL	3,2	< 0,15	87	< 0,005	34	0,5	0,1	0,1	2,3	15	23	5,3	0,7	< 0,1	< 0,05	105	3,6	0,0	0,2
080123_K01	01A	90	VL	5,9	< 0,1	89	< 0,003	38	0,0	0,0	< 0,01	< 0,005	14	26	5,9	1,7	< 0,05	< 0,05	74	3,5	0,0	0,7
080123_K02	01A	210	VL	2,9	0,4	89	< 0,003	57	0,7	0,09	0,09	7,8	24	25	5,8	2,7	0,06	< 0,05	120	3,9	0,0	0,8
080123_K03	01A	330	VL	2,6	0,5	80	< 0,003	74	1,4	0,12	0,12	15,9	31	24	5,4	4,0	0,14	< 0,05	150	3,8	0,0	1,0
080123_K04	01A	443	VL	2,4	0,5	79	< 0,003	85	1,7	0,14	0,14	19,0	37	23	5,4	4,1	0,23	< 0,05	170	4,0	0,0	1,2

Tabelle 28: Chemische Zusammensetzung der Kondensatanalysen

## 12.5 Wirtschaftlichkeitsrechnung

### Kapitalgebundene Kosten

#### Kosten der Heizanlage

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
Nutzungsdauer		20		
Anlagekosten gesamt				
				[€]
8 kW	14.924	10.136		
10-12 kW	14.924	10.136		4.170
20-25 kW	17.353	11.787	17.353	4.849
40-45 kW	17.829	16.496	17.829	5.773
75-80 kW	22.971	22.367	22.971	7.392
Spezifische Anlagekosten [€/kWh]				
8 kW	1.866	1.267		
10-12 kW	1.244	845		348
20-25 kW	694	471	694	194
40-45 kW	396	367	396	128
75-80 kW	<b>287</b>	<b>280</b>	<b>287</b>	<b>92</b>

#### Kosten der Brennstofflagers

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
Schüttdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	600	650	170	
Wassergehalt [%]	8	8	<20	
Heizwert [kWh/kg]	4,4	4,9	4,3	
Energiedichte [kWh/m <sup>3</sup> ]	2.640	3.185	731	
Energiebedarf (kWh/a)				
8 kW	18.286	16.000		
10-12 kW	22.857	20.000		20.000
20-25 kW	45.714	40.000	40.000	40.000
40-45 kW	91.429	80.000	80.000	80.000
75-80 kW	171.429	150.000	150.000	150.000
Benötigter Lagerraum [m <sup>3</sup> ]				
8 kW	9	7		
10-12 kW	11	8		
20-25 kW	23	16	71	
40-45 kW	45	33	142	
75-80 kW	84	61	267	
Benötigter Heizraum [m <sup>3</sup> ]				
8 kW	30	30		
10-12 kW	30	30		30
20-25 kW	30	30	30	30
40-45 kW	30	30	30	30
75-80 kW	30	30	30	30

<b>Nutzungsdauer</b>		30		
<b>Lagerkosten gesamt</b>		[€ 96,-/m³]		
<b>8 kW</b>	3.744	3.507		
<b>10-12 kW</b>	3.961	3.664		4.196
<b>20-25 kW</b>	5.041	4.447	9.709	5.651
<b>40-45 kW</b>	7.202	6.015	16.538	7.887
<b>75-80 kW</b>	10.984	8.758	28.489	12.744
<b>Spezifische Lagerkosten [€/kWh]</b>				
<b>8 kW</b>	468	438		
<b>10-12 kW</b>	330	305		350
<b>20-25 kW</b>	202	178	388	226
<b>40-45 kW</b>	160	134	368	175
<b>75-80 kW</b>	137	109	356	159

### Kosten der Montage und Inbetriebnahme

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nutzungsdauer</b>		20		
<b>Montage-, Inbetriebnahme- und Zubehörkosten</b>		[€]		
8 kW	4.488	2.953		
10-12 kW	4.488	2.953		1.753
20-25 kW	4.588	3.053	4.588	1.853
40-45 kW	4.869	3.220	4.869	1.861
75-80 kW	4.979	3.298	4.979	1.968
<b>Spezifische Montage-, Inbetriebnahme- und Zubehörkosten [€/kWh]</b>				
8 kW	561	369		
10-12 kW	374	246		146
20-25 kW	184	122	184	74
40-45 kW	108	72	108	41
75-80 kW	62	41	62	25

### Verbrauchsgebundene Kosten

#### **Strohpellets**

Die Preise der Strohpellets wurden zur Gänze vom Austrian Bioenergy Center erhoben.

#### **Holzpellets**

Die Preise für die Holzpellets wurden von der Arbeiterkammer Oberösterreich erhoben. Diese führt monatlich eine Erhebung der Pelletspreise und der Abfüllpauschalen von verschiedenen Pelletslieferanten in Oberösterreich durch. Die folgenden Pelletspreise und Abfüllpauschalen beziehen sich auf den Durchschnittswert der Erhebung vom 17.3.2008.

**Waldhackgut**

Der Waldhackgutpreis wurde aufgrund einer telefonischen Anfrage beim Biomasseverband Österreich vom 20.3.2008 erhoben. Der genannte Preis von € 21,- inkl. 10 % Ust. bezieht sich auf Weichholz-Hackgut mit einem Wassergehalt von kleiner <20 %. Pro kg ergibt sich somit ein Preis von rund € 0,059.

**Energie**

Die Energiepreise stammen aus einer Preiserhebung der e-control vom Februar 2008. Hier ergibt sich ein durchschnittlicher Strompreis von 0,1603 €/kWh.

**Heizöl**

Die Preise für Heizöl extra leicht wurden auf Grundlage einer Erhebung der Arbeiterkammer Oberösterreich berechnet. Die Arbeiterkammer erhebt wöchentlich die Heizölpreise sowie die Tankwagenpauschale von 40 oberösterreichischen Heizölanbietern. Aus der Erhebung vom 13.3.2008 wurden Durchschnittspreise errechnet und in den folgenden Berechnungen verwendet.

In folgender Tabelle sind die allgemeinen Daten, welche für die Berechnung der verbrauchsgebundenen Kosten von wesentlicher Bedeutung sind, zusammengefasst.

**Kosten für Hilfsenergie und Bereitschaftsverluste**

Nennleistung	Energieverbrauch bei (1600 Volllaststunden/a)	Strompreis	Stromkosten [€/a]
	[kWh/a]	[€/kWh]	
8 kW	131	0,1603	21
10-12 kW	140	0,1603	22
20-25 kW	134	0,1603	21
40-45 kW	308	0,1603	49
75-80 kW	379	0,1603	61

Nennleistung	Bereitschaftsverluste	Bereitschaftsverluste (1600	Heizwert	Preis	Kosten
	[%]	Volllastsstunden/a)	[kWh/l]	[€/l]	[€/a]
		[kWh/a]			
8 kW	1,3	196	10	0,8126	16
10-12 kW	1,3	240	10	0,8126	20
20-25 kW	1,1	350	10	0,8126	28
40-45 kW	0,8	510	10	0,8126	41
75-80 kW	0,7	880	10	0,8126	72

**Brennstoffkosten**

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Heizwärmebedarf [kWh/a]</b>			
8 kW	12.800			
10-12 kW	16.000			
20-25 kW	32.000			
40-45 kW	64.000			
75-80 kW	120.000			
<b>Jahresnutzungsgrad [%]</b>	70	80	80	80
<b>Nennleistung</b>	<b>Benötigte Energiemenge [kWh/a]</b>			
8 kW	18.286	16.000		
10-12 kW	22.857	20.000		20.000
20-25 kW	45.714	40.000	40.000	40.000
40-45 kW	91.429	80.000	80.000	80.000
75-80 kW	171.429	150.000	150.000	150.000
<b>Heizwert [kWh/kg]</b>	4,4	4,9	4,3	10
<b>Nennleistung [kW]</b>	<b>Benötigte Brennstoffmenge [kg/a bzw. l/a]</b>			
8 kW	4.156	3.265		
10-12 kW	5.195	4.082		2.000
20-25 kW	10.390	8.163	9.302	4.000
40-45 kW	20.779	16.327	18.605	8.000
75-80 kW	38.961	30.612	34.884	15.000
<b>Brennstoff- bzw. Strompreise* [€/kg, €/l, €/kWh]</b>	0,185	0,1791	0,059	0,8126
<b>Nennleistung</b>	<b>Summe der Brennstoffkosten [€/a]</b>			
8 kW	769	585		
10-12 kW	961	731		1.625
20-25 kW	1.922	1.462	549	3.250
40-45 kW	3.844	2.924	1.098	6.501
75-80 kW	7.208	5.483	2.058	12.189

**Betriebsgebundene Kosten**

Heizsystem	SP	HP	WH	HEL
<b>Nennleistung</b>	<b>Zeitbedarf für Wartung [h/a]</b>			
8 kW	5	2		
10-12 kW	5	2		1
20-25 kW	6	3	4	1
40-45 kW	7	4	5	2
75-80 kW	11	6	8	3