

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Fst. 1 Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme

Fst. 2 Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Abteilung Technik für  
Energiesysteme und Erneuerbare Energien

Fst. 3 Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Abteilung Thermosensorik  
und Photovoltaik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **340 ZN**

***Biomasse Vergaser***

(Bewilligungszeitraum: 01. Dezember 2009 - 30. November 2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung

Garching, 20.04.2013

Ort, Datum

Dr.-Ing. Matthias Gaderer

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts Cleanfire wird die emissionsarme Nutzung von Holz im kleinen Leistungsbereich untersucht. Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines autothermen Gegenstrom-Festbettvergaser mit etwa 10 kW thermischer Leistung mit optimierter Brennerkopfeinheit, so dass ein kontinuierlicher und emissionsarmer Betrieb für verschiedene Anwendungsbereiche möglich ist. Der Brennerkopf, der direkt am Vergaser sitzt, wurde als Porenbrenner ausgeführt und das Holzgas ohne vorherigen Reinigungsschritt verbrannt. Ziel hierbei ist eine möglichst CO- und staubarme Verbrennung des Gases und der Teere, um den Brenner als Wärmequelle für verschiedene Wärmeübertrager zu nutzen. Die technischen Ziele des Forschungsvorhabens gliedern sich in die folgenden fünf Arbeitspakete:

**Arbeitspaket Vergaserversuchsstand:** Ein Gegenstrom-Festbettvergaser mit maximal 10 kW Leistung wurde konstruiert und bezüglich der Betriebssicherheit optimiert. Dazu wurde die Möglichkeit der Einbindung eines Startbrennstoffes implementiert. Außerdem wurde die Brennstoffzufuhr mit der Primär- und Sekundärluft abgestimmt, um einen konstanten Vergasungs- und Verbrennungsbetrieb zu ermöglichen.

**Arbeitspaket Brennertechnik:** Am Austritt des Vergasers soll das Holzgas mit den darin enthaltenen Teeren in einem Brenner gecrackt und oxidiert werden. Im Rahmen des Projekts wird die Verbrennung durch Einsatz von Porenbrennern untersucht. Im Fokus stehen Asche- und Teerablagerungen an den Poren, Abgaszusammensetzung, Staub und Beständigkeit der Porenmodule.

**Arbeitspaket Emissionen:** Zur Beurteilung der Emissionen werden gasförmige (CO, NO<sub>x</sub>) und feste Emissionen (Feinstaub) erfasst. Durch Entnahmesonden wird das Abgas den Messgeräten zugeleitet. Ziel ist es, die Vergasungs- und Verbrennungsführung so zu gestalten, dass minimale Emissionen entstehen.

**Arbeitspaket Potentialstudie:** Mit der Potentialstudie wurde das technische und wirtschaftliche Einsatzpotential von Mikro-KWK-Systemen untersucht. Die Leistungen der untersuchten Systeme reichen von wenigen Kilowatt bis 500 kW.

Diese Studie soll zeigen inwiefern diese Technik in dezentralen Systemen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sinnvoll und wirtschaftlich einsetzbar ist. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Gebäude mit Heizwärmebedarf im Winter und Kühlbedarf im Sommer wie Gaststätten, Hotels, Bürogebäude, Verwaltungseinrichtungen sowie landwirtschaftliche Einrichtungen mit Kühlbedarf (Gemüse, Obst, Viehzucht).

**Arbeitspaket Simulation:** Das fünfte Arbeitspaket soll die vier anderen Arbeitspakete unterstützen. Die Brennerentwicklung soll durch CFD Simulationen begleitet werden, die Potentialstudie durch Kreislaufsimulationen von KWK-Anlagen.

## Ergebnisse

Im Biomasseteknikum des Lehrstuhls für Energiesysteme der Technischen Universität München wurde ein autothermer Festbett Gegenstromvergaser mit angeschlossenen Porenbrenner errichtet. Die Versuchsanlage kann sowohl Holzpellet als auch Erdgas als Brennstoff verwenden und besitzt je nach Brennstoff etwa 10 kW Leistung. Die Holzpellets werden in den Vergaser dosiert, das Erdgas wird direkt in den Brenner eingeströmt. Die Funktionen des Erdgases sind die Vorheizung des Brenners und die Unterstützung der Verbrennung beim Starten oder Abschalten des Vergasers oder bei schlechter Holzgasproduktion. Für die Vergaser Brennerkombination sind drei Betriebsmodi vorgesehen:

**Betriebsmodus 1 - alleiniger Vergaserbetrieb:** Dieser Betriebsmodus dient dazu, das Verhalten der Versuchsanlage kennen zu lernen und Fehler zu entdecken ohne dabei die Komponenten des Brenners zu gefährden. Das dabei entstehende Holzgas wird mit einer Waschflasche von Teerbestandteilen gereinigt und über eine Fackel nach außen geführt.

**Der Betriebsmodus 2 - alleiniger Brennerbetrieb:** Dieser dient dazu, das Porenbrennerkonzept mit Erdgas auf die Funktionalität zu testen und die zuvor berechneten Druckverluste zu verifizieren. Des Weiteren können Leistungsgrenzen des Brenners bestimmt werden.

**Betriebsmodus 3 - Vergaser und Brennerbetrieb:** Bei diesem werden Vergaser und Brenner miteinander verbunden um das Cleanfire-Konzept zu testen und das Zusammenspiel von Vergaser und Brenner zu untersuchen. Die Steuerung und Regelung der Versuchsanlage erfolgt über eine selbst programmierte Steuerung (SPS). Die Programmierung und der Zusammenbau des Schaltschranks erfolgten durch den Lehrstuhl für Energiesysteme.

Der Porenbrenner besteht aus einer Flammensperre, aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), die als Lochplatte unterschiedlicher Stärke ausgeführt ist, und einem Keramikschaum aus Siliziumkarbid SiC. Der Brenner besitzt einen Durchmesser von 60 mm und eine Höhe/Länge von ebenfalls 60 mm. Die Verbrennungsreaktion findet dabei flammenlos innerhalb des porösen Mediums statt. Der Vorteil dieses Konzepts besteht in einer schadstoffarmen und homogenen Verbrennung. Durch den Festkörper in der Reaktionszone ist ein schneller Wärmerücktransport entgegen der Strömungsrichtung und damit eine gute Vorheizung des Verbrennungsgases möglich. Dadurch können Schwachgase verbrannt werden.

Vorversuche mit SiC Schäumen, die in die Oxidationszone eines Pelletkessels eingebracht wurden, zeigten starke Degenerationserscheinungen. Ursache war ein Zusammenspiel aus Oxidation und Sauerstoffdiffusion, die durch Alkalien begünstigt wurde. Deshalb unterscheiden sich die Schäume für den Porenbrenner geringfügig. Silizium infiltrierte SiC-Keramiken weisen gegenüber einfachen SiC-Keramiken den Vorteil auf, dass die Risse, die bei der Sinterung der Keramiken entstehen, durch Silizium geschlossen werden. Eine zweite Maßnahme zur Erhöhung der Langzeitstabilität ergibt sich aus dem Prozess: Die Vergasung im Gegenstrom reduziert im Vergleich zur Oxidationszone eines Pelletkessels die Alkalienkonzentration im Holzgas. Beides zusammen soll zu einer Erhöhung der Lebensdauer der Porenschäume führen.

Erste Versuche des Brenners mit Erdgas zeigten die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Brennerauslegung. Die Flammensperre verhinderte zuverlässig einen Flammenrückschlag,

jedoch der Wärmerücktransport war höher, als in der Auslegung berechnet. Dadurch war eine zusätzliche Vorheizung des Holzgases notwendig, um eine Teerkondensation an der Flammensperre zu verhindern. Die gemessenen Druckverluste im Erdgasbetrieb stimmen gut mit den Druckverlusten der CFD-Simulationen überein und waren im erwarteten Bereich. Die Temperaturen wichen bei der Simulation um etwa 30% nach oben ab.

Bei Versuchen mit Holzgas konnte ebenfalls ein stabiler Brennerbetrieb über einen längeren Zeitraum erreicht werden. Die Druckverluste bewegten sich zunächst im berechneten Bereich, stiegen aber später langsam immer mehr an, was auf Teerablagerungen in der Flammensperre hinwies. Bei den Emissionsmessungen zeigte sich hingegen ein sehr positives Ergebnis. Die CO-Konzentrationen bewegten sich bei stabilem Betrieb mit Erdgas und Holzgas im einstelligen ppm Bereich. Auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen waren mit nur 25 ppm sehr gering. Die Feinstaubwerte wurden mit einem Planfilter und mit einem Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) gemessen. Beide Messungen zeigten übereinstimmend sehr geringe Staubkonzentrationen, die den Stand der Technik übertreffen. Bei der gravimetrischen Bestimmung mit Planfilter und Holzgas/Erdgas Mischbetrieb wurde z. B. eine Staubkonzentration von nur 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> bei 13% Restsauerstoff ermittelt.

Für die Potentialstudie wurde zunächst der Heizungsmarkt in Deutschland, Österreich und der Schweiz analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass nur in Österreich Holzkessel einen signifikanten Anteil am Heizungsmarkt einnehmen, während diese in Deutschland und der Schweiz nur ein Nischendasein führen. In allen drei Ländern ist jedoch eine starke Überalterung großer Teile der Gebäudeheizungen vorhanden, die in absehbarer Zeit erneuert werden müssen. Dies bedingt auf den ersten Blick einen großen potentiellen Abnehmerkreis für Mikro-KWK-Anlagen. Bei näherer Betrachtung ergeben sich dabei allerdings verschiedene Einschränkungen.

Zum einen sind nicht alle Gebäude für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen geeignet, da die Wärme- und Strombedarfsstruktur einen Einsatz von KWK nicht sinnvoll zulässt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine Mindestzahl von Betriebsstunden sowie ein ausreichender Selbstnutzungsanteil für Strom erforderlich. Auch muss die Anzahl der Start- und Abschaltvorgänge möglichst reduziert werden, um bei biomassebefeuerten Mikro-KWK-Anlagen einen optimierten Verbrennungsprozess zu erreichen. Für den Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen ist somit ein Wärmespeicher erforderlich. Mögliche Gebäudetypen, die diese Anforderungen erfüllen, sind unsanierte Ein- oder Zweifamilienhäuser mit entsprechend hohem Wärmebedarf, Gebäude mit mehreren Wohneinheiten sowie kleinere Gewerbebetriebe, die neben Strom auch Wärme benötigen. Nicht geeignet sind neue Einfamilienhäuser mit niedrigem Wärmebedarf.

Kleine Heizkraftwerke bis 500 kW<sub>th</sub> lohnen sich schon bei heutigen Strompreisen wirtschaftlich fast immer im Vergleich zu fossil befeuerten Systemen, da die höheren Investitionskosten aufgrund der hohen Vollbenutzungsstunden einen geringeren Einfluss auf den Wärme- und Stromgestehungskosten haben. Bei steigenden Preisen für Holzbrennstoffe würde die Wirtschaftlichkeit abnehmen. Zusammenfassend sind Mikro-KWK-Systeme für Wohngebäude ökologisch sinnvoll aber wirtschaftlich nur bei ausreichend hohem Wärmebedarf und bei zusätzlichen Vergütungen nach KWKG oder EEG darstellbar. Kleine Heizkraftwerke bis

500 kW<sub>th</sub> sind bei den gegenwärtigen Energiepreisen in der Regel wirtschaftlicher als fossile Varianten.

Die wesentlichen Projektziele wurden erreicht

## Autoren

### **Forschungsstelle 1 (Fst. 1)**

**Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme**

Boltzmannstraße 15, 85747 Garching

Markus Fischnaller

Matthias Gaderer

Hartmut Spliethoff

### **Forschungsstelle 2 (Fst. 2)**

**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. – ZAE Bayern**

**Abteilung 1: Technik für Energiesysteme und Erneuerbare Energien**

Walther Meißner Straße 6, 85748 Garching

Jens Kuckelkorn

Robert Kunde

Florian Volz

### **Forschungsstelle 3 (Fst.3)**

**Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. – ZAE Bayern**

**Abteilung 3: Thermosensorik und Photovoltaik**

Haberstraße 2a, 91058 Erlangen

Edda Stern

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 340 ZN der Forschungsvereinigung Deutsche Vereinigung für Verbrennungsforschung e. V. – DVV, Leimkugelstr. 10, 45141 Essen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	I
Autoren .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VII
1 Einleitung .....	1
1.1 Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen.....	3
1.2 Stromerzeugung in kleiner Leistung .....	4
1.3 Arbeitspakete .....	4
2 Versuchsstand .....	6
2.1 Vergasertechnik .....	6
2.2 Brennertechnik.....	8
2.2.1 Herstellung von SiC Schäumen.....	10
2.2.2 Vorversuche mit SiC Schäumen.....	12
2.2.3 Brennerentwicklung .....	14
2.2.4 Simulation des Porenbrenners .....	17
2.3 Vergaserversuchsstand.....	19
3 Experimente .....	23
3.1 Alleiniger Vergasungsbetrieb.....	23
3.2 Brennerbetrieb mit Erdgas .....	24
3.3 Brennerbetrieb mit Holzgas.....	27
3.4 Partikelmesstechnik .....	31
3.4.1 Elektrischer Niederdruckimpaktor ELPI.....	32
3.4.2 Probennahme und Aerosolverdünnung.....	34
3.4.3 Planfilterkopfgerät.....	34
3.5 Staubmessungen .....	36
4 Potentialstudie .....	41
5 Zusammenfassung und Ausblick .....	45
6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	48
7 Literaturverzeichnis .....	49



## 1 Einleitung

Bei der thermischen Nutzung fester Biomasse (Holzhackschnitzel, Holzpellets) im Leistungsbereich von 10 kW<sub>th</sub> bis 500 kW<sub>th</sub> dominieren konventionelle Verbrennungstechniken. Die Verbrennung wird überwiegend mit Rost- und Unterschubfeuerungen durchgeführt. Aufgrund steigender Anforderungen bei den Emissionswerten für Feinstaub und unverbrannte gasförmige Anteile (CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) sind Hersteller von Biomasse-Kleinanlagen verstärkt bei der Weiterentwicklung ihrer Technik gefordert. Ziele sind eine verbesserte Effizienz und verringerte Emissionen.

Insbesondere die Senkung der CO- und Feinstaubemissionen im Abgas sowie die Stromerzeugung mit fester Biomasse im kleinen Leistungsbereich von wenigen kW<sub>el</sub> bis etwa 100 kW<sub>el</sub> sind für Hersteller kleinerer Kesselanlagen von Bedeutung.

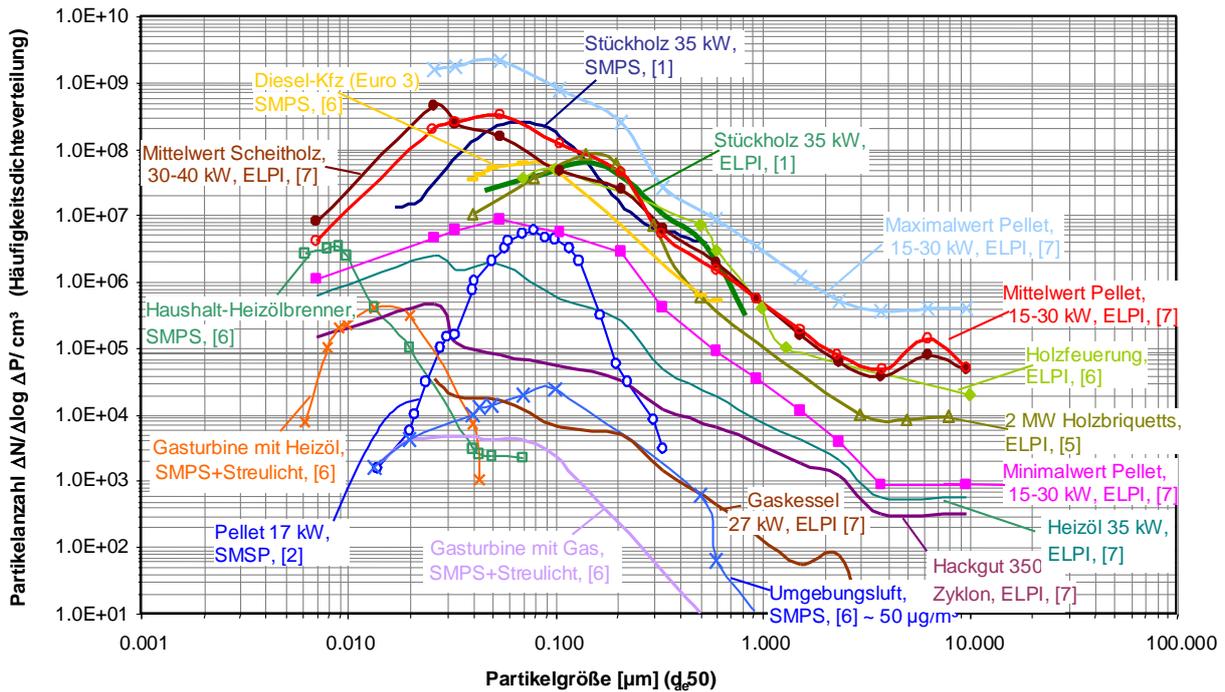
Auf Basis erster Arbeiten am Lehrstuhl für Energiesysteme der Technischen Universität München und am Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V., beides Forschungseinrichtungen in Garching bei München, soll ein autothermer Gegenstrom-Festbettvergaser für etwa 10 kW Brennstoffleistung mit integriertem Porenbrenner entwickelt und optimiert werden, sodass ein kontinuierlicher und emissionsarmer Brennerbetrieb für die Wärmeerzeugung und für eine Stromerzeugung aus fester Biomasse ermöglicht wird. Mit dieser Entwicklung soll gezeigt werden, dass mit den primären Maßnahmen bei der Verbrennungsführung geringe Emissionen und eine effiziente Stromerzeugung möglich sind.

Bei der konventionellen Biomasseverbrennung entstehen aufgrund der enthaltenen Alkalien im Brennstoff Partikel im Bereich von 0,01 bis 10 µm, die mit dem Abgas an die Umgebung freigesetzt werden. Diese Partikel tragen zur Feinstaubbelastung bei. Messungen am ZAE Bayern (Kunde, 2007) haben bestätigt, dass bei kleinen Holzfeuerungen 90% der gemessenen Partikel einen aerodynamischen Durchmesser von <10 µm (PM 10) aufweisen und etwa 70% – 80 % zu den Partikeln mit <2,5 µm (PM 2,5) zählen. Ein Großteil der Partikel besitzt sogar einen aerodynamischen Partikeldurchmesser von etwa 0,05 bis 1,0 µm (PM 1) (Abbildung 1). Genau dieser Größenbereich ist für den Menschen als besonders kritisch zu betrachten, da diese Partikel bis in die Lungenbläschen gelangen können (Abbildung 2).

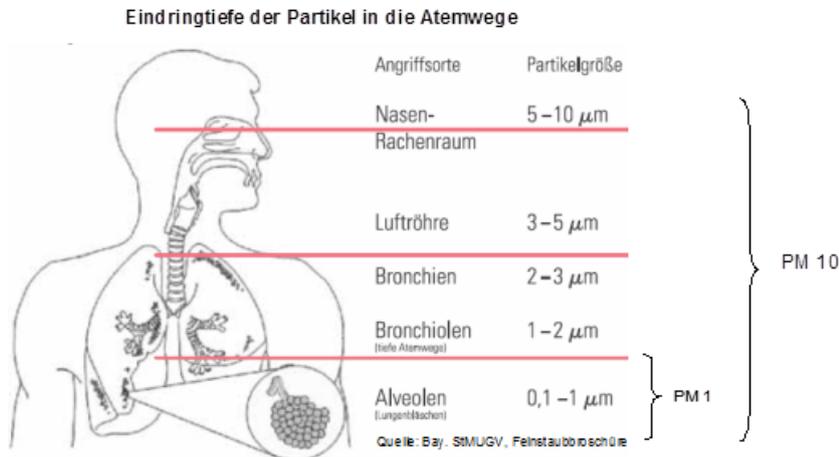
Unter diesem Hintergrund sind in verschiedenen europäischen Ländern Verschärfungen bei den Emissionsgrenzwerten kleinerer Feuerungsanlagen angedacht. Mit der Novellierung der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) 2010 werden die Grenzwerte für CO- und Staubemissionen für kleinere Biomassefeuerungen stufenweise reduziert. Ähnlich konkrete Ansätze gibt es in anderen europäischen Ländern, vor allem in der Schweiz, Österreich und den neuen osteuropäischen EU-Ländern.

Im Jahr 2014 tritt die zweite Stufe der Verordnung in Kraft, was für Biomassekessel Grenzwerte für Staub von 20 mg/Nm<sup>3</sup> und für CO von 200 mg/Nm<sup>3</sup> bedeutet. Nach dem derzeitigen Stand der Technik ist es für viele Hersteller von konventionellen Biomassefeuerungen ohne deutliche Verbesserung der Verbrennungsführung oder dem Einsatz von Filteranlagen (z. B. kleine Elektrofilter) nicht möglich, die Werte für Staub im realen Betrieb einzuhalten.

Feinstaubemissionen im Vergleich



**Abbildung 1:** Partikelgrößen-Anzahlverteilung der Feinstaubemissionen bei Holzfeuerungen. Nr. 1 bis 6 Literaturdaten, Nr. 7 eigene Messungen (Kunde, 2007), (Kunde, 2007a), (Gaderer 2008).



**Abbildung 2:** Eindringtiefe der Partikel in die Atemwege (StMUGV, 2006).

Im Leistungsbereich bis etwa 100 kW<sub>el</sub> ist es bisher nicht gelungen, Techniken zur Stromerzeugung aus fester Biomasse effizient und erfolgreich einzusetzen. Verschiedene Projekte auf Basis von z. B. Stirlingmotoren oder indirekt befeuerten Heißluftturbinen konnten bis jetzt nicht überzeugen. Eine Ursache dafür ist vor allem die Ablagerung von Staub- und Aschepartikeln auf den Wärmeübertragerflächen. Diese Ablagerungen reduzieren den Wärmeübergang und verursachen Korrosion an den Wärmeübertragern. Auf der Sekundärseite der Stromerzeugung sind jedoch aus thermodynamischen Gründen hohe Temperaturen im Arbeitsmedium erforderlich, sodass durch Ablagerungen der elektrische Wirkungsgrad stark reduziert wird.

## 1.1 Feinstaubemissionen aus Biomassefeuerungen

Die Bestimmung von Partikelemissionen aus einer Biomassefeuerung ist eine sehr komplexe Aufgabe. Die Interpretation der Messergebnisse erfordert vom Anwender theoretische und praktische Kenntnisse. Außerdem spielt bei der Partikelmessung der Aufbau des Probenahmestranges eine wichtige Rolle.

Aerosolpartikel können durch verschiedene physikalische Eigenschaften charakterisiert werden, z. B. ihrer Größe, Anzahl, Masse, Dichte, Größe der Oberfläche und Morphologie (Form, Gestalt). Nach den gängigen Modellen setzen sich Partikel aus Verbrennungsprozessen zumeist aus einem festen Kern und einer Adsorbatschicht aus organischen und anorganischen Verbindungen zusammen. Der Kern besteht aus unverbranntem Kohlenstoff und/oder Aschebestandteilen (überwiegend Salze und Metalloxide). Die chemischen Eigenschaften von Partikeln werden durch Elementaranalyse oder der Bestimmung der chemischen Verbindungen bestimmt.

Es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen Partikelanzahlkonzentration und Partikelmasse. Umrechnungen in andere Partikelgrößenmaße sind nur in Ausnahmefällen und mit Hilfe zusätzlicher Informationen über weitere Eigenschaften, wie z. B. Dichte und Formfaktoren, möglich.

Da Partikel nicht kugelförmig sind, beschreibt man die Größe mit einem sogenannten Äquivalentdurchmesser. Dabei bezieht man sich auf eine Eigenschaft eines regelmäßig geformten Partikels und vergleicht diese mit dem unregelmäßig geformten Partikel. In der Aerosoltechnik sind zwei Äquivalentdurchmesser gebräuchlich:

- Der Mobilitätsdurchmesser  $d_b$  eines unregelmäßig geformten Partikels entspricht dem Durchmesser eines kugelförmigen Teilchens, das die gleiche Beweglichkeit (Mobilität) beispielsweise in einem elektrischen Feld aufweist.
- Der aerodynamische Durchmesser  $d_a$  eines gasgetragenen Partikels entspricht dem Durchmesser eines kugelförmigen Teilchens mit der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$ , der die gleiche Sinkgeschwindigkeit hat wie der Partikel selbst.

Der größte Teil der Abgaspartikel aus automatischen Holzfeuerungen sind Salze, welche hauptsächlich gasförmigen Vorläufersubstanzen in der Abkühlphase des heißen Gases durch die Phänomene Nukleation, Koagulation und Kondensation entstehen. Der größte Teil dieser Salze wiederum sind Kaliumverbindungen, wobei der Kaliumanteil der Partikel typischerweise bei etwa 30 Massen - % liegt. Die Partikelmasse hängt in erster Linie davon ab, wie viele Salz-Vorläufersubstanzen (insbesondere Kalium und Kalzium, welche als positiv geladene Ionen wirken) in der Brennkammer entstehen, wogegen die Partikelanzahl vor allem durch die Bedingungen bei der Abkühlung bestimmt wird. Die Partikelmasse wird also hauptsächlich durch die thermo-chemischen Prozesse im Glutbett bestimmt. Im Gegensatz dazu wird die Partikelanzahl vor allem durch den Gesamtluftüberschuß bzw. das zur Verfügung stehende Abgasvolumen beeinflusst. Vom Staub, der bei der Verbrennung von Biomasse entsteht, bestehen die submikronen Partikel ( $1 \mu\text{m}$ ) hauptsächlich aus Salzen von K, Na, Mg, S, Cl und Schwermetallen wie Zn und Pb. Der Grobstaub dagegen setzt sich aus schwer schmelzbaren Verbindungen der Elemente Ca, Si, Mg und Al zusammen. Die kleinsten Teilchen haben die Form von Kugeln oder Kristallen und deren Bruchstücken. Dagegen

sind die groben Flugaschepartikel unregelmäßig oder zusammengesetzt aus Bruchstücken, auf welchen kleinere Partikel agglomerieren. Dieser Unterschied zwischen der groben und der feinen Fraktion ist auf die verschiedenen Bildungsmechanismen zurückzuführen (Oser, 2003).

## 1.2 Stromerzeugung in kleiner Leistung

Seit inzwischen fast 20 Jahren wird an der Entwicklung von Mikro-KWK-Anlagen zur dezentralen Strom- und Wärmebereitstellung aus Biomasse gearbeitet. Unter der Bezeichnung Mikro-KWK-Systeme werden KWK-Systeme im unteren Kilowattbereich verstanden. Die Bezeichnung allerdings ist nicht einheitlich geregelt, so dass sich auch die Bezeichnungen Klein, Kleinst und Mini gebräuchlich sind und sich auch auf unterschiedliche Leistungsgrößen (z. B. unterscheidet das BM für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit hier zwischen allen vier Bezeichnungen) beziehen können. Die dabei betrachteten Leistungen reichen von 1 kW<sub>el</sub> bis 15 kW<sub>el</sub>.

Forschung und Entwicklung kleiner Biomasse-KWK-Systeme werden vor allem von kleineren und mittleren Unternehmen durchgeführt. Aktuelle praxisbezogene Arbeiten mit realisierten Prototypen kommen beispielsweise von Mawera (Oberberger, 2003) mit einem Stirlingmotor mit 35 kW<sub>el</sub> Leistung, von der Firma Talbott's mit etwa 60kW<sub>el</sub> bis 100 kW<sub>el</sub> mit indirekt befeuerter Gasturbine sowie der Firma Sunmachine und KWB (Fischnaller, 2011) mit 1 kW<sub>el</sub> bis 3 kW<sub>el</sub> Pellet-Stirlingmotor. Kleine Organic-Rankine-Cycle Anlagen (ORC) wurden bisher vor allem zur Biogas-BHKW-Abwärmenutzung von einigen Herstellern entwickelt (20 kW<sub>el</sub> bis 100 kW<sub>el</sub>). Verwendet werden Schraubenexpander oder einstufige Turbinen. In Verbindung mit fester Biomasse sind im Leistungsbereich <100 kW<sub>el</sub> vor allem aus Kostengründen bisher keine realisierten ORC-Anlagen bekannt.

Alle oben genannten Projekte basieren in der Regel auf Unterschub- oder Rostfeuerungen für Holz. Daraus ergeben sich für die Systeme Probleme, ausreichend hohe Temperaturen im Arbeitsmedium zu erreichen. Die Ablagerungen von Partikeln an den Wärmeübertragerflächen reduzieren den Wärmeübergang und verursachen Korrosion. Rost- und Unterschubfeuerungen haben sich bis jetzt zur Stromerzeugung bei kleiner Leistung daher nicht ausreichend bewährt.

## 1.3 Arbeitspakete

**Arbeitspaket Vergasersversuchsstand:** Ein Versuchsstand sowie ein Gegenstrom-Festbettvergaser mit maximal 10 kW Leistung wurde geplant, gebaut und bezüglich der Betriebssicherheit optimiert. Weiterhin wurde die Möglichkeit der Einbindung eines Startbrennstoffes installiert, außerdem wurde die Brennstoffzufuhr mit der Primär- und Sekundärluft abgestimmt, um einen konstanten Vergasungs- und Verbrennungsbetrieb zu ermöglichen.

**Arbeitspaket Brennertechnik:** Am Austritt des Vergasers soll das Holzgas mit den darin enthaltenen Teeren in einem Brenner gecrackt und oxidiert werden. Im Rahmen des Projekts wird die Verbrennung durch Einsatz von Porenbrennern untersucht. Im Fokus stehen Asche- und Teerablagerungen an den Poren, Abgaszusammensetzung, Staub und Beständigkeit der Porenmodule.

**Arbeitspaket Emissionen:** Zur Beurteilung der Emissionen werden gasförmige (CO, NO<sub>x</sub>) und feste Emissionen (Feinstaub) erfasst. Durch Entnahmesonden wird das Abgas den Messgeräten zugeleitet. Ziel ist es, die Vergasungs- und Verbrennungsführung so zu gestalten, dass minimale Emissionen entstehen.

**Arbeitspaket Potentialstudie:** Mit der Potentialstudie soll das technische und wirtschaftliche Einsatzpotential von Mikro-KWK-Systemen untersucht werden. Die Leistungen der untersuchten Systeme sollen von wenigen Kilowatt bis 500 kW reichen.

Diese Studie soll zeigen, inwiefern diese Technik in dezentralen Systemen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung sinnvoll und wirtschaftlich einsetzbar ist. Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Gebäude mit Heizwärmebedarf im Winter und Kühlbedarf im Sommer wie Gaststätten, Hotels, Bürogebäude, Verwaltungseinrichtungen und landwirtschaftliche Einrichtungen mit Kühlbedarf (Gemüse, Obst, Viehzucht).

**Arbeitspaket Simulation:** Das fünfte Arbeitspaket soll die vier anderen Arbeitspakete unterstützen. Die Brennerentwicklung soll durch CFD Simulationen begleitet werden, die Potentialstudie durch Kreislaufsimulationen von KWK-Anlagen.

## 2 Versuchsstand

Das Hauptziel des Cleanfire Projektes besteht darin, die Energie in der Biomasse für die Wärme- und Stromerzeugung möglichst schadstoffarm zu nutzen. Um dieses Ziel zu erreichen wird der Verbrennungsprozess in zwei Teilprozesse aufgespalten. Zum einen in die Vergasung, um eine möglichst geringe Staubkonzentration zu erreichen und zum anderen in die Verbrennung, um die Wärme für Heizzwecke oder die Stromproduktion zu gewinnen. Dieses Kapitel beschreibt den Versuchsaufbau, um dies zu erreichen.

### 2.1 Vergasertechnik

Arbeitspaket 1: Vergaserversuchsstand

Durchgeführt von Fst. 1, 2

Vergasung von Biomasse bedeutet die Überführung eines festen Stoffes, wie Holz oder Stroh, in einen gasförmigen Zustand. Dieses Gas kann dann in weiteren Prozessen genutzt werden. Dieser Prozess benötigt Energie und ein Vergasungsmittel. Man spricht man von autothermer Vergasung, wenn die Energie, um den Prozess aufrecht zu erhalten, aus dem Brennstoff selbst freigesetzt wird, und von allothermer Reformierung, wenn die Energie von außen zugeführt wird. Eine allotherme Reformierung ist technologisch aufwändiger und eignet sich nicht für den kleinen Leistungsbereich. Als Vergasungsmittel können Dampf (z. B. bei allothermer Reformierung) oder Luft bzw. Sauerstoff bei der autothermen Vergasung verwendet werden.

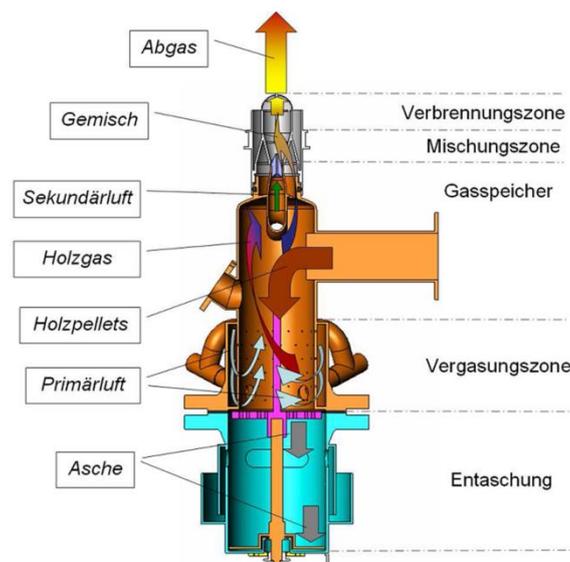
Bei der thermochemischen Umwandlung von Brennstoffen können verschiedene Schritte unterschieden werden. Zunächst wird der Brennstoff aufgeheizt und getrocknet, anschließend beginnt bei höheren Temperaturen (ab ca. 150 °C) die pyrolytische Zersetzung des Brennstoffes. Es schließt sich dann bei Temperaturen ab 500 °C die eigentliche Vergasung an. Bei autothermer Vergasung wird die dazu benötigte Energie durch eine Teilverbrennung des Brennstoffes erreicht.

Die Einteilung der Vergasertypen kann nach Reaktortyp, Wärmebereitstellung oder Vergasungsmittel erfolgen. Bei der Unterteilung nach Reaktortyp kann zwischen Flugstromvergäsern, Wirbelschichtvergäsern (stationär und zirkulierend), sowie Festbettvergäsern (Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom) unterschieden werden. Flugstrom und Wirbelschichtvergäser bedingen einen höheren technischen Aufwand und sind somit nicht für den kleinen Leistungsbereich geeignet.

Die Einteilung der Festbettvergäser erfolgt nach der relativen Bewegung des Brennstoff und des Gasstromes zueinander. Gleichstromvergasung bedeutet, dass der Brennstoff und das Gas bzw. die Oxidationsluft sich in dieselbe Richtung bewegen. Der Vorteile dieses Konzepts bestehen in einem niedrigen Gehalt an kondensierbaren Bestandteilen. Die Nachteile sind allerdings eine hohe Staubfracht und ein geringerer Kaltgaswirkungsgrad im Vergleich zur Gegenstromvergasung. Bei der Gegenstromvergasung bewegen sich das Gas und der Brennstoff in entgegengesetzte Richtungen. Die Vorteile sind ein geringer Partikelgehalt und

ein höherer Kaltgaswirkungsgrad gegenüber dem Gleichstromvergaser. Der größte Nachteil hingegen ist der hohe Anteil an kondensierbaren Bestandteilen.

Die geringe Partikelbelastung war bei diesem Vergleich der ausschlaggebende Punkt für die Entscheidung das Gegenstromprinzip zu verwenden. Der geringe Staubanteil wird dadurch erreicht, dass das Gas, das sich in der Oxidations- und Reduktionszone (unterste Schichten des Vergasers) bildet, durch die darüber liegende Brennstoffschicht gefiltert und zum anderen gekühlt wird, was zum Rekondensieren von Alkalimetallen führt, die hauptverantwortlich für die Feinstaubbildung sind. Dies bedeutet, dass für eine niedrige Staubkonzentration eine Mindestschütthöhe gegeben sein muss. Diese Überlegungen führten zur Konstruktion eines ersten Versuchsvergaser mit einem Oberflächenbrenner, der den Ausgangspunkt für das Cleanfire Projekt bildet. Diese erste Versuchsanlage war nur gering automatisiert, was einen kontinuierlichen Versuchsbetrieb schwierig machte. Erste Versuche zeigen, dass eine saubere Verbrennung ohne Filtertechnik möglich scheint. Allerdings besitzt diese erste Versuchsanlage noch Nachteile, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Dies machte eine Neukonstruktion des Vergasers für das Cleanfire Projekt notwendig. Der erste Versuchstand ist Abbildung 3 zu sehen.

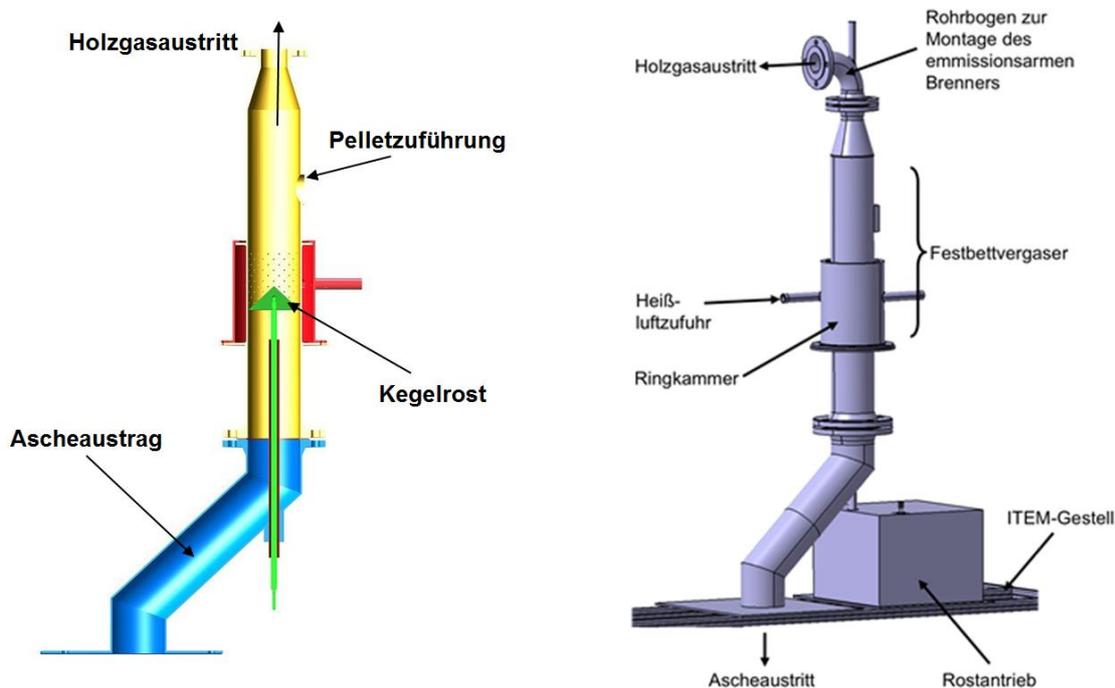


**Abbildung 3:** Cleanfire Vergaser, erste Versuchsanlage.

Abbildung 4 zeigt den neuen Cleanfire Vergaser. Der Durchmesser der Reaktionskammer beträgt 100 mm. Wie schon bei der ersten Versuchsanlage, wird die Vergasungsluft seitlich zugeführt. Der Drehrost aus Lochblech wurde durch einen kegelförmigen Rost ersetzt. Dieser besitzt einen ein Millimeter großen Spalt am Rand, der als Ascheaustrag dient. Diese Maßnahme soll den Brennstoffausbrand erhöhen. Der Rost ist drehbar gelagert und kann in der Höhe verstellt werden. Des Weiteren wurden die Flanschverbindungen in größerer Entfernung zur Reaktionszone angebracht, um die thermische Trägheit des Systems zu reduzieren. Zur Erhöhung der Brennstoffschüttung wurde die seitliche Brennstoffzuführung in größerem Abstand vom Rost angebracht. Außerdem kann die Schnecke nun mittels eines Frequenzumrichters mit verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben werden und so die

Leistung regeln. Zuvor war dies nur durch eine Taktung möglich, was ungenauer ist als eine kontinuierliche Förderung.

Innerhalb des Vergasers befinden sich in regelmäßigen Abständen Temperatursensoren, die den Temperaturverlauf über der Vergaserhöhe messen. Zusätzlich wird auch der Druck im Vergaser erfasst, um durch Regelung die Vergasung bei atmosphärischem Druck betreiben zu können. Alle Messdaten werden von einer SPS erfasst und werden sowohl zur Regelung als auch für Sicherheitseinrichtungen genutzt. Auch die Brennstoffschnecke und der Rostantrieb werden über die SPS angesteuert. Die Primärluft wird über Massenstromregler geregelt. Die Primärluft dient auch zur Vorheizung des Vergasungsraumes. Die Temperatur der Primärluft wird über einen Luftherhitzer auf Temperaturen zwischen 20 °C und 500 °C eingestellt. Der gesamte Vergaser ist in ein Gestell aus Item-Profilen integriert.



**Abbildung 4:** Cleanfire Vergaser, zweite Versuchsanlage.

## 2.2 Brennertechnik

Arbeitspaket 2: Brennertechnik

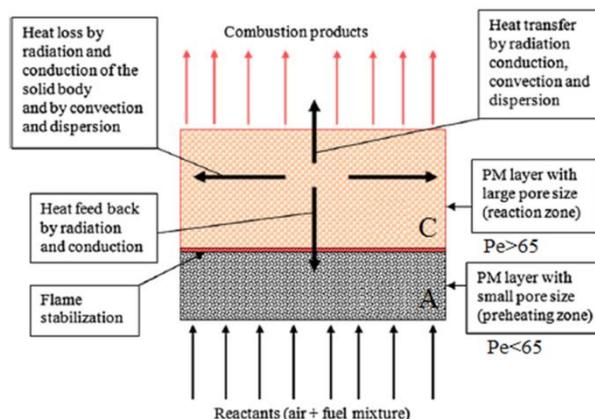
Durchgeführt von Fst. 1, 2, 3

Für die Verbrennung des Holzgases wurde das Konzept der Porenbrennertechnologie gewählt, bei dem sich die Flamme nicht frei im Raum ausbreiten kann, sondern die Reaktion innerhalb eines porösen Mediums stattfindet. Durch die bessere Wärmeleitfähigkeit und die besseren Strahlungseigenschaften des Festkörpers gegenüber Gasen stellen sich positive Effekte, wie homogenere Temperaturprofile und geringere Spitzentemperaturen aufgrund des erhöhten Wärmeabtransports aus der Reaktionszone ein. Dies begünstigt eine Verbrennung mit geringer Gefahr der thermischen Bildung von Stickoxiden. Auch ist eine gute Anbindung von Wärmeübertragern, die auch als Strahlungswärmeübertrager ausgeführt sein können, durch diese Technik möglich. Zudem werden die Verbrennungsprodukte durch den

Wärmerücktransport im porösen Medium vorgeheizt, was dem Brenner ermöglicht, Schwachgase zum Beispiel aus einer autothermen Vergasung stabil umzusetzen.

Das Porenmedium kann aus einer Kugelschüttung, einem Gestrück oder aus einem Schaum bestehen. Dabei muss das Material für hohe Temperaturen und eine reaktive Atmosphäre sowie hohe Temperaturgradienten geeignet sein. An metallischen Werkstoffen eignen sich Nickel-Basis- bzw. Fe-Cr-Al-Legierungen, die aber eine begrenzte Anwendungstemperatur aufweisen. Deshalb werden zumeist keramische Werkstoffe wie Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Siliziumcarbid (SiC) oder Zirkoniumoxid ( $\text{ZrO}_2$ ) verwendet.

Für den Betrieb eines Porenbrenners sind zwei Merkmale ausschlaggebend: Zum einen die Wahl des porösen Mediums und zum anderen der Mechanismus zur Stabilisierung der Verbrennung. Für Vormischbrenner, wie beim Cleanfire Projekt eingesetzt, gibt es vier Stabilisierungsmechanismen: Geschwindigkeitsstabilisiert, Stabilisierung durch aktive Kühlung, strahlungsstabilisiert und Pécletzahl-Stabilisierung. Am häufigsten findet die Pécletzahl-Stabilisierung Anwendung. Sie beruht auf der Kombination zweier Schichten. Eine feinporige Schicht dient als Flammensperre, während die zweite die Reaktionszone darstellt. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 5 zu sehen.



**Abbildung 5:** Schematischer Aufbau eines Pécletzahl-Stabilisierten Porenbrenners (Durst, 1997).

Für den Cleanfire Porenbrenner wird die Reaktionszone ebenfalls mit dem Pécletzahl-Kriterium stabilisiert, wobei die Flammensperre (Schicht A) eine Lochplatte aus gepresstem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und die Reaktionszone (Schicht C) ein Porenschaum aus SiC besteht. Die Pécletzahl beschreibt das Verhältnis aus Wärmeproduktion und Wärmeabfuhr aus der Reaktionszone. Für eine Flammenausbreitung ist eine Pécletzahl  $>65$  erforderlich, ansonsten findet ein Verlöschen der Reaktion statt. Für Schüttungen und poröse Medien ist die Pécletzahl folgendermaßen definiert:

$$PE = \frac{s_L \cdot d_{p,eff} \cdot \rho_f \cdot c_{p,f}}{\lambda_{w,f}} = \frac{s_L \cdot d_{p,eff}}{a_f}$$

Hierin sind  $s_L$  die laminare Brenngeschwindigkeit  $a_f$  die Temperaturleitfähigkeit des Gasgemisches und  $d_{p,eff}$  der effektive Porendurchmesser. Des Weiteren sind  $\rho_f$  die Dichte des Flu-

ids,  $\lambda_{w,f}$  die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und  $c_{p,f}$  die spezifische Wärmekapazität des Fluids.

### 2.2.1 Herstellung von SiC Schäumen

Durchgeführte von Fst. 3

Zur Entwicklung der keramischen Schäume zum Einsatz in der Brennkammer des Porenbrenners wurde im Rahmen dieses Projekts die Herstellung nach dem Replicaverfahren optimiert.

Nach dem optimierten Replicaverfahren wird ein offenporiger PU-Schaum mit definierter Porengröße zunächst mit einem Schlicker beschichtet, der als Binder Si-organische Polymere sowie keramische Partikel als Füllstoff enthält. Die beschichteten Schäume werden zunächst getrocknet und die Polymere anschließend bei 110 °C ausgehärtet. Während einer thermischen Behandlung bis über 1000 °C wird der PU-Schaum ausgebrannt, der organische Anteil der Polymere pyrolysiert und eine SiOC-Keramik erzeugt. Durch das Ausbrennen des PU-Materials entstehen Hohlräume in den Stegen, die sich nachteilig auf die Stabilität der Schaumkeramik auswirken. Aus diesem Grund wird der Schaum erneut mit einem Schlicker beschichtet, dessen Komponenten denen der ersten Schicht gleichen, die sich jedoch in ihren Anteilen unterscheiden. Um zur Verstärkung auch Material in die Hohlstege einzubringen, wird zur zweiten Beschichtung Vakuum angelegt. Nach Trocknung und Aushärten der Polymere wird auch die zweite Schicht pyrolysiert.

**Tabelle 1:** Zusammensetzung der optimierten Schlicker-Formulierungen.

	1. Beschichtung	2. Beschichtung		1. Beschichtung	2. Beschichtung
	Vol.%	Vol.%		Vol.%	Vol.%
MK	20,5	8,5	MK	21,0	10,0
H62C	20,5	8,5	H62C	21,0	10,0
MTES	18,0	61,4	MTES	16,0	48,9
SiC F 800 7,3 - 9,8 $\mu\text{m}$	28,0		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CT800FG 3,7 $\mu\text{m}$	28,7	21,0
NF15 0,6 - 0,9 $\mu\text{m}$	12,0	20	CT3000SG 0,8 $\mu\text{m}$	12,2	9,0
Al(acac) <sub>3</sub>	0,5	0,6	Al(acac) <sub>3</sub>	0,5	0,5
Ölsäure	0,5	1,1	Ölsäure	0,6	0,6

Bei der Zusammensetzung der Schlicker wurde von einer Zusammensetzung nach Cromme (Cromme, 2002) ausgegangen und Füllstoffart und -korngrößen sowie die Anteile der Einzelkomponenten optimiert. Als Füllstoff wurde zunächst SiC verwendet, da es bis 1.300 °C stabil und chemisch weitgehend inert ist. Da sich diese bei Auslagerungsversuchen gegenüber Alkalien jedoch als nicht korrosionsbeständig erwiesen, wurde außerdem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als Füllstoff verwendet trotz der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Materials. Die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schäume sollten sowohl für die Flammensperre als auch für die Brennkammer verwendet werden. Hierzu wurden nach dem Replicaverfahren in Anlehnung an das bereits für die SiC-Schäume optimierte Rezept durch mehrfache Beschichtung Schäume mit drei verschiedenen Porengrößen, angegeben in pores per inch (ppi), (10 ppi, 30 ppi, 45 ppi) entwickelt.

Zur Temperaturbehandlung wurde ein Programm entwickelt, bei dem die erste Haltestufe bei 400 °C gewählt wurde, so dass der Ausbrand des PU-Schaums gewährleistet ist. In der zweiten Stufe bei 800 °C werden die organischen Bestandteile der Polymere abgespalten. Mit der dritten Stufe wird bei über 1000 °C die Bildung der SiOC-Keramik abgeschlossen. Für die zweite Beschichtung wurde eine höhere maximale Temperatur gewählt, um das Versintern mit der ersten Beschichtung zu erzielen. Im Fall der SiC-gefüllten Schäume wurde die zweite Beschichtung bei 1050 °C gesintert, während die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gefüllten bei 1500 °C behandelt wurden, um eine Versinterung zu Mullit und damit eine Verdichtung sowie Verfestigung zu ermöglichen (Soraru, 2000).

Schließlich wurden Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gefüllte Schäume unterschiedlicher Geometrien für die Brennkammer hergestellt. Hierzu wurden die PU-Schäume unter Berücksichtigung der Schwindung bei der Pyrolyse zugeschnitten und entsprechend dem oben beschriebenen Verfahren zu keramischen Schäumen verarbeitet.

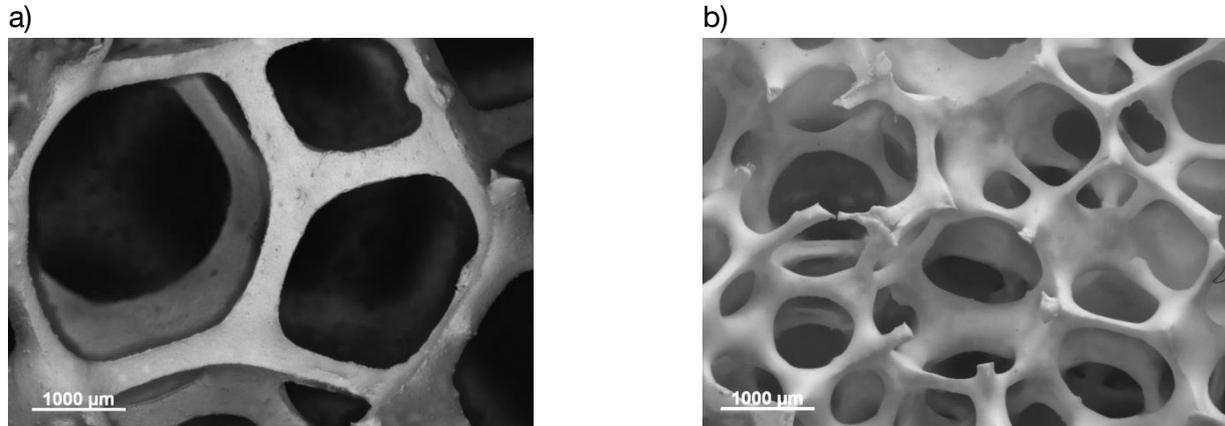
### Erzielte Ergebnisse

Hinsichtlich der Formulierung des SiC-gefüllten Schlickers der ersten Beschichtung wurde untersucht, wie sich die Variation der Korngröße des SiC auswirkt. Nach Evakuieren mit ungefülltem Schlicker zur Untersuchung der Stabilität wiesen Schaumproben mit bimodaler Verteilung (30 Vol.%, 0,6-0,9 µm zu 70 Vol.%, 7,3-9,8 µm) am wenigsten Risse entlang der Stegkanten auf.

Die Formulierung des Schlickers der zweiten Beschichtung wurde hinsichtlich ihres Füllstoffanteils optimiert. Hier wurde der Füllstoffgehalt mit 0, 10, 15, 20 und 25 Vol.% SiC variiert. 30 Vol.% SiC lassen sich nicht vollständig in den Schlicker einbringen. Ein Füllstoffgehalt von 0 Vol.% erwies sich für die zweite Beschichtung als ungeeignet, da die Schicht nach der Pyrolyse nicht auf der ersten haftete. Bei 10 Vol.% treten Schwindungsrissen auf. Im Vergleich der Beschichtungen mit 15 und 20 Vol.% weisen die mit 20 Vol.% am wenigsten Risse und eine gute Infiltration der Hohlstege auf (siehe Abbildung 6). Füllstoffgehalte von 25 Vol.% führten zu einer für die zweite Beschichtung zu hohen Viskosität.

Die für SiC-gefüllte Schlicker entwickelten Formulierungen lassen sich auf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gefüllte übertragen. Zur Erhöhung der Stabilität durch dickere Beschichtungen konnte der Füllstoffgehalt für die zweite Beschichtung auf 30 Vol.% erhöht werden. Die mittels Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gefüllten Schlickern hergestellten Schäume wiesen keine Risse entlang der Stege auf. Anhand der

Materialdichte der  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiOC}$ -Keramik von  $3,4 \text{ g/cm}^3$  und der geometrischen Dichte wurde jeweils die Porosität bestimmt (Tabelle 2).



**Abbildung 6:** Mikroskopaufnahmen eines a) 10 ppi SiC/SiOC-Schaums und b) 30 ppi  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiOC}$ -Schaums.

**Tabelle 2:** Eigenschaften der  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiOC}$ -Schäume.

	Porengröße	Stegdickenminima	geometrische Dichte	Porosität
10 ppi	2,4 mm	0,4 mm	$0,23 \text{ g/cm}^3$	93 %
30 ppi	1,0 mm	0,2 mm	$0,29 \text{ g/cm}^3$	91 %
45 ppi	0,5 mm	0,1 mm	$0,44 \text{ g/cm}^3$	87 %

### 2.2.2 Vorversuche mit SiC Schäumen

Durchgeführt von Fst. 2

Für die Verbrennungszone des Brenners sollten SiC Schäume verwendet werden. Um deren Zeitstandfestigkeit zu testen, wurden sechs Proben unterschiedlicher Porosität in die Oxidationszone eines Holzpelletkessel für mehr als 100 Betriebsstunden eingebracht. Der Pelletkessel befand sich in Heizbetrieb, so dass die Schäume auch mehreren Start-Stop Vorgängen ausgesetzt waren. Die Keramikschaume wurden auf einem Träger mit zwei Ebenen befestigt (siehe Abbildung 7).

Nachdem die 100 Betriebsstunden erreicht waren, wurde der Träger wieder aus dem Kessel entfernt und die Keramikschaume untersucht. Dabei zeigten sich Ablagerungen sowie eine starke Degeneration der Schäume, insbesondere der grobporigen Schaumstrukturen. Abbildung 8 zeigt einen Probenkörper vor und nach dem Experiment. Wie auf Bild b zu sehen ist, hatten die Ablagerungen makroskopisch ein kugelförmiges Aussehen und ersetzen die keramische Grundstruktur.

Eine EDX-Analyse zeigte, dass diese größtenteils aus Alkalien, Erdalkalien und Schwefel bestanden. Daneben fanden sich auch Schwefelverbindungen und ganz vereinzelt Eisenoxid- und Eisenkarbonatablagerungen. Letztere sind auf die Befestigung zurückzuführen und nicht auf den Verbrennungsvorgang. Die einzelnen Ablagerungen konnten auf elektronenmikroskopischen Aufnahmen identifiziert und auch deutlich unterschieden werden. Die Abbildung 9 zeigt beispielhafte Strukturen, wie sie sich auf den Keramikschäumen darstellten.



**Abbildung 7:** Keramikschäume in Halterung.



a

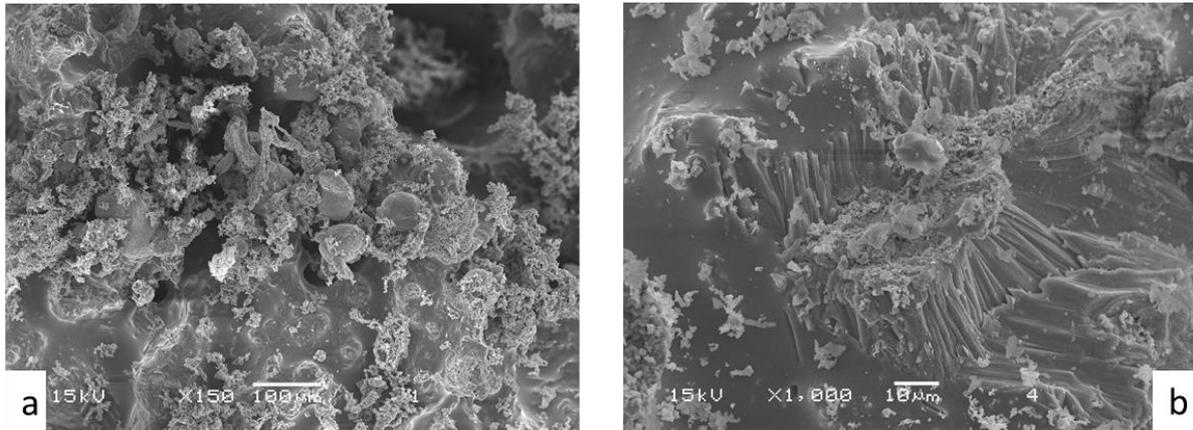


b

**Abbildung 8:** Keramikprobe vor a) und nach b) 100 Stunden im Pelletkessel

Da die SiC-Keramik keine Oxidkeramik ist, ist diese anfällig für Oxidationsmechanismen, so dass sich an der Oberfläche eine schützende Siliziumoxidschicht bildet. Diese Schicht behindert die Diffusion von Sauerstoff zur SiC-Schicht, was eine abnehmende Oxidation be-

wirkt und das Material schützt. Bei zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten kann sich allerdings keine stabile Schutzschicht ausbilden, da das  $\text{SiO}_2$  durch die Strömung fortgetragen wird. Die Oxidschicht kann ebenfalls durch Reaktion mit Wasserdampf abgetragen werden. Auch Alkalienionen wie  $\text{Na}^+$  können die Diffusion durch die Oxidschicht erhöhen, weil sie die Viskosität der Glasschicht senken (Füssel, 2011). Aufgrund der gefundenen Alkalien in den Ablagerungen ist anzunehmen, dass ein solcher Mechanismus die Keramik zerstört hat.



**Abbildung 9:** Die Bilder a und b zeigen beispielhafte Ablagerungsstrukturen auf den Keramiken: z. B. enthalten die kugelförmigen Gebilde Eisen (Fe), grobe Krümel Schwefel (S) und Lamellen Kalium (K) und Kalzium (Ca).

Es wurden daraufhin Keramikschaume aus  $\text{SiSiC}$  bestellt, um dieses Problem zu vermindern.  $\text{SiSiC}$ -Keramik-Schaume werden nach der Sinterung noch mit Silizium behandelt, das Hohlräume oder Risse in Stegen (vgl. Kapitel 2.2.1) verschließt und die Stabilität erhöht. Eine weitere Maßnahme wird durch den Prozess ermöglicht: Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, werden die in der Reaktionszone verdampften Alkalien in der kälteren Brennstoffschüttung wieder kondensiert, sodass ein staubarmes Gas entsteht und somit die Diffusion nicht beschleunigt wird.

### 2.2.3 Brennerentwicklung

Druchgeführt von Fst. 1

Der Brenner für das Cleanfire System soll sowohl Erdgas als auch Holzgas bis zu einer Leistung von 10 kW verbrennen können und gegen Teerverbindungen geschützt werden. Dabei ergeben sich zwei unterschiedliche Herausforderungen: Erdgas und Holzgas unterscheiden sich erheblich in der Zusammensetzung und dem Heizwert (siehe Tabelle 3). Der Brenner muss also so dimensioniert werden, dass beide Gase zuverlässig verbrannt werden können. Die zweite Herausforderung ist, zu verhindern, dass Teerablagerungen die Flammensperre verstopfen.

Für die Brennerauslegung ist zunächst die Kenntnis verschiedener Stoffwerte, wie Brenngeschwindigkeit oder Wärmeleitfähigkeit, und des Porendurchmessers bei der kritischen Pécletzahl erforderlich (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 3:** Erdgaszusammensetzung im Verteilnetz des Großraums München und typische Zusammensetzung von trockenem Produktgas aus der atmosphärischen Vergasung holzartiger Biomasse (SWM, 2010), (Nussbaumer, 2002).

Eigenschaften		Erdgas der Stadtwerke München	Holzgas eines autothermen Gegenstromvergasers
Hauptbestandteile Vol.-%	Wasserstoff	H <sub>2</sub>	10,0 – 14,0 (12,0)
	Methan	CH <sub>4</sub>	2,0 – 3,0 (2,5)
	Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	---
	Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	---
	Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	---
	Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	---
	Hexan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	---
	Kohlenmonoxid	CO	15,0 – 20,0 (17,5)
	Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	8,0 – 10,0 (9,0)
	Stickstoff	N <sub>2</sub>	Rest (59,0)
<b>Heizwert H<sub>u</sub> MJ/m<sup>3</sup></b>		36,29	3,7 – 5,1 (4,4)
<b>Luftbedarf L<sub>min</sub> m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>		9,61	1,23 (berechnet)

**Tabelle 4:** Stoffdaten und effektiver Porendurchmesser nach dem Péceletzahl Kriterium.

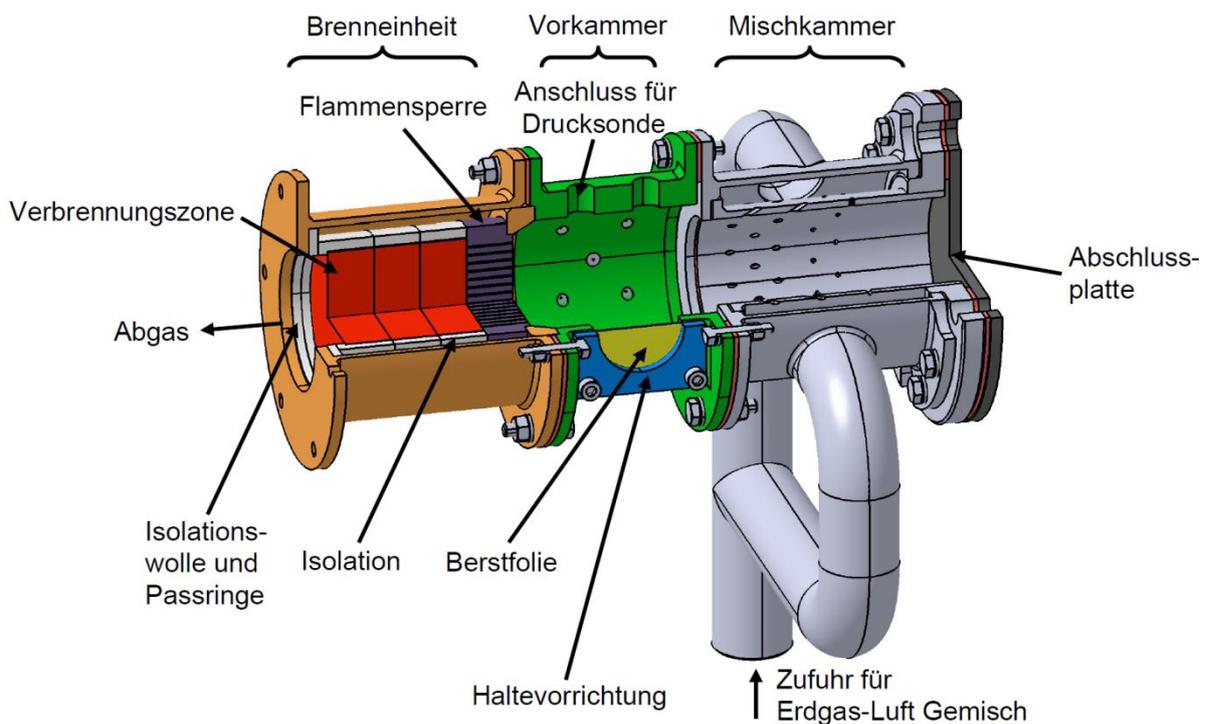
Stoffwerte und Eigenschaften		Erdgas Luft Gemisch	Holzgas-Luft Gemisch
T <sub>Edukt</sub> = 0°C λ = 1	Brenngeschwindigkeit s <sub>L</sub> [cm/s]	32,90	17,54
	Dichte ρ <sub>f</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	1,22	1,26
	Wärmekapazität c <sub>p,f</sub> [J/kgK]	1068,56	1439,05
	Wärmeleitfähigkeit λ <sub>w,f</sub> [mW/mK]	24,50	28,20
	Porendurchmesser d <sub>P,eff</sub> [mm]	3,71	5,68

Weitere Berechnungen zeigen, dass sich der Porendurchmesser des Erdgas-Luft Gemisches für höhere Edukttemperaturen (> 300 °C) nur unwesentlich ändert. Beim Holzgas-Luft-Gemisch sinkt hingegen der effektive Porendurchmesser aus d<sub>P,eff</sub> = 3,79 mm ab. Daraus ergeben sich zwei Erkenntnisse. Zum einen ist das Erdgas-Luft Gemisch das kritischere, was den Flammenrückschlag betrifft und zum anderen, dass bei Verwendung von 10 ppi (10 pores per inch) Schäumen, die einen effektiven Porendurchmesser von ungefähr 4,5 mm besitzen, eine Vorheizung notwendig ist, um dem Holzgas eine ungehinderte Ausbreitung im Schaum zu ermöglichen.

Die Flammensperre hingegen muss einen effektiven Lochdurchmesser besitzen, der kleiner ist als der kritische. Des Weiteren soll der Druckverlust durch die Flammensperre möglichst gering gehalten werden. Sie soll zusätzlich eine hohe Wärmeleitfähigkeit aber geringe Transmission gegenüber Infrarotstrahlung, mechanische Stabilität und eine definierte Makroporosität besitzen. Die Berücksichtigung dieser Anforderungen, vor allem in Hinblick auf die Rückschlagsicherheit, ergab eine Aluminiumoxidfaserlochplatte mit einem Lochdurchmesser von 0,8 mm. Zu Testzwecken wurden drei verschiedene Platten der Dicken von 1, 1,5 und 2 cm eingesetzt. Allerdings benötigt der Brenner eine Vorheizung der Luft, um am kalten Ende der Flammensperre eine genügend hohe Temperatur zu erreichen, die Teerkondensation verhindert.

Für die benötigte Leistung ergaben sich folgende Parameter: Der Durchmesser der Porenschäume beträgt 60 mm und die Dicke 20 mm. Drei dieser Porenschäume werden gestapelt und ergeben den Brennraum, der am Einlass durch die Flammensperre von der Mischkammer getrennt ist. Der Brennraum ist durch eine Keramikfaserisolation vom metallischen Trägergehäuse isoliert. Die Temperaturen im Porenbrenner werden durch Thermolemente von Typ B überwacht. Die Temperaturen in der Flammensperre durch Thermolemente von Typ K. Als zusätzliche Sicherheit ist in der Vorkammer eine Berstfolie angebracht, die im Falle eines Flammenrückschlages reißt und das Gas ableitet. Daneben werden der Druck in der Vorkammer und der Differenzdruck über den Brenner erfasst.

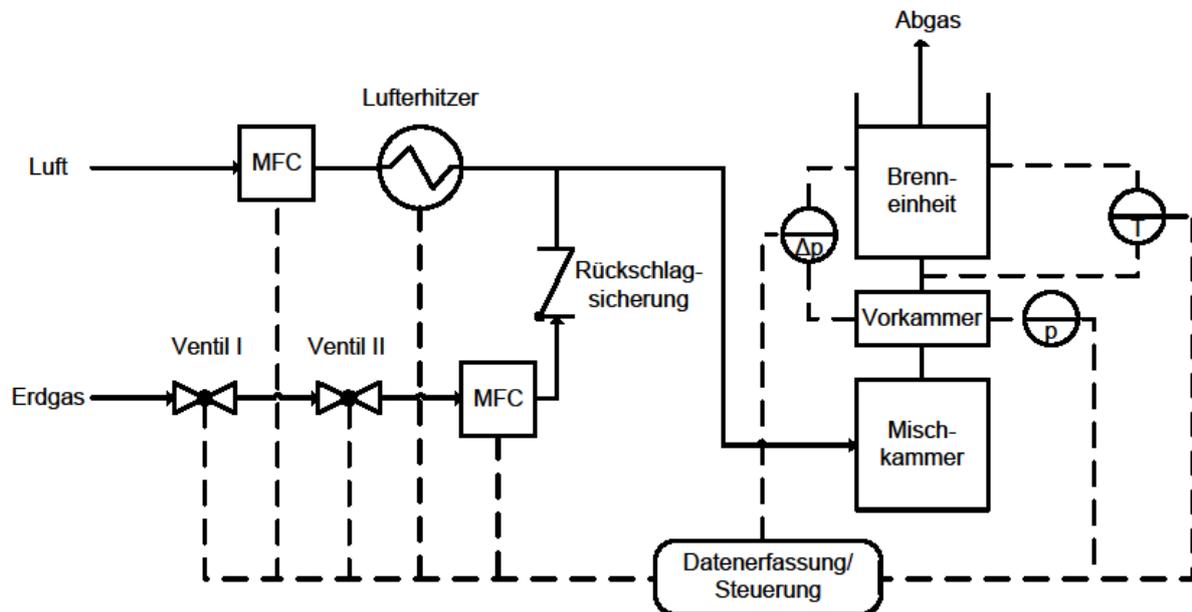
Die Verbrennungsqualität wird nach dem Brenner über eine Lambdasonde erfasst, die neben dem Lambdawert auch noch den Sauerstoffgehalt im Abgas misst. Sollte im Abgasmassenstrom ein zu hoher Sauerstoffanteil gemessen werden ist dies auch ein Indikator auf eine verloschene Reaktion, was in der SPS zu einer Warnmeldung führt. Gezündet wird der Brenner durch eine Zündelektrode, die sich knapp oberhalb der Porenkeramik befindet. In Abbildung 10 ist eine Schnittzeichnung des Porenbrenners zu sehen. Wie auch der Vergaser ist der Brenner in das Gestell der Versuchsanlage integriert.



**Abbildung 10:** Schnittzeichnung des Porenbrenners.

Die Mischkammer im Bild ganz rechts (graue Farbe) besitzt zwei Zugänge und einen Ausgang. Der Ausgang am rechten Flansch ist im Bild durch eine Platte verschlossen und wird geöffnet, sobald ein kombinierter Vergaser-Brennerbetrieb vorgesehen ist. Der untere Zugang durch das Rohr und die Ringkammer liefert die Sekundärluft, die auf eine Temperatur zwischen 20 °C und 300 °C eingestellt werden kann, und das Erdgas. Der grün dargestellte Teil ist eine Vorkammer, die die Zugänge für Druck- und Temperaturmessungen, sowie die Berstfolie zur Notabblase enthält. Danach folgt die eigentliche Brennkammer, die durch

die violett dargestellte Flammensperre von der Vorkammer getrennt ist. Die Reaktionszone aus drei SiSiC-Keramiksäumen ist rot dargestellt. Im Anschluss daran befindet sich das Abgasrohr mit Messzugängen. Ein Fließschema des Brenners ist auch in Abbildung 11 zu sehen.



**Abbildung 11:** Schematischer Aufbau der Mess- und Regelstrecke des Brenners.

## 2.2.4 Simulation des Porenbrenners

### Arbeitspaket 5: Simulationen

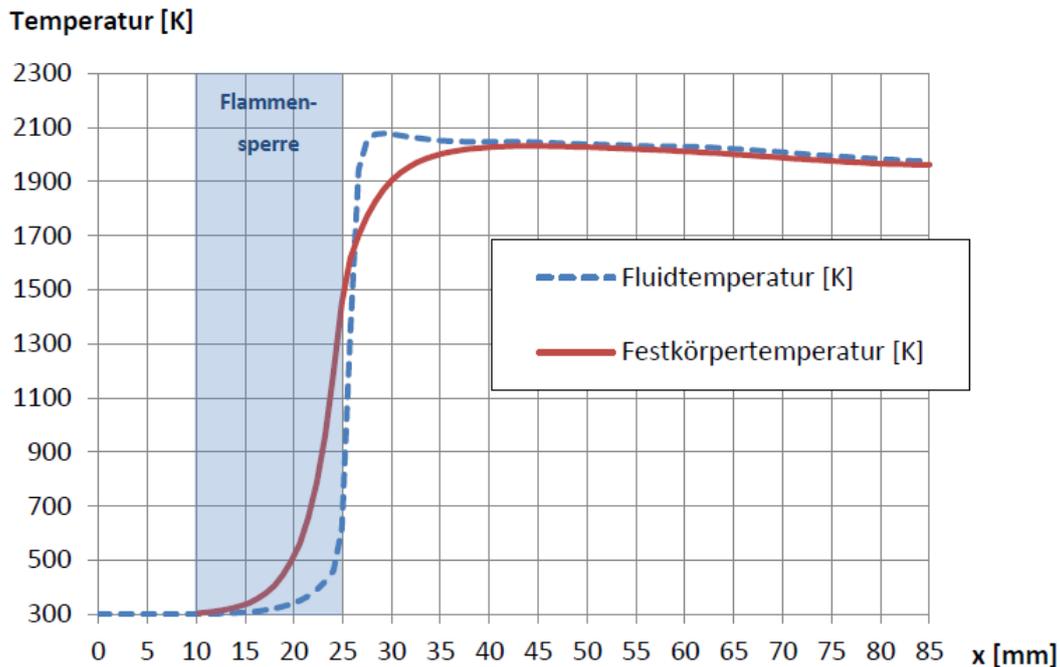
Durchgeführt von Fst. 1

Die Motivation für ein Simulationsmodell des Porenbrenners ergibt sich im Wesentlichen aus folgenden vier Punkten:

- Vermeidung zu häufiger Umbaumaßnahmen
- Einfache Durchführung von Parameterstudien
- Nicht alle Größen aufgrund der Zugänglichkeit gut messbar
- Schnelle Überprüfung von geplanten Modifikationen

Für die Simulation wurde die Software AnsysFluent verwendet. Um den Brenner abzubilden, wurde aufgrund der Rotationssymmetrie des Brenners eine zwei dimensionale Geometrie verwendet. Die Geometrie besteht aus vier Zonen: einem Einlauf, der Flammensperre und zwei porösen Zonen von 20 mm und 40 mm Länge. Das Simulationsnetz wurde an Zonenübergängen verfeinert. Der Festkörper und das Gas werden getrennt mit zwei übereinanderliegenden Netzen simuliert. Für den Festkörper werden nur die Energiegleichungen gelöst, die über einen Wärmeaustauschterm mit denen des Fluids gekoppelt sind. Auch werden die Flammensperre und die SiSiC-Schäume nicht explizit als Geometrie abgebildet, sondern über die Zoneneigenschaft poröses Medium. Der Reaktion basiert auf einem reduzierten GRI 3.0 Mechanismus.

Das Ergebnis einer ersten Simulation ist in Abbildung 12 zu sehen. Zu sehen ist vor allem die Wärmeleitung innerhalb des porösen Mediums. Der Temperaturgradient des Fluids ist deutlich steiler als der des Festkörpers. Auch die Maximaltemperatur des Gases ist höher als die des Festkörpers. In der Reaktionszone (zwischen 25 mm und 30 mm) wird die Wärme freigesetzt, die der Festkörper dann aufnehmen und mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit dann ableiten kann. Allerdings ist auch zu sehen, dass schon 5 mm links der Verbrennungszone die Temperatur auf 500 K abgesunken ist und die Gastemperatur sogar noch niedriger liegt. Wie schon die Messung, zeigt auch die Simulation, dass kein ausreichender Wärmerücktransport entgegen der Strömungsrichtung stattfindet, um Teerkondensation von vornherein zu verhindern.

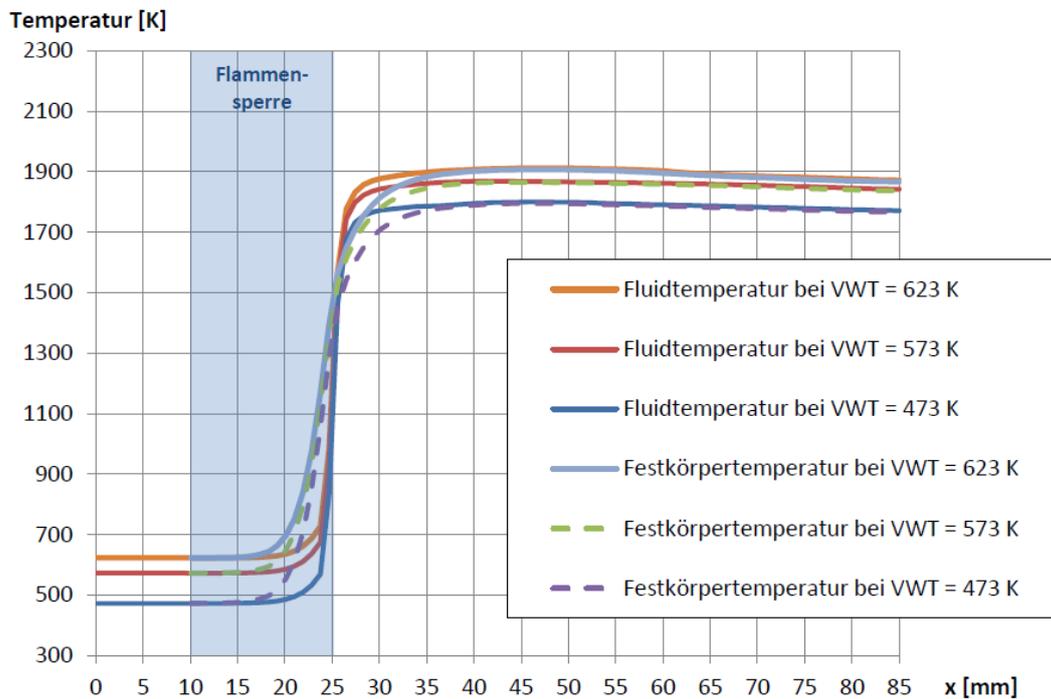


**Abbildung 12:** Temperaturverteilung von Fluid und Festkörper in der Mitte des Brenners bei einer Luftzahl von 1,2 und einer Leistung von 2 kW (Kappauf, 2012).

Dieses Verhalten wird bei höherer Luftzahl oder höherer Leistung noch ungünstiger, da eine verstärkte konvektive Kühlung einsetzt. Die Vorwärmzone wird dabei immer schmaler und rückt auch näher an die Grenze zwischen Flammensperre und Verbrennungszone heran. Die Temperaturverläufe innerhalb der Flammensperre sowie die Druckverluste stimmen gut mit den Messergebnissen überein. Die Temperaturen in der Verbrennungszone werden bei der Erdgas- und der Holzgasverbrennung überschätzt. Dies wird auch in Abbildung 13 deutlich. Die Temperaturen bei der Holzgasverbrennung schwanken in der Simulation zwischen 1700 K und 1900 K, was ca. 1427 °C bis 1627 °C entspricht, während die gemessenen Werte zwischen 800 und 1100 °C schwanken. Allerdings ist anzumerken, dass die Thermoelemente aufgrund der porösen Struktur des Brenners nicht optimal positioniert werden konnten und deshalb etwas niedrigere Werte gemessen wurden.

Trotz dieser Einschränkungen ist das Modell geeignet, den Vergaser bezüglich Wärmetransport und Langzeitstabilität zu optimieren. Zum Beispiel kann mit dem Modell eine

Verbesserte Flammensperre ausgelegt werden, die eine bessere Temperaturverteilung und Wärmeleitfähigkeit aufweist, um eine Teerkondensation zu verringern.



**Abbildung 13:** Temperaturprofile bei der Verbrennung von Holzgas mit unterschiedlichen Abgastemperaturen (Kappauf, 2012).

## 2.3 Vergaserversuchsstand

Durchgeführt von Fst. 1

Der Cleanfire Versuchsstand besteht im Wesentlichen aus dem Brenner, dem Vergaser und der Steuerung. Daneben besteht noch eine Peripherie, wie Gasleitungen, Waschflaschen und Gebläse. Die Hauptbestandteile der Anlage sind in ein Gestell aus Item-Profilen montiert. Die Steuerung, die Gebläse und eine Waschflasche für Teere sind extern angebracht. Die Steuerung der gesamten Versuchsanlage erfolgt durch eine SPS von Bernecker & Rainer. Ein Fließschema der Gesamtanlage ist in Abbildung 14 dargestellt. Im Abgasrohr hinter dem Porenbrenner befinden sich drei Messzugänge. An diese können verschiedene Messgeräte, wie ELPI und FTIR, gleichzeitig angeschlossen werden. Eine Übersicht über die Anlage und einzelne Komponenten gibt Abbildung 15. Die Anlage kann in drei Betriebsmodi gefahren werden: Vergaserbetrieb, Brennerbetrieb, kombinierter Vergaser- und Brennerbetrieb.

### Vergaserbetrieb

Bei dem Betriebsmodus „Vergaserbetrieb“ wird der Vergaser unabhängig vom Brenner betrieben. Dies bedeutet, dass die Verbindung zwischen Vergaser und Brenner geschlossen ist. Das bei der Vergasung entstehende Gas wird über eine Waschflasche von kondensierbaren Bestandteilen, vor allem Teere, befreit und anschließend abgeleitet. Nach der Waschflasche befindet sich ein Seitenkanalverdichter, der genügend Leistung aufbringen kann, um

das Holzgas durch die Waschflasche zu saugen und im Vergaser einen Druck, der in etwa dem Umgebungsdruck entspricht, zu erzeugen.

Ein Versuch in diesem Betriebsmodus läuft in folgenden Schritten ab. Zunächst wird geprüft ob das Abgasgebläse läuft und Druck an der Stickstoffleitung und der Druckluftleitung anliegt. Falls eine dieser Prüfungen negativ ausfällt, wird automatisch der Notaus ausgelöst. Diese Prüfung findet auch während jedem Zyklus der Steuerung wiederholt statt und ist auch in die Hardwaresicherheitskette implementiert. Der zweite Schritt beinhaltet das Vorheizen des Vergasers mit heißer Luft. Dazu wird ein hoher Luftmassenstrom eingestellt und mit dem Luftherhitzer eine treppenförmige Temperaturerhöhung der Primärluft eingestellt. Dies bewirkt ein kontinuierliches Aufheizen des Systems. Bei ca. 150 °C Vergasertemperatur wird der Vergaser mit Pellets befüllt. Dies geschieht bei hoher Leistung der Brennstoffschnecke. Anschließend wird das System weiter aufgeheizt bis die Schüttung zündet, was an einem steilen Temperaturgradienten und einem Druckanstieg im Vergaser beobachtet werden kann. In dieser Situation wird die Primärluftmenge reduziert bis die gewünschten Vergasungsbedingungen erreicht sind. Außerdem werden mit der gewünschten Leistung Pellets zudosiert. Nach Abschluss der Experimente wird die Brennstoffzufuhr gestoppt und der Restkoks verbrannt oder die Reaktion mittels Spülung des Vergasers mit Stickstoff gestoppt. Allerdings wird dabei nur die Oxidation gestoppt. Vorgänge die allein unter Einwirkung von Hitze ablaufen, z. B. Pyrolyse, finden weiterhin statt, bis der Vergaser auf eine Temperatur abgekühlt ist, die solche Mechanismen nicht mehr zulässt, oder kein Brennstoff mehr vorhanden ist. Bis dieser Punkt erreicht ist muss der Vergaser weiter gespült werden.

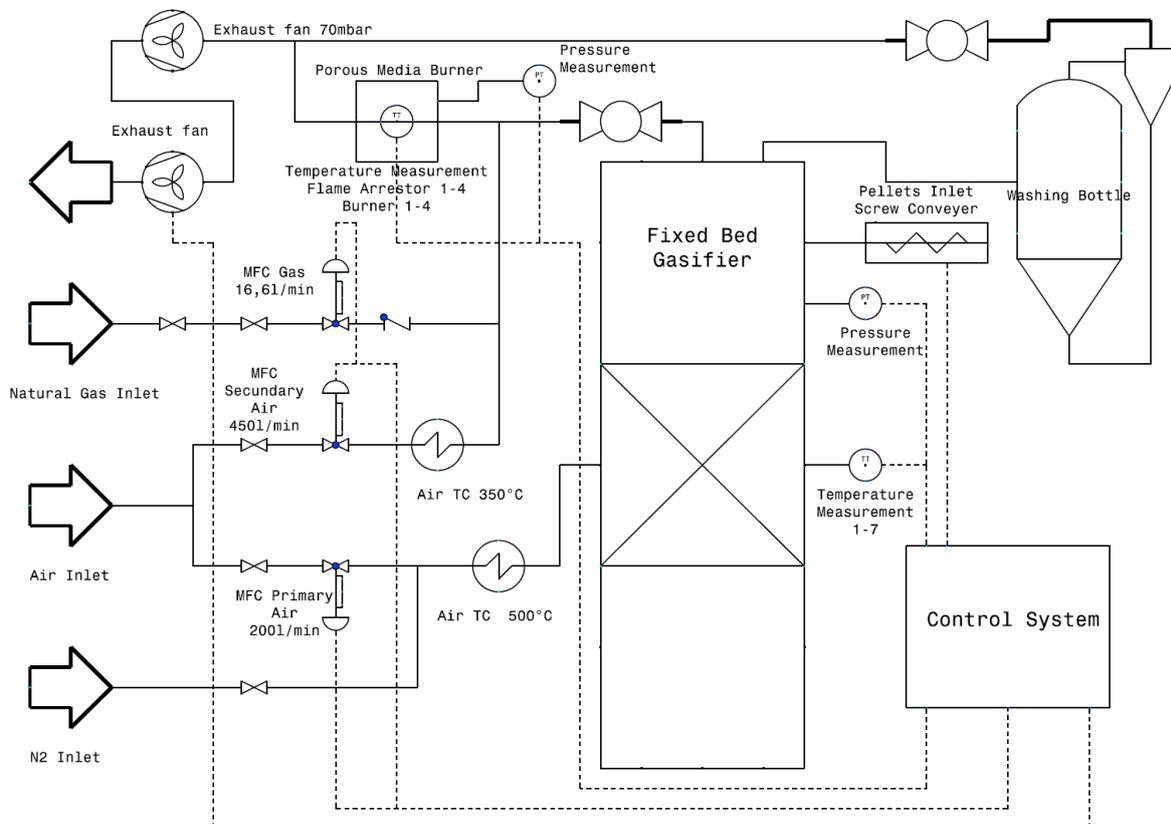
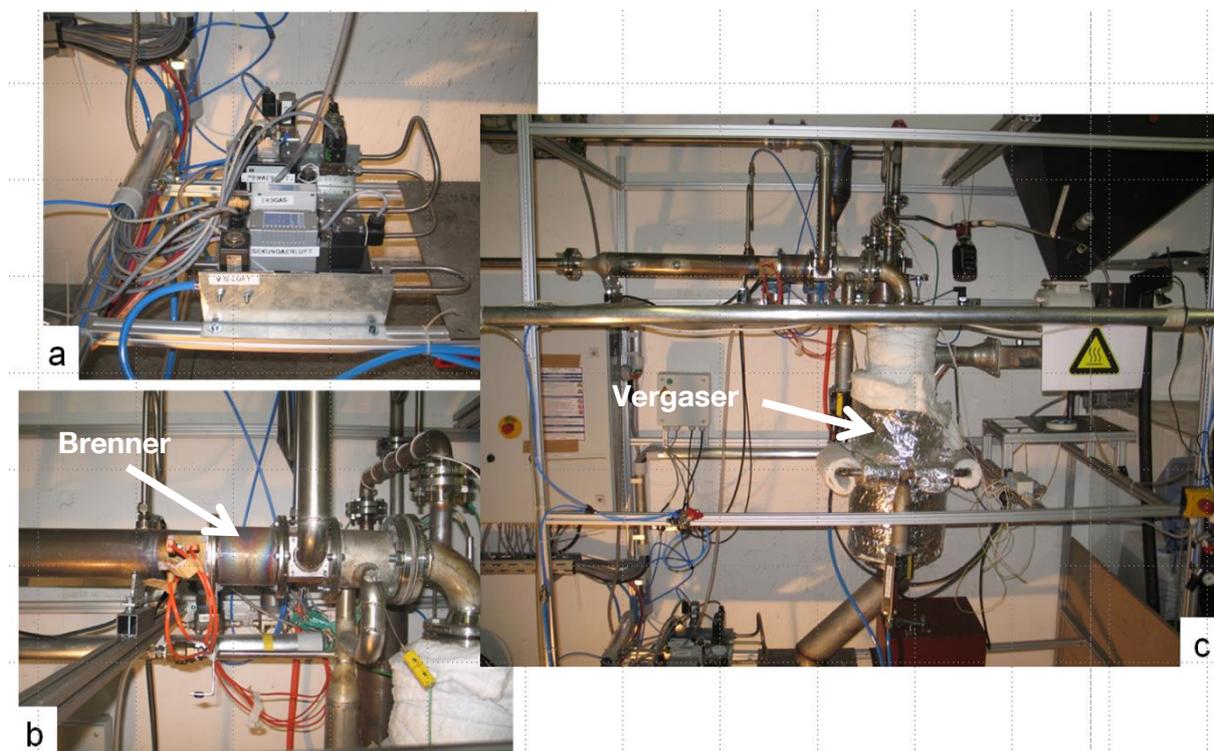


Abbildung 14: Fließschema der Cleanfire-Versuchsanlage.

## Brennerbetrieb

Beim Betriebsmodus „Brennerbetrieb“ wird der Brenner unabhängig vom Vergaser mit Erdgas betrieben. Die Verbindung zwischen Vergaser und Brenner ist auch hier geschlossen. Das Verbrennungsabgas wird über ein Gebläse sowie einen Kamin abgeführt. Auch in diesem Modus wird geprüft, ob an den relevanten Leitungen Druck anliegt und ob das Saugzuggebläse läuft.

Der alleinige Brennerbetrieb läuft in folgenden Schritten ab. Der Brenner wird zunächst mit heißer Luft auf ca. 100 °C vorgeheizt, um die Zündung des Erdgas Luftgemisches zu erleichtern. Werden 100 °C erreicht wird Erdgas zugegeben und über die Zündelektrode gezündet. Nach erfolgter Zündung sinkt der Restsauerstoffgehalt im Abgas und die Temperatur im Brenner steigt stark an. Sollte der Sauerstoffgehalt nicht absinken, erkennt die Steuerung einen Zündfehler, schließt die Erdgaszufuhr und spült den Brenner mit Luft. Nach erfolgreicher Zündung wird automatisch eine initiale Leistung und Luftzahl eingestellt. Diese Werte können dann im Laufe des Experiments variiert werden. Nach Abschluss der Experimente wird die Erdgaszufuhr geschlossen und die Reaktion erlischt. Die Luftzufuhr wird ebenfalls geschlossen oder auf ein Minimum reduziert, um den Brenner nicht zu schnell abzukühlen und so die Thermospannungen zu verringern.



**Abbildung 15:** Überblick über die Cleanfire Versuchsanlage: a) MFC Station zu Regelung von Primär- und Sekundärluft, sowie von Erdgas. Außerdem sind hier die Sicherheitsventile angebracht. b) Detailansicht des Brenners. An den Verfärbungen des Metalls ist die Verbrennungszone deutlich sichtbar. c) Gesamtübersicht über die Versuchsanlage. Der Vergaser ist das einzig isolierte Bauteil, rechts davon ist die Brennstoffdosierung mit Vorratsbehälter sichtbar. Quer zum Vergaser befindet sich der über den Rohrbogen angeschlossene Brenner. Ganz links ist der Schaltschrank mit der Steuerung zu sehen.

## Vergaser und Brennerbetrieb

Bei kombinierten Vergaser- und Brennerbetrieb sind der Vergaser und Brenner miteinander verbunden und der Weg des Holzgases über die Waschflasche ist geschlossen. Der Seitenkanalverdichter kommt im Gegensatz zum alleinigen Brennerbetrieb wieder zum Einsatz, da sich aus Sicherheitsgründen kein zu hoher Überdruck im Vergaser aufbauen darf. Außerdem wird über einen Bypass nach den Messstellen Zusatzluft angesaugt um das Abgas zu Verdünnen und so oberhalb des Taupunktes von Wasser zu bleiben. Die Druckregelung konnte leider aus messtechnischen Gründen noch nicht vollautomatisiert betrieben werden und musste von Hand durchgeführt werden, was manchmal zu stärkeren Druckschwankungen im Vergaser und Brenner führte, aber den Betrieb nur gering beeinflusste.

Bei kombiniertem Betrieb muss verhindert werden, dass sich die Flammensperre oder der Brenner mit Partikeln oder Teerbestandteilen zusetzt. Deshalb wird, nachdem alle Druckwächter und das Gebläse betriebsbereiten Zustand melden, der Brenner gemäß der oben beschriebenen Prozedur mit Erdgas gestartet. Allerdings wird in diesem Fall ein kleiner Teilluftstrom nicht über die Sekundärluftzuführung zugegeben, sondern über die Primärluft durch den Vergaser geleitet. Diese Luftmenge dient als Sperrluft, die das Rückströmen von Erdgas in den Vergaser verhindert. Sobald der Brenner einen stabilen Betriebszustand erreicht hat, werden die Leistung und die Luftzahl erhöht. Nun kann mit dem Übergang von Erdgas auf Holzgasbetrieb begonnen werden. Dazu wird die Sekundärluftmenge schrittweise reduziert und die Primärluftmenge in gleichem Maße erhöht. Die Primärluftmenge dient zudem auch als Vorheizluft für den Vergaser. Die Menge an Primärluft kann hier mit Rücksicht auf den Brenner nicht so hoch gewählt werden wie in alleinigem Vergaserbetrieb. Sobald die Temperatur im Vergaser stärker anzusteigen beginnt, werden Pellets eingefüllt bis eine ausreichende Schütthöhe erreicht ist. Danach wird in den Vergaser so lange heiße Luft geblasen bis eine Reaktion einsetzt, was sich an einem steilen Temperaturgradienten im Vergaser und am Druckanstieg bemerkbar macht. Dann wird die Primärluft reduziert, um von der Pelletverbrennung zur Vergasung überzugehen, und die Sekundärluft erhöht, um das produzierte Holzgas zu verbrennen. Im Anschluss daran kann dann die Erdgasleistung zurückgefahren werden, um zu einer reinen Holzgasverbrennung zu kommen. Gleichzeitig kann getaktet oder kontinuierlich Brennstoff in den Vergaser gefördert werden.

Die Abschaltprozedur läuft in umgekehrter Reihenfolge ab. Zunächst wird die Brennstoffzufuhr gestoppt. Nun muss der restliche Brennstoff, der sich noch im Vergaser befindet langsam vergast werden. Oder die Erdgasleistung wird wieder erhöht und die Vergasungsreaktion mit dem Abschalten der Primärluft und gleichzeitigem Zuschalten einer geringen Menge Stickstoff gestoppt, sodass nur noch Pyrolyse- und Trocknungsprozesse ablaufen können. Die Menge an Stickstoff muss dabei so gering gewählt werden, dass der Brenner nicht beeinträchtigt wird. Durch die geringe Menge an Stickstoff, kühlt der Vergaser nur langsam ab, aber immer noch schneller als wenn der Restkoks noch verbrannt wird. Ist der Vergaser soweit abgekühlt, dass keine Oxidations- oder Pyrolysereaktionen mehr stattfinden, kann der Brenner abgeschaltet werden und abkühlen.

### 3 Experimente

Das folgende Kapitel beschreibt die Versuche, die mit der Versuchsanlage durchgeführt wurden. Die Versuche bei alleinigem Vergaser und Brennerbetrieb dienen vor allem dazu, die Versuchsanlage kennen zu lernen, mögliche Schwachstellen zu finden und diese zu verbessern. Im Anschluss daran wird ein Überblick über die eingesetzte Partikelmesstechnik gegeben. Am Ende werden dann die Ergebnisse der Emissionsmessung dargestellt.

#### 3.1 Alleiniger Vergasungsbetrieb

Bei alleinigem Vergasungsbetrieb wird zuerst der Vergaser mit heißer Primärluft vorgeheizt und sobald die Temperaturen anfangen stärker zu steigen, eine Pelletschüttung in den Vergaser gefördert. Sobald die Pelletschüttung die Zündtemperatur erreicht hat beginnt die Reaktion und die Primärluft kann auf das Vergasungsniveau gedrosselt und eine kontinuierliche Pelletleistung eingestellt werden. Zum Abfahren des Vergasers wird die Brennstoffzufuhr gestoppt und der Restkoks mit hoher Luftzahl verbrannt. Anschließend wird der Vergaser mit Luft oder Stickstoff gespült bis seine Temperatur unter 200 °C gefallen ist. Danach kann das System ausgeschaltet werden.

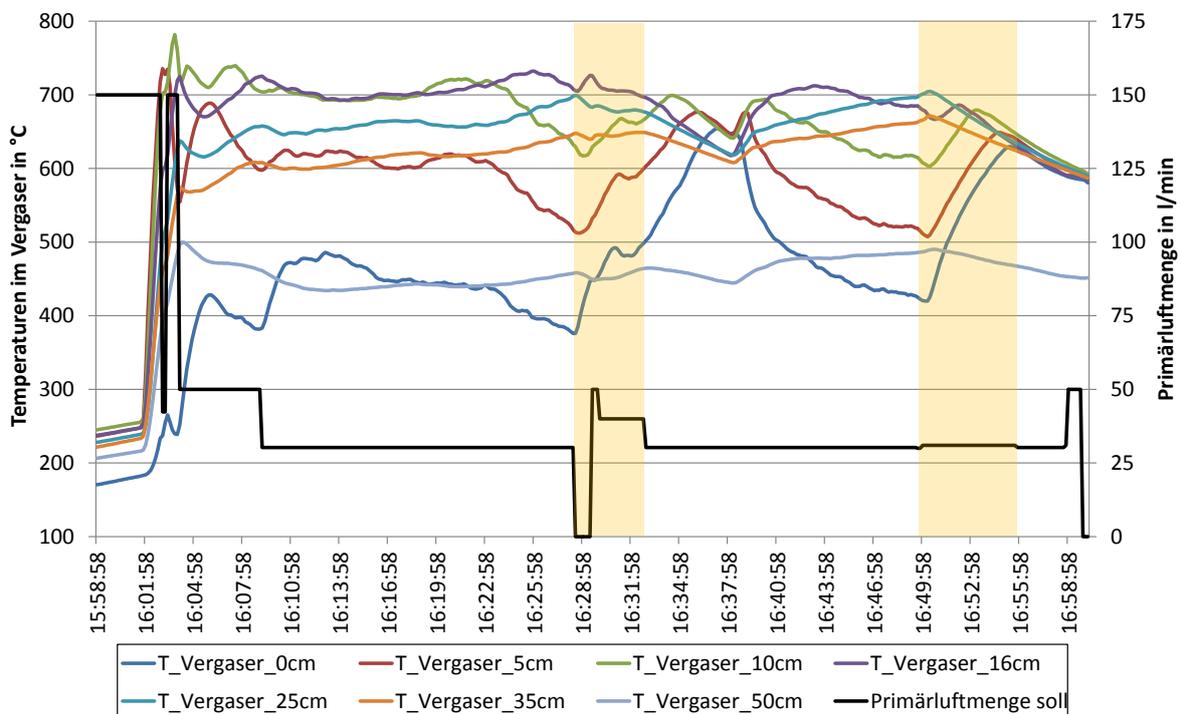
Dem oben beschriebenen Grundschema lagen alle Vergasungsexperimente zugrunde. Variiert wurden dabei die anfängliche Schüttungshöhe, die Luftzahlen während der Vergasung und die Leistung der Brennstoffzufuhr, sowohl in der Höhe und der Taktung bzw. dem kontinuierlichem Förderbetrieb. Die Erkenntnisse, die dabei gewonnen wurden, werden im Folgenden beschrieben:

Bei den ersten Versuchen wurde nach der Zündung eine Temperaturverteilung beobachtet, die mehr auf Verbrennung als auf eine Vergasung schließen ließ. Die Temperaturen innerhalb der Pelletschüttung waren sehr niedrig und die Thermoelemente, die oberhalb der Schüttung angebracht sind, nahmen die höchsten Temperaturen auf. Weiterhin sanken die Temperaturen oberhalb und stiegen in der Schüttung, wenn kein Brennstoff gefördert wurde. Bei Brennstoffförderung hingegen zeigte sich entgegengesetztes Verhalten. Dieses Verhalten lag hauptsächlich an einer zu geringen Brennstoffschüttung und dem Feinanteil am Brennstoff, der durch Mahlvorgänge bei der Schneckenförderung entstand.

Beim Cleanfire-Konzept wird die Primärluft radial in den Vergaser geblasen und deshalb muss die Schütthöhe und die Brennstoffzufuhr so gewählt werden, dass alle Primärluftlöcher zu jedem Betriebszeitpunkt unterhalb des Brennstoffspiegels liegen. Dies gewährleistet auch geringere Temperaturen oberhalb der Schüttung, da durch die heißen Verbrennungsabgase die feinen Brennstoffpartikel aufgrund ihres geringen Oberflächen- zu Volumen-Verhältnisses sich sofort entzünden und vermutlich noch im Fallen verbrennen. Diesem Problem wurde dadurch begegnet, dass bei einem Umbau des Vergasers die obersten Primärluftreihen abgedeckt wurden und die Startmenge verdoppelt wurde.

Die Abbildung 16 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf eines Vergasungsexperiments bei dem die Schütthöhe falsch gewählt wurde. Vor der Zündung kann bereits erkannt werden, dass sich vermutlich eine zu geringe Brennstoffmenge im Vergaser befindet, da bereits vor

der Zündung die unterste Temperatur am niedrigsten ist. Dies ändert sich auch nach der Zündung nicht. Die Förderleistung betrug 5 kW und wurde von 16:28 bis 16:33 Uhr und zwischen 16:49 bis 16:55 Uhr unterbrochen. Diese Bereiche sind im Bild mit orangen Feldern markiert. Kurz nach der ersten Unterbrechung steigen die Temperaturen der unteren drei Thermoelemente an und die oberen sinken ab. Dies setzt sich zunächst auch noch nach dem Wiedereinschalten der Brennstoffzufuhr einige Minuten fort. Danach kehrt sich der Trend wieder um und die Temperatur der unteren Thermoelemente sinkt ab, während die oberen ansteigen. Dies zeigt sich auch bei der zweiten Unterbrechung. Hier allerdings sinken bereits während der Unterbrechung alle Temperaturen nach einigen Minuten wieder ab, was darauf schließen lässt, dass der Brennstoff aufgebraucht ist, was zu einem Erlöschen aller Reaktionen führte. „Auch nach Wiedereinschalten der Brennstoffzufuhr erfolgte nicht mehr sofort eine Reaktion, da keine Zeit für Aufheiz- und Trocknungsvorgänge blieb.



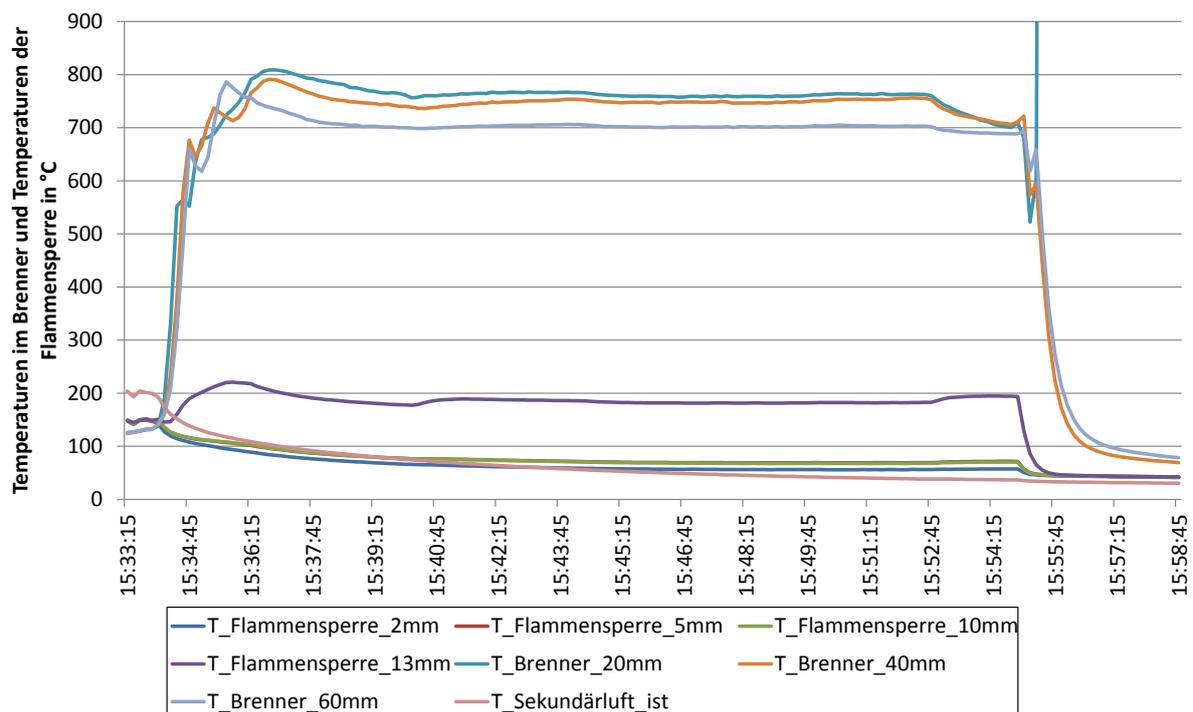
**Abbildung 16:** Zeitlicher Verlauf eines Vergasungsversuchs mit zu geringer Schütthöhe.

### 3.2 Brennerbetrieb mit Erdgas

Bei den Versuchen mit alleinigem Erdgasbetrieb lag der primäre Fokus auf dem Beweis der Funktionstüchtigkeit des Brenners, dem Studium seines Verhaltens sowie des Verhaltens der Flammensperre.

Die ersten Versuche beschäftigten sich mit dem Zündverhalten des Brenners. Die ersten Erkenntnisse dazu waren, dass der Brenner zunächst eine Vorheizung auf ca. 100 °C benötigt, um sicher zünden zu können. Der Zündbereich stimmt gut mit den berechneten Werten überein. Bei einer Leistung von 2 kW und einer Luftzahl von 1,1 konnte der Brenner sicher gezündet werden. Dies ist auch in Abbildung 17 zu sehen. Ganz links sind die Temperaturen vor der Zündung zu sehen. Die Temperatur der Sekundärluft liegt vor Eintritt in die Mischkammer bei 200 °C, die des Brenners knapp über 100 °C. Nach der Zündung erreicht der

Brenner innerhalb zwei Minuten 800 °C und pendelt sich dann auf einem stabilen Temperaturniveau ein. Auch ist zu erkennen, dass die Flammenfront in die Keramik eingedrungen ist, da die Temperatur bei 60 mm oberhalb der Flammensperre ( $T_{\text{Brenner\_60mm}}$ ), die genau am Ende des Brenners gemessen wurde, deutlich unter den Temperaturen liegen, die innerhalb des Brenners aufgezeichnet wurden. Die Flammensperre erfüllte ihren Zweck effizienter als vorausgerechnet. Die Temperatur des Thermoelements knapp unterhalb der Verbrennungszone lag um 600 °C niedriger. Die noch weiter entfernten Thermoelemente in der Flammensperre maßen Temperaturen die weitere 150 °C niedriger lagen. Bei diesem Experiment wurde die Flammensperre nicht vorgeheizt, was auch an der abklingenden Sekundärlufttemperatur zu sehen ist.

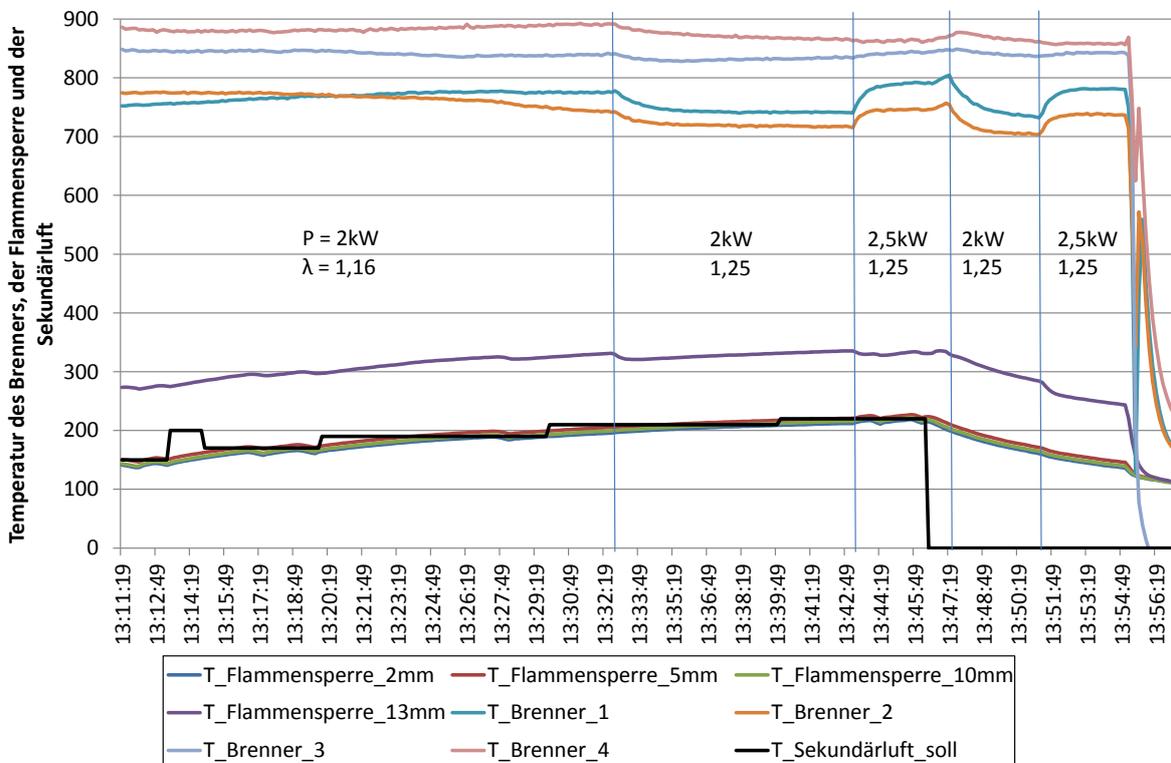


**Abbildung 17:** Zeitlicher Temperaturverlauf eines ersten Versuchs mit Erdgas bei einer Leistung von 2 kW und einem Lambda zwischen 1,1 und 1,25.

Das Verhalten der Flammensperre, als durch Teerkondensation gefährdetes Bauteil, wurde in weiteren Experimenten näher untersucht. Dazu mussten zunächst die Thermoelemente im Porenbrenner aufgrund von Beschädigungen (der erste Satz bestand aus Typ K Elementen mit einem Durchmesser von 1 mm) ausgetauscht werden. Um die Lebensdauer zu erhöhen wurden Thermoelemente vom Typ B mit einem Durchmesser von 1,5 mm verwendet. Durch den höheren Durchmesser konnte die bisherige Positionierung nicht mehr erreicht werden, sodass die Temperaturverteilung sich zu den vorhergehenden Experimenten im Brenner etwas unterscheidet, jedoch die Aussagen nicht beeinflusst.

Ein Testlauf zur Bestimmung der Eigenschaften der Flammensperre ist in Abbildung 18 dargestellt. Zunächst wurde der Brenner, wie oben beschrieben, gezündet und eine stabile Verbrennung mit 2 kW und einer Luftzahl von 1,16 eingestellt. Nun wurde die Sekundärlufttemperatur stufenweise erhöht. Man erkennt deutlich, dass die unteren drei Temperaturen in

der Flammensperre fast ausschließlich von der Gaseintrittstemperatur abhängen. Die Temperatur unterhalb der Verbrennungszone steigt ebenfalls an. Die Temperaturen im Brenner werden jedoch in geringerem Maße beeinflusst, als zunächst vermutet. Bei einer Erhöhung der Luftzahl um 13:32:30 Uhr sinken die Temperaturen im Brenner ab und auch die Temperatur unterhalb der Verbrennungszone sinkt aufgrund der konvektiven Kühlung ab. Die anderen Temperaturen in der Flammensperre reagieren praktisch nicht auf den veränderten Volumenstrom. Bei konstanter Vorheizung wirkt sich eine Leistungserhöhung fast nur auf den Brenner aus. Die Reaktionszone nimmt nun mehr Raum ein. Die Temperatur knapp unterhalb der Flammensperre ( $T_{\text{Flammensperre\_13mm}}$ ) sinkt ganz leicht ab, da die konvektive Kühlung durch den höheren Gas- und Luftvolumenstrom ansteigt. Bei ausgeschalteter Luftvorwärmung sinken alle Temperaturen in der Flammensperre kontinuierlich ab. Nur der oberste Temperaturfühler in der Flammensperre reagiert auf die Leistungsänderungen im Brenner.

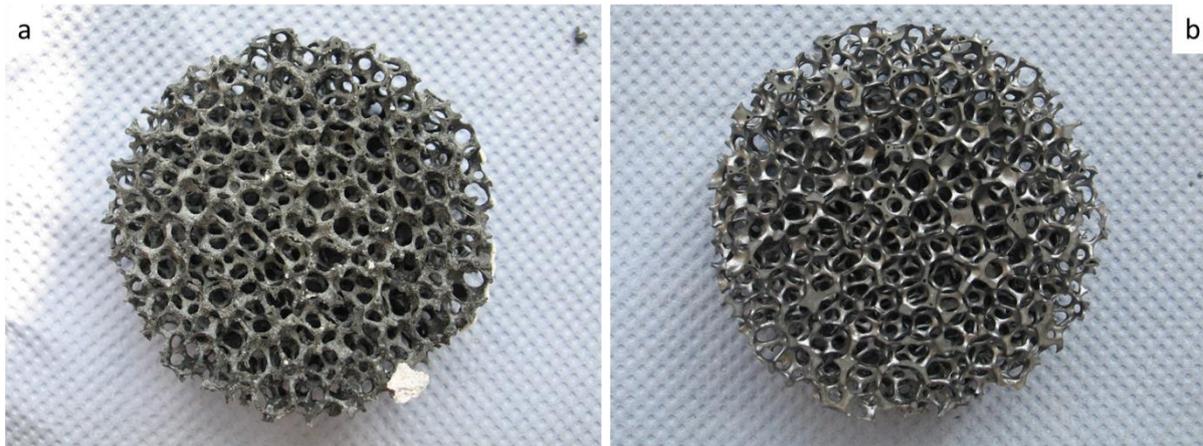


**Abbildung 18:** Zeitlicher Temperaturverlauf des Porenbrenners bei verschiedenen Vorheiztemperaturen und Leistungen.

Nach Abschluss der Experimente mit Erdgasbetrieb wurde der Brenner zerlegt und die Keramikschäume begutachtet. In Abbildung 19 sind zwei Keramikschäume im Vergleich dargestellt. Das linke Bild zeigt einen Keramikschäum nach Abschluss der Versuche mit alleinigem Erdgasbetrieb, im rechten Bild ist ein unbenutzter zu sehen. Man erkennt, dass die benutzte Keramik nicht mehr den metallischen Glanz und leichte Veränderungen an der Oberfläche aufweist. Die Grundstruktur ist dennoch stabil, sodass die Schäume wieder in den Brenner eingebaut und für die Experimente mit Holzgas verwendet werden konnten. Die Flammensperre wurde beim Ausbau leider beschädigt, wies aber ansonsten keine Verände-

rungen auf. Sie wurde beim Zusammenbau durch eine identische (Dicke und Pressdruck) ersetzt.

Fazit: Der Brenner konnte mit Erdgas ohne Probleme betrieben werden. Der Brenner verhielt sich dabei größtenteils erwartungsgemäß. Die Flammensperre allerdings leitete die Wärme nicht so effizient entgegen der Strömungsrichtung, was ein stärkeres Aufheizen erforderlich machte. Die Keramik überstand die Versuche problemlos und wird für weitere Experimente verwendet.



**Abbildung 19:** Keramikschäume a) nach Betrieb mit Erdgas und b) unbenutzter SiSiC Keramikschäum.

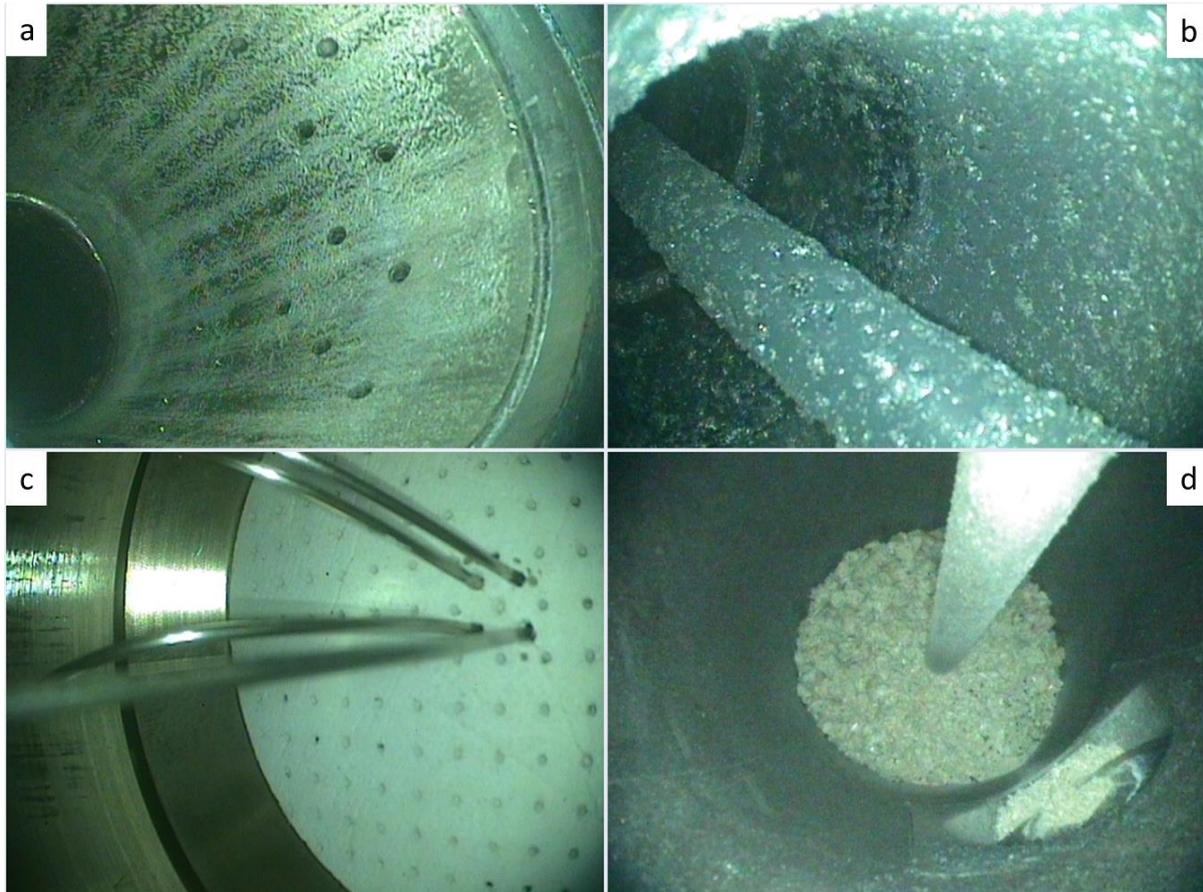
### 3.3 Brennerbetrieb mit Holzgas

Für den kombinierten Vergasungs-Brenner-Betrieb wurde die Abschlussplatte, die bisher den Brenner vom Vergasungsraum getrennt hatte, entfernt und der Weg über die Waschflasche verschlossen. Vor den ersten Kombiexperimenten wurden der Vergaser und das innere des Porenbrenners mit einem Endoskop untersucht. Dies ist in Abbildung 20 zu sehen. Die Zuführung der Sekundärluft und des Erdgases weisen nur aufgrund der Vorheiztemperaturen leichte Verfärbungen auf, die Vorkammer ist verschmutzungsfrei. Der Vergasungsteil weist fast überall leichte Ablagerungen auf, die sich allerdings leicht lösen lassen.

Zur Vorbereitung wurde außerdem ein Befüllvorgang beobachtet. Dabei zeigte sich, dass die verwendeten Pellets teilweise durch die Schnecke gemahlen wurden und dabei sehr feine Holzpartikel durch einen Gasstrom von unten ausgetragen werden können, sodass diese Partikel in den Brenner gelangen können. Bei geringer Gasmenge wird dieser Vorgang allerdings sehr schwach, sodass die Gefahr des Holzpartikelaustrags hauptsächlich während der Aufheizphase gegeben ist.

Für den ersten Versuch mit Vergaser-Brenner-Mischbetrieb wurde zunächst der Brenner gestartet und auf Temperatur gebracht. Später wurde die Luftverteilung zugunsten des Vergasers verändert, um diesen vorzuheizen. Der Vorheizvorgang dauerte länger als gewöhnlich, da die Primärluft mit Rücksicht auf den Brenner begrenzt werden musste. Die Reaktion setzte aber, wie bei den Vergasungsversuchen (Betriebsmodus 1), schlagartig ein, was zum Druck- und Temperaturanstieg führte. Hier zeigte sich dann, dass die gewählte Regelstrategie nicht schnell genug auf die Veränderungen reagieren konnte, sodass es zum Verlöschen

des Porenbrenners kam und der Versuch abgebrochen werden musste. Aufgrund der Wärmekapazität des Vergasers und der Brennstoffmenge im Vergaser entstanden noch zirka zwei Stunden Pyrolysegase, die nicht im Brenner verbrannt werden konnten.

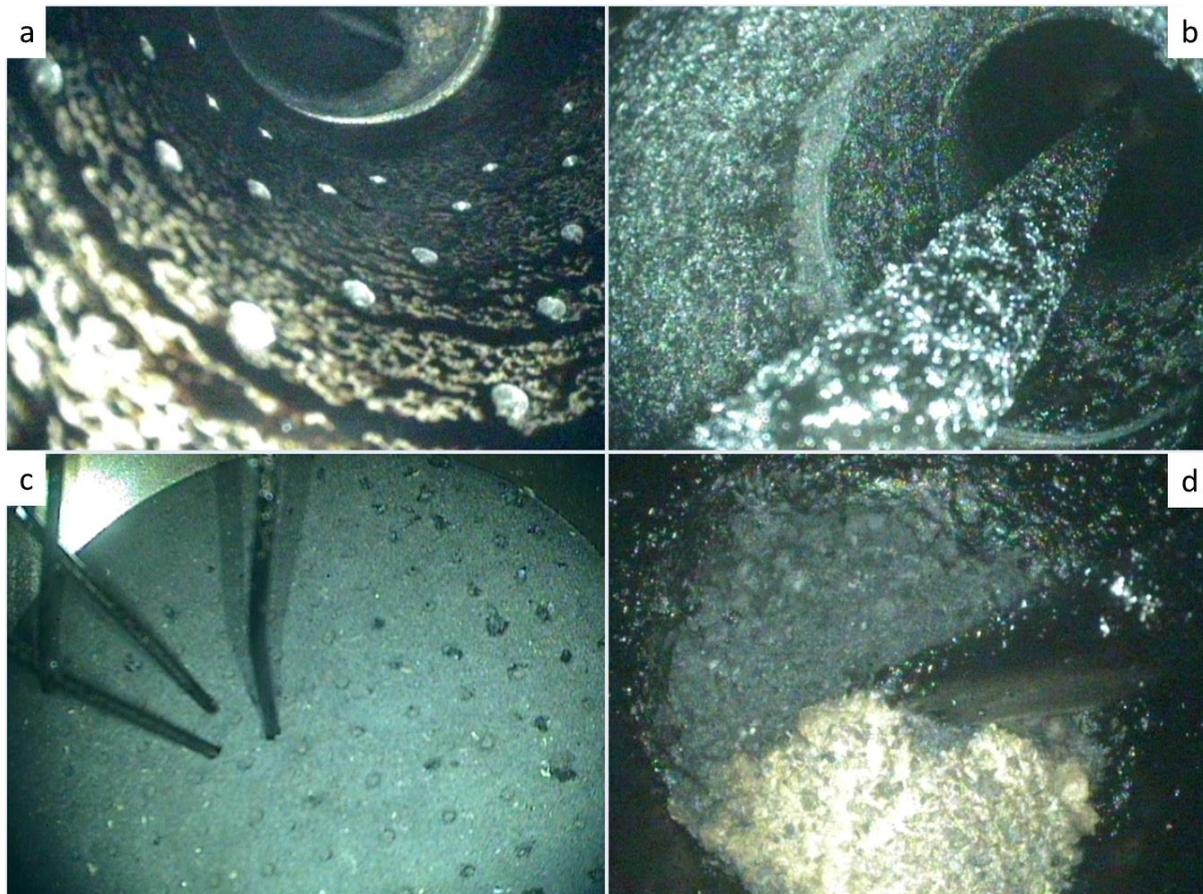


**Abbildung 20:** Innenansicht des Porenbrenners und Vergasers vor den ersten Kombinationsexperimenten: a) Mischkammer: Erdgas und Sekundärluftzufuhr über die Löcher von der Ringkammer. b) Oberer Teil des Vergasers mit Schutzrohr für Thermoelemente. c) Flammensperre mit Thermoelementen. Dahinter befinden sich die SiSiC Schäume. d) Unterer Teil des Vergasers, der über den Brennstoffeintrag (rechts unten) mit Pellets befüllt wurde.

Diese Pyrolyseprodukte führen letztendlich auch zu Ablagerungen im Brenner. Allerdings wurde durch die Flammensperre verhindert, dass kondensierbare Bestandteile in die eigentliche Verbrennungszone vordringen konnten. Diese konnte diese Bestandteile aufnehmen und ins Innere der Faserstruktur leiten, was auch ein Freibleiben der Löcher bewirkte.

In Abbildung 21 sind die Aufnahmen einer Endoskopkamera vom Inneren des Vergasers und des Brenners nach dem ersten Versuch zu sehen. Die Teerablagerungen auf der Rohrwandung der Mischkammer und an den Thermoelementen der Flammensperre sind deutlich sichtbar. Auch die Farbänderung der Flammensperre zeigt deutlich, dass diese sich mit kondensierbaren Holzgasbestandteilen vollgesogen hat. Auch das Innere des Vergasers zeigt das gleiche Bild. Die Ablagerungen an den Wänden und am Schutzrohr haben im Vergleich zum Zustand vor dem Experiment zugenommen. Auch verklebte die oberste Pelletschicht durch Teere und bildete einen Art Deckel mit darunterliegendem Hohlraum mit wenig verbliebenen Restkoks.

Die mit dem ersten Versuch gewonnenen Erkenntnisse flossen in eine überarbeitete Regelung ein. Des Weiteren wurde die Flammensperre des Brenners ausgetauscht und durch eine dünnere mit einer Dicke von nur noch 15 mm ersetzt.



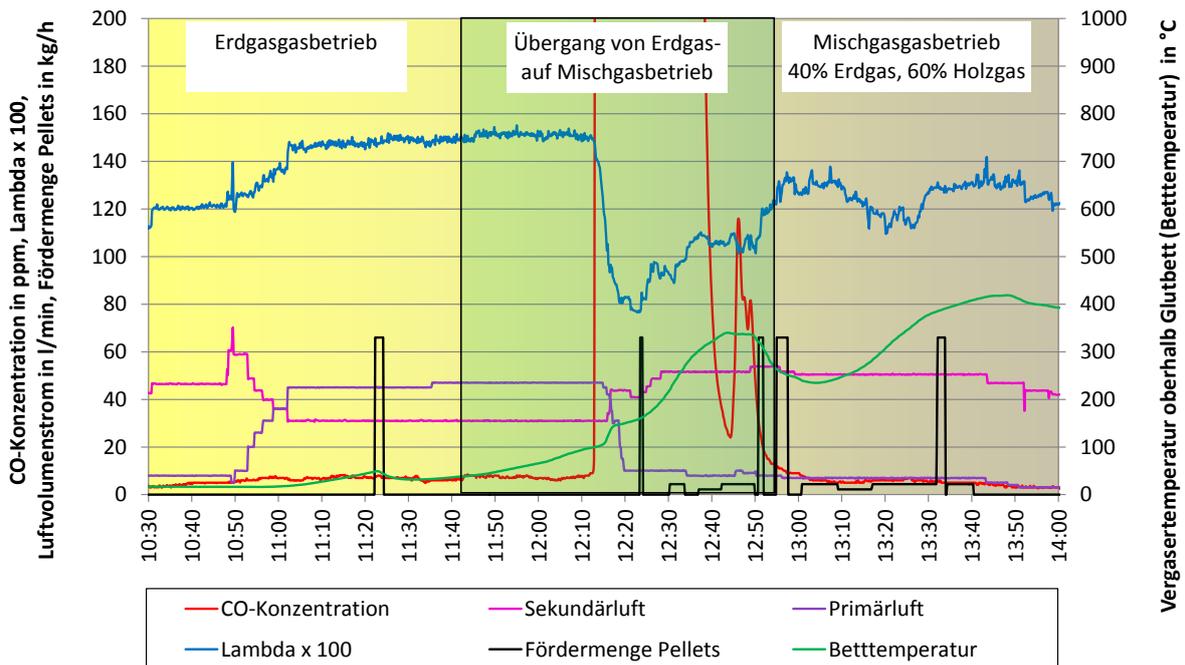
**Abbildung 21:** Innenansicht des Porenbrenners und Vergasers nach den ersten Kombinationsexperimenten: a) Mischkammer: Löcher für Erdgas und Sekundärluftzufuhr sind frei. Leichte Teerablagerungen an den Wänden. b) Oberer Teil des Vergasers mit Schutzrohr für Thermoelemente mit größeren Anbackungen. c) Flammensperre mit Thermoelementen: Teerablagerungen an den Thermoelementen und an der Flammensperre. d) Unterer Teil des Vergasers mit Restkoks und starken Teerablagerungen in der Reaktionszone.

Diese Veränderungen und die gesammelten Betriebserfahrungen führten schließlich zu einem über Stunden konstanten Betrieb. Exemplarisch wird der Versuchsvorgang, der auch so für die Staubmessungen durchgeführt wurde, im Folgenden beschrieben:

Zunächst wurde eine Primärluftmenge von 6 l/min als Sperrluft eingestellt. Der Brenner wurde dann mit Sekundärluft (70 l/min und 170 °C) auf 100 °C vorgeheizt und gezündet (Leistung 2 kW und  $\lambda = 1,1$ ). Nun beginnt der Übergang von der Gasverbrennung zur Biomassevergasung und Verbrennung. Dazu wird zunächst die Leistung des Brenners auf 3 kW erhöht. Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, wird dabei die Sekundärluftmenge auf 70 l/min erhöht. Danach wird stufenweise die Sekundärluft auf 30 l/min reduziert und die Primärluft erhöht bis sich eine Luftzahl von 1,5 einstellt. Die Untergrenze von 30 l/min ist notwendig, da die Sekundärluft auf 200 °C vorgeheizt werden soll, um die Gefahr der Teerkondensation zu verringern, und der Lufftherhitzer als Überhitzungsschutz einen Mindestdurchfluss benö-

tigt. Ab 30 l/min Primärluft wird der Primärlufferhitzer eingeschaltet und beginnt mit der Aufheizung des Vergasers. Nachdem die Temperatur im Vergaser zu steigen begonnen hatte, wurde der Vergaser mit der Pelletschüttung gefüllt. Die Luftzahl bleibt zunächst konstant und sinkt dann mit Einsetzen der Reaktion schlagartig ab, gleichzeitig steigt die CO-Konzentration. Dabei reagieren die Temperaturfühler im Vergaser zeitverzögert, da die Reaktion in der Nähe der Rohrwand bei den Eintrittsbohrungen stattfindet und die Pelletschüttung sowie das Schutzrohr die entstehende Wärme abschirmen.

Die CO-Konzentration stieg in dem dargestellten Beispiel bis auf 32 000 ppm an und die Luftzahl fiel auf 0,77. Dies zeigt auch an, dass Holzgas produziert wird. Um nun zu einem stabilen Vergasungs-Brenner-Betrieb zu gelangen, wird die Sekundärluftmenge erhöht, die Leistung, die durch Erdgas bereitgestellt wird, vermindert und auch die Primärluftmenge wird reduziert, um die Vergaserleistung zu drosseln. Zunächst lebt die Reaktion von der Pelletmenge, die anfangs in den Vergaser eingebracht wurde. Sobald die CO-Werte wieder zu sinken beginnen, wird die Brennstoffdosierung eingeschaltet und Pellets in den Vergaser gefördert. Die CO-Konzentration sinkt bis zum stabilen Vergasungsbetrieb wieder auf den ursprünglichen Wertebereich zwischen 5 ppm und 7 ppm ab. Die NO<sub>x</sub>-Konzentration schwankt bei stabilem Betrieb um 25 ppm. Die Luftzahl schwankte zwischen 1,1 und 1,4. Das Verhältnis von Holzgas zu Erdgas betrug 60% zu 40%.



**Abbildung 22:** Zeitlicher Verlauf der Vergasungsparameter, Übergang von Erdgas- auf Mischgasbetrieb, die Luftzahl wurde in dieser Abbildung mit 100 multipliziert.

Nach den Messungen musste der Vergaser wieder Heruntergefahren werden. Dafür wurde zuerst die Brennstoffzufuhr abgeschaltet und die Primärluft auf ein Minimum reduziert. Dabei wird die Restpelletmenge vergast. Dieser Vorgang nimmt viel Zeit in Anspruch, deshalb wurde die Primärluftzugabe gestoppt und stattdessen eine geringe Menge Stickstoff durch den Vergaser geleitet. Die Menge ist so gewählt, dass der Brenner davon nicht beeinflusst

wird. Somit sind im Vergaser die Oxidationsmechanismen gestoppt und es findet nur noch Pyrolyse statt. Sobald die Temperatur im Vergaser unter die Pyrolysetemperatur gefallen ist, kann dann der Brenner ausgeschaltet werden.

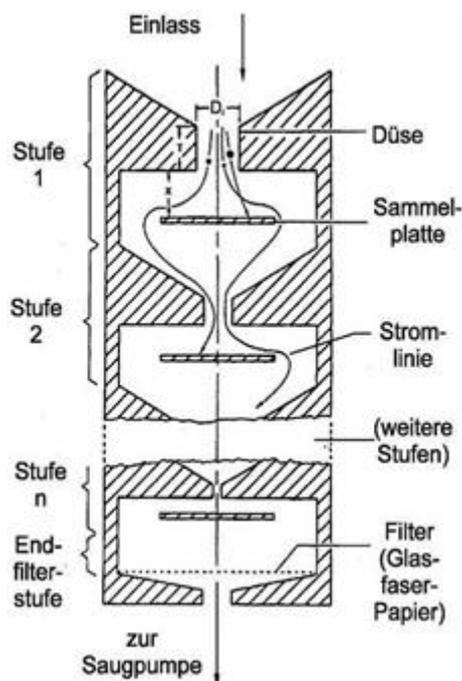
Trotz der guten Ausbrandqualität wurde ein langsam steigender Druckverlust über den Brenner gemessen, was darauf schließen lässt, dass ein Teil der kondensierbaren Bestandteile sich im Inneren der Faserkeramik der Flammensperre ablagert und so den Durchfluss behindert. Dies stellt leider ein Handicap für den Dauerbetrieb der Anlage dar. Mögliche Lösungen für dieses Problem können in einer höheren Vorheizung der Verbrennungsluft, einer Beheizung der Vorkammer und des Rohrbogens zum Brenner oder in einem ein veränderten Brennerdesign liegen.

Trotz der steigenden Druckverluste war ein emissionsarmer Betrieb über mehrere Stunden möglich, was die Potentiale des Konzeptes aufzeigt.

### 3.4 Partikelmesstechnik

Umfangreiche Recherchen führen zu dem Ergebnis, dass eine Kombination aus einer größenklassierten Echtzeit-Partikelanzahlkonzentrationsmessung im submikronen Bereich sowie einer (diskontinuierlichen) gravimetrischen Messung der Staubmasse notwendig ist.

Geeignete Messgeräte für diese Zwecke sind Impaktoren, die zur Gruppe der aerodynamischen Messmethoden zählen. In Impaktoren werden Aerosole in Düsen zunächst beschleunigt, danach werden die im Aerosol enthaltenen Partikel durch Trägheitsabscheidung bei der folgenden Umlenkung der Strömung abgeschieden. Bei Kaskadenimpaktoren werden Partikel verschiedener Größen in mehreren nacheinander folgenden Stufen fraktioniert abgeschieden. Hierbei wird die unterschiedliche Trägheit verschieden schwerer und damit unterschiedlich großer Partikel zur Trennung genutzt.



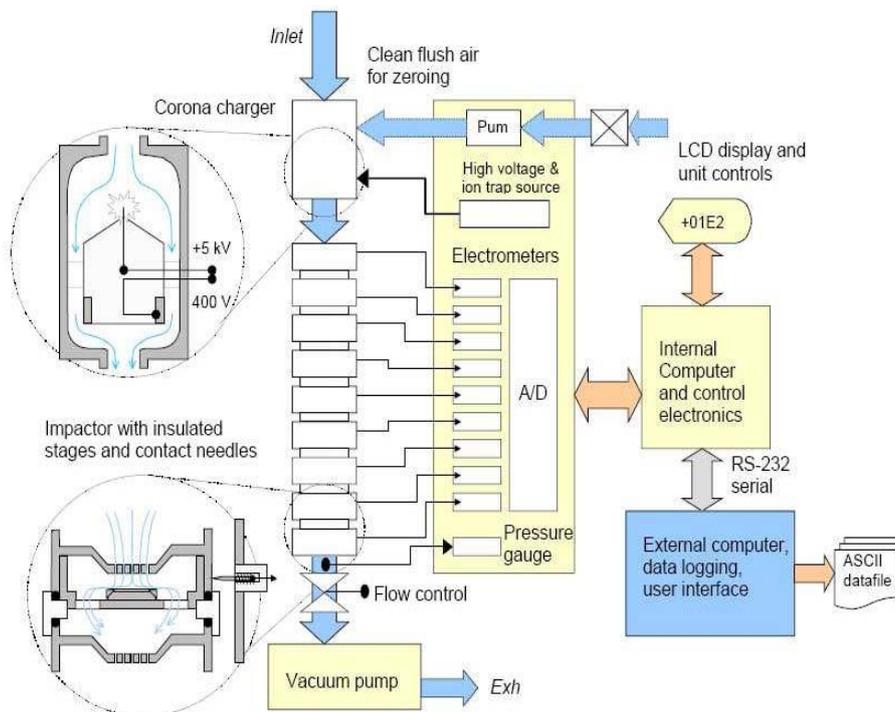
**Abbildung 23:** Funktionsweise eines Kaskadenimpaktors.

Der Aufbau eines mehrstufigen Impaktors ist in Abbildung 23 dargestellt. Eine Stufe eines Impaktors besteht immer aus einer Düse und einer in Strömungsrichtung nachfolgenden Prallplatte. Auf dieser werden Partikel mit entsprechender Trägheit gesammelt. Tritt ein mit Partikeln beladener Gasstrom in einen Kaskadenimpaktor ein, wird der Aerosolstrom in den Düsen von Stufe zu Stufe immer schneller beschleunigt, sodass sich auf der Prallplatte der ersten Stufe die trägsten (also die größten Partikel) sammeln, in den darauf folgenden immer kleinere Partikel. Das Abscheiden immer kleinerer Partikel wird durch die steigende Geschwindigkeit und/oder durch eine größere Ablenkung der Strömung erreicht. Da die aerodynamischen Eigenschaften von Partikeln von der Viskosität des Aerosols und damit vom Druck abhängen, liegt die kleinste abtrennbare Partikelgröße bei atmosphärischen Impaktoren im Bereich von  $d_a = 1 \mu\text{m}$ . Mit Niederdruckimpaktoren kann die Fraktionierung bis in den Bereich um  $0,01 \mu\text{m}$  abgesenkt werden.

Da das Partikelanzahlmaximum bei Verbrennungsaerosolen im Bereich  $< 0,1 \mu\text{m}$  liegt, wird bei den Untersuchungen ein elektrischer Niederdruckimpaktor (ELPI, Fa. Dekati Ltd., Finnland) mit zugehörigem Probenahmesystem im integrierter Aerosolverdünnung (FPS 4000, Fa. Dekati Ltd., Finnland) eingesetzt. Zusätzlich wird ein Planfilterkopfgerät für gravimetrische Gesamtstaubmessungen nach der (VDI, 2006) eingesetzt.

### 3.4.1 Elektrischer Niederdruckimpaktor ELPI

Das ELPI-System besteht aus den drei Komponenten Niederdruck - Kaskadenimpaktor, Dioden -Partikellader und Mehrkanal – Elektrometer (Abbildung 24).

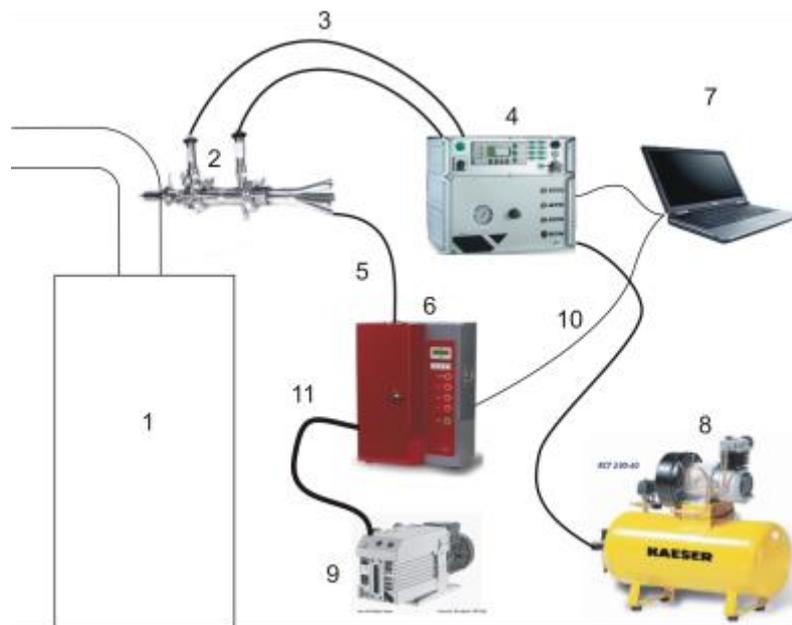


**Abbildung 24:** Funktionsweise des ELPI.

Der Partikellader lädt die Partikel auf eine vom Durchmesser der Partikel abhängige, genau bestimmbare Ladung auf. Die geladenen Teilchen werden anschließend im Kaskadenimpaktor in 12 Größenfraktionen aufgeteilt. Die Prallplatten der Impaktorstufen sind elektrisch

voneinander isoliert und jeweils mit dem Mehrkanalelektrometer verbunden. Dieses misst die von den impaktierten Partikeln abgegebene Ladung und berechnet daraus mittels der Ladeeffizienzfunktion die Partikelanzahl jeder Größenfraktion. Der Kaskadenimpaktor des ELPI besteht aus 13 Stufen und wird bei einem Druck von 100 mbar an der untersten Stufe betrieben. Dieser Druck wird durch eine Vakuumpumpe bereitgestellt. In der verwendeten Konfiguration können Partikel mit Durchmessern zwischen 7 nm und 10  $\mu\text{m}$  fraktioniert werden.

Der Versuchsaufbau zur Messung größenfraktionierter Partikelanzahlverteilungen in Echtzeit ist schematisch in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25:** schematischer Versuchsaufbau zur Messung der größenfraktionierten Partikelanzahlverteilung mit dem ELPI mit Probenahme und Verdünnungseinrichtung. 1 Heizkessel, 2 Probenahme mit Verdünnungseinrichtung (FPS4000, Hersteller Dekati Ltd.), 3 Verdünnungsluftversorgung, 4 Regelung der Rauchgasverdünnung, 5 elektr. Leitfähiger Schlauch (C-dotiert, Hersteller Tygon), 6 ELPI (Hersteller Dekati Ltd.), 7 Messrechner für Datenaufzeichnung der ELPI-Messwerte und Parameter der Rauchgasverdünnung, 8 Verdünnungsluftversorgung (partikelfrei, min. 4,5 bar, 375 l/min, Druckluftkältetrockner, Partikelfilter), 9 Vakuumpumpe (Typ Leybold Sogevac SV 25, bis 22,5 m<sup>3</sup>/h bei 100 mbar Unterdruck), 10 Datenleitung, 11 Saugleitung



**Abbildung 26:** Messung der Partikelgrößenverteilung mit dem ELPI an einem Holzpelletkessel.

### 3.4.2 Probennahme und Aerosolverdünnung

Um bei der Messung der größenklassifizierten Partikelanzahlkonzentrationen eine Verfälschung der Messergebnisse durch Kondensation in den nach geschalteten Aerosolleitungen und Messgeräten zu vermeiden und deren messbaren Konzentrationsbereich nicht zu überschreiten, muss das Abgas mit trockener, partikelfreier Luft verdünnt werden. Verwendet wurde dazu das Probenahme- und Verdünnungssystem FPS4000 des Herstellers Dekati Ltd. Die Verdünnung erfolgte in zwei Stufen:

1. Stufe: poröses Rohr, Verdünnung mit vorgewärmter, trockener, partikelfreier Luft, elektrische Mantelbeheizung;
2. Stufe: Ejektor - Verdüner, Verdünnung mit trockener, partikelfreier Luft.

Das Verdünnungsverhältnis ist mittels mehrerer Magnetventile variabel einstellbar und hängt von den jeweiligen Gegebenheiten bei den Anlagen ab. Es betrug zwischen 1:35 und 1:160. Die verdünnte Aerosolprobe hat am Austritt aus der Probenahme Temperaturen zwischen 25 °C und 45 °C. Die Wahl des Verdünnungsverhältnisses wird durch die maximal für das nachgeschaltete Messsystem zulässige Partikelkonzentration und der Verfügbarkeit der einstellbaren Verdünnungsverhältnissen am FPS4000 bestimmt. An die Probenahme können ohne zusätzliche isokinetische Teiler fünf verschiedene Messgeräte direkt angeschlossen werden, die jeweils mit gleichermaßen verdünntem Aerosol versorgt werden.

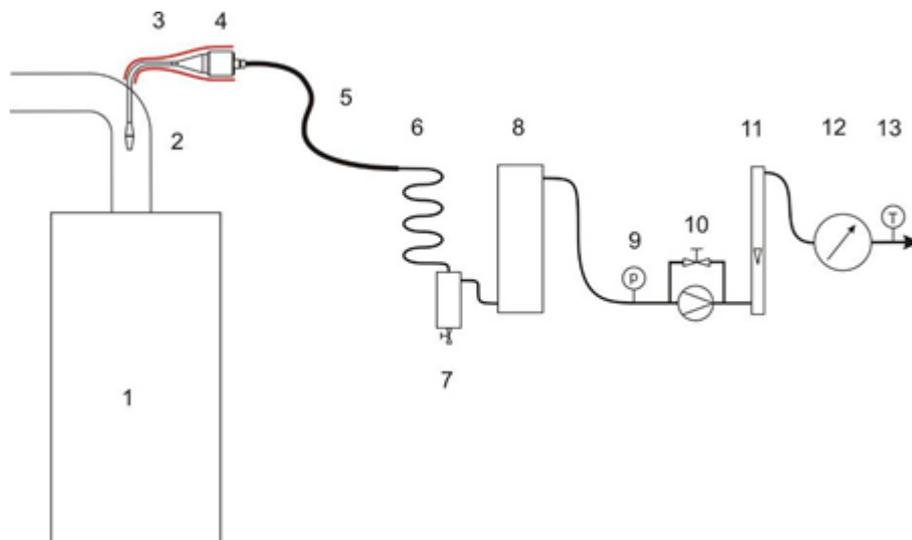
### 3.4.3 Planfilterkopfgerät

Im Rahmen des Vorhabens wurde ergänzend zum ELPI (größenklassierte Partikelanzahlkonzentration in Echtzeit) ein Planfilterkopfgerät der Firma Paul Gothe GmbH entsprechend der Richtlinie VDI 2066 Teil 2 (Abbildung 27) mit zugehöriger Probenahme nach VDI 2066 (Abbildung 2.6) eingesetzt. Es dient zur gravimetrischen Bestimmung der Gesamtstaubkonzentration im Abgas von Feuerungen.



**Abbildung 27:** Planfilterkopfgerät nach VDI 2066 – 2.

Die prinzipielle Anordnung entsprechend der VDI-Richtlinie 2066 zur Bestimmung des Teilgasvolumenstroms, dessen Staub auf den Filtern abgeschieden wird, ist schematisch Abbildung 2.6 in dargestellt.



**Abbildung 28:** Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Staubmessung nach der VDI-Richtlinie 2066 mit dem Planfilterkopfgerät. 1 Heizkessel, 2 Düse für isokinetische Probenahme, 3 elektrisch beheiztes Probenahmerohr, 4 elektrisch beheiztes Planfilterkopfgerät, 5 Silikonschlauch, 6 Cu-Kühlwendel, 7 Kondensatfalle, 8 Abgastrockenturm (Silikagel), 9 Manometer (Druckmessstelle), 10 Vakuumpumpe mit Bypass-Ventil (Volumenstrom ca. 1,8 m<sup>3</sup>/h, Druckverlust der Probenahme je nach Filterbeladung 0,1 bis 0,4 bar), 11 Schwebekörperdurchflussmesser, 12 Balgengaszähler, 13 Thermometer (Temperaturmessstelle).

Durch elektrische Beheizung wird die Temperatur des Impaktorgehäuses auf ca. 75 °C bis 85 °C eingeregelt, um Kondensation zu vermeiden. Die Messungen dauern je nach Staubkonzentration im Abgas ca. 15 – 60 Minuten, dabei werden etwa 500 – 1.000 Liter Rohgas möglichst isokinetisch abgesaugt. Die Messungen mit dem Impaktor erfolgen jeweils während eines möglichst stabilen Vollastbetriebszustands.



**Abbildung 29:** Probenahmesystem für die Messung mit dem Planfilterkopfgerät nach VDI 2066.

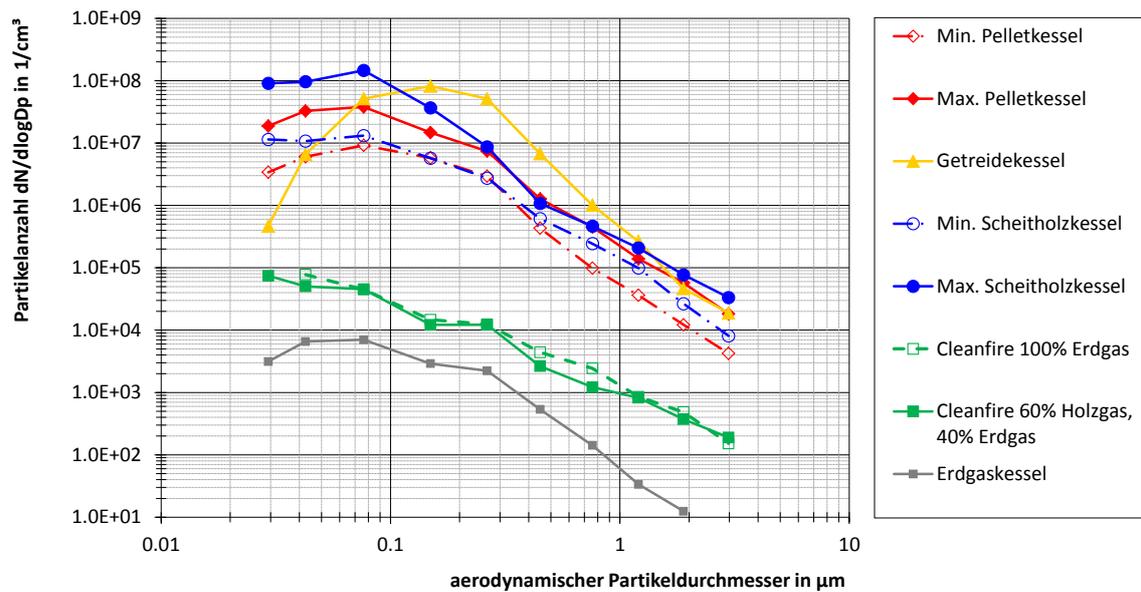
### 3.5 Staubmessungen

Zur Beurteilung des Emissionsniveaus des Cleanfire-Systems werden die Messergebnisse mit Messergebnissen von handelsüblichen Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen verglichen. Hierfür liegen In-Situ-Messergebnisse von verschiedenen Kleinfeuerungsanlagen im Leistungsbereich zwischen 15 und 35 kW<sub>th</sub> vor. In Abbildung 30 sind die ermittelten Größenverteilungen für unterschiedliche Feuerungssysteme und Brennstoffe dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Partikelgrößenverteilungen aller dargestellten Feuerungssysteme und Brennstoffvarianten ähnlich sind. Sie spiegeln die typische Größenverteilung von Partikeln aus Verbrennungsprozessen wider.

Wie zu erwarten liegt die Partikelanzahlkonzentration im Abgas des Erdgaskessels auf dem niedrigsten Niveau mit einem Maximum knapp unter  $10^4$  Partikel/cm<sup>3</sup>. Dies liegt daran, dass bei der Erdgasverbrennung prinzipiell keine anorganischen Partikel entstehen können. Partikel aus der Erdgasverbrennung können allenfalls geringe Mengen von Rußpartikeln aufgrund teilweise unvollständiger Verbrennung sein, die bei Erdgaskesseln eigentlich eher selten (z. B. bei Funktionsstörungen) auftritt.

Die Anzahlkonzentration der Partikel im Abgas der zu 100% mit Biomasse betriebenen Heizkessel (Getreide, Scheitholz, Holzpellets) liegt erwartungsgemäß auf dem höchsten Niveau mit Maxima zwischen  $10^7$  und  $10^8$  Partikel/cm<sup>3</sup>. Ursache dafür ist hier zusätzlich zur Bildung von Rußpartikeln bei unvollständiger Verbrennung die Bildung anorganischer Partikel durch Verdampfen und späterem Kondensieren mineralischer Bestandteile, die naturgemäß im biogenen Brennstoff vorhanden sind. Der Anteil unvollständiger Verbrennung ist aufgrund der Brennstoffbeschaffenheit und Feuerungstechnik bei fester Biomasse prinzipiell höher als beim Einsatz flüssiger oder gasförmiger Brennstoffe.



**Abbildung 30:** Typische Größenverteilung der Aerosolpartikel im Abgas von Kleinfeuerungsanlagen mit unterschiedlichen Brennstoffen.

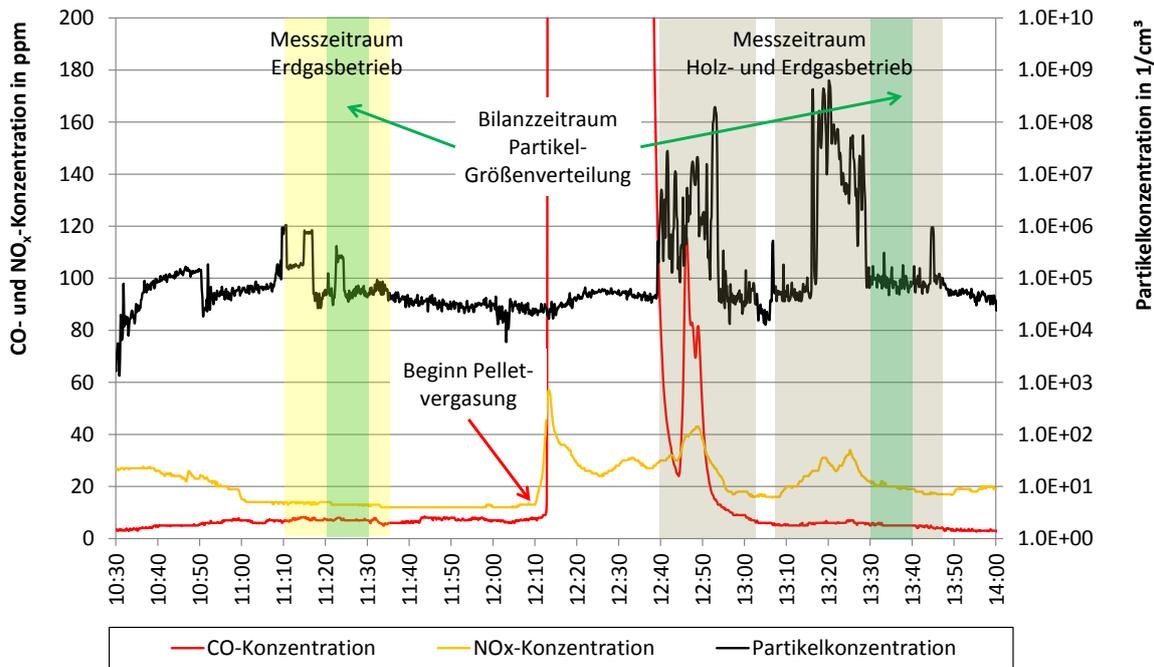
Die Anzahlkonzentration der Aerosolpartikel im Abgas des Heizölkessels liegt unterhalb der mit Biomasse und oberhalb des mit Erdgas betriebenen Heizkessels. Ursache dafür ist die gegenüber der Verbrennung gasförmiger Brennstoffe etwas unvollständigere Verbrennung beim Einsatz flüssiger Brennstoffe z. B. in Gebläsebrennern, in denen der flüssige Brennstoff zerstäubt und mit Verbrennungsluft gemischt und dieses Gemisch anschließend verbrannt wird.

Die Anzahlkonzentration der Aerosolpartikel im Abgas der Cleanfire-Anlage liegt bei reinem Erdgasbetrieb des Porenbrenners etwa eine Dekade über dem Niveau des Erdgaskessels. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass der Porenbrenner und die nachfolgende Abgaszone bisher noch nicht optimiert und auf einander abgestimmt wurden. Insbesondere beim Porenbrenner handelt es sich, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, um einen Experimentaltbrenner zur Prüfung der Materialeignung. Er ist nicht auf die Produktgasparameter und den Verbrennungsprozess der Cleanfire-Versuchsanlage optimiert.

Auch die Anzahlkonzentration der Aerosolpartikel im Abgas der Cleanfire-Anlage bei Mischgasbetrieb, etwa 40% Erdgas und 60% Holzgas aus der Holzpelletpyrolyse, liegt auf demselben Niveau wie beim reinen Erdgasbetrieb.

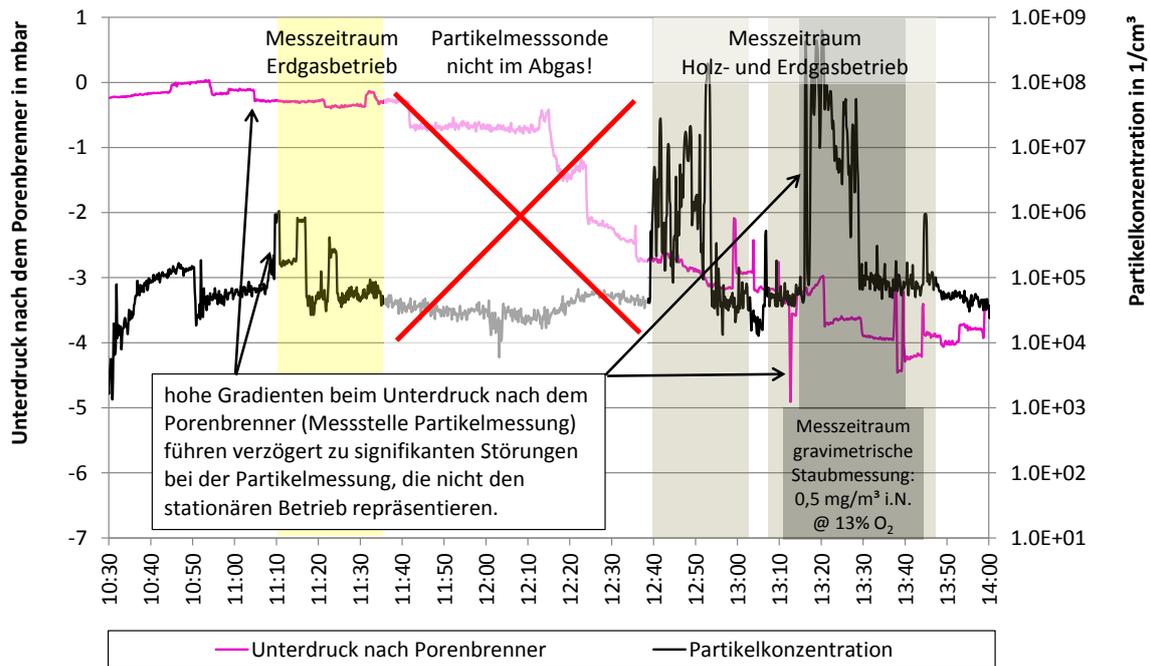
In Abbildung 31 ist der zeitliche Verlauf der CO-, NO<sub>x</sub>- und Partikelanzahl-Emissionen im Abgas der Cleanfire-Versuchsanlage nach dem Porenbrenner dargestellt. Zunächst wurde der Porenbrenner ausschließlich mit Erdgas befeuert. Anschließend wurden Holzpellets in den Vergaser gefördert und die Pyrolyse mittels vorgeheizter Primärluft in Gang gesetzt. Etwa ab 12:10 Uhr begann die Pyrolyse schlagartig. Da die Primär- und Sekundärluft manuell langsam angepasst wurden, konnte zunächst nicht das gesamte Holzgas im Porenbrenner umgesetzt werden. Dies ist an der erheblichen CO-Konzentration von etwa 12:10 Uhr bis etwa 12:50 Uhr zu erkennen. Ab etwa 13:00 Uhr stellte sich ein stationärer Betrieb ein,

bei dem im Porenbrenner etwa 40% Erdgas und 60% Holzgas aus der Holzpelletpyrolyse nahezu vollständig umgesetzt wurden. Die CO-Konzentration von unter 10 ppm verdeutlicht die nahezu vollständige Verbrennung der Brenngase im Porenbrenner. Aufgrund der unterstöchiometrischen Pyrolyse bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen können praktisch keine anorganischen Brennstoffbestandteile verdampfen und folglich auch nicht bei der Abkühlung nach der Verbrennung kondensieren. Daher liegen nach dem Porenbrenner keine Aerosolpartikel bildenden Vorläufersubstanzen vor.

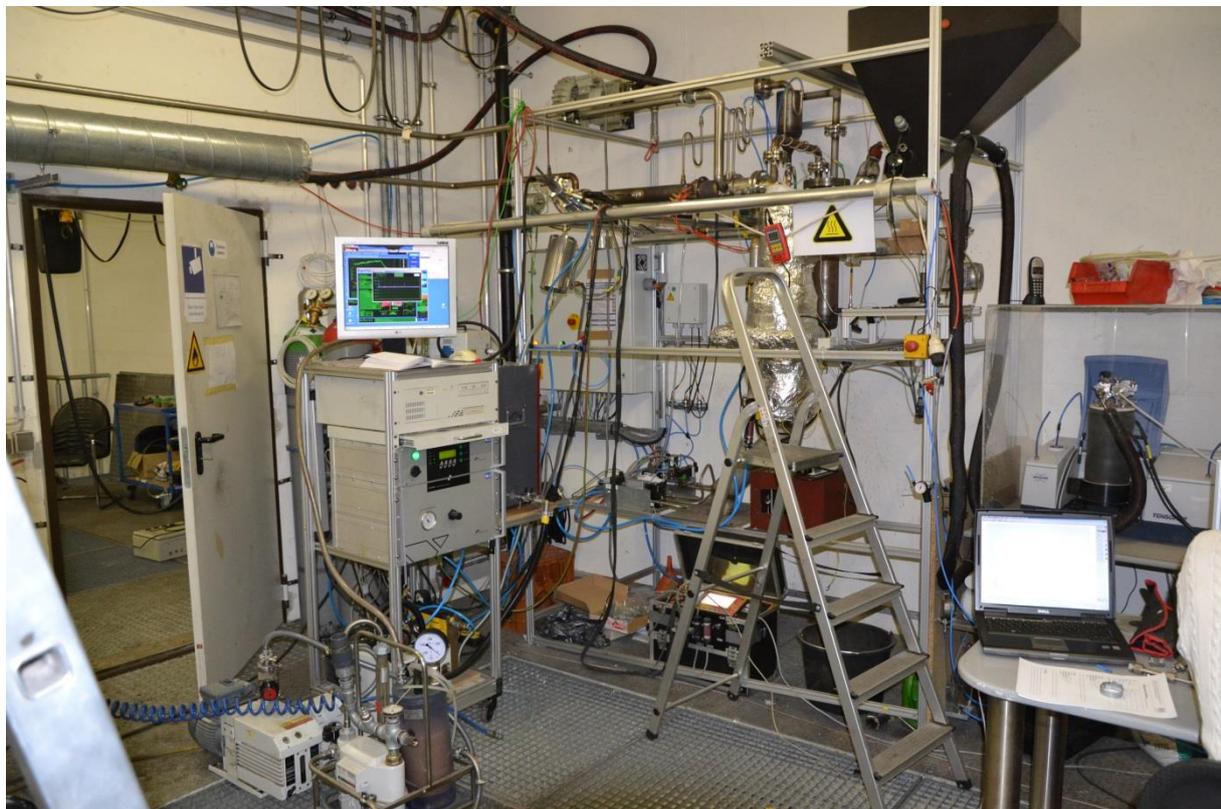


**Abbildung 31:** Zeitlicher Verlauf der Emissionen im Abgas der Cleanfire-Versuchsanlage nach dem Porenbrenner, farbliche Kennzeichnung der Partikelmesszeiträume.

Die signifikanten Schwankungen bei der Partikelanzahlmessung sind im Wesentlichen auf Druckschwankungen im Vergaser- und Porenbrennersystem zurückzuführen. Da insbesondere die exakte quantitative Beurteilung der Prozesse in der Pyrolysezone messtechnisch noch nicht möglich ist, kann das Cleanfire-System nicht vollautomatisch betrieben und entsprechend optimiert werden. Dies wirkt sich besonders auf die Druckverhältnisse im Pyrolysebehälter, den Druckverlust über den Porenbrenner sowie die Abgaskamin vorherrschenden Druckverhältnisse aus. Da an der Versuchsanlage der Unterdruck im Abgaskamin nur manuell eingestellt werden kann, ergeben sich hier beim manuellen Eingriff stets signifikante Druckgradienten, die signifikante Auswirkungen auf den Porenbrennerbetrieb haben. Auch ist denkbar, dass die schlagartigen Änderungen der Abgasgeschwindigkeit aufgrund schlagartig geänderter Druckverhältnisse zu zusätzlichen Artefakten bei der Partikelmessung führen. Einen Eindruck für die beschriebenen Einflüsse der Druckverhältnisse auf die Partikelanzahlmessung soll Abbildung 32 vermitteln.



**Abbildung 32:** Zeitlicher Verlauf des Unterdrucks nach dem Porenbrenner und der Partikelanzahlkonzentration im Abgas der Cleanfire-Versuchsanlage nach dem Porenbrenner; zwischen 11:35 Uhr und 12:40 Uhr befand sich die Messsonde nicht im Abgas.



**Abbildung 33:** Emissionsmessgeräte an der Cleanfire-Versuchsanlage.

Im Zeitraum zwischen 13:15 Uhr und 13:45 Uhr wurde zusätzlich eine gravimetrische Staubmessung mit Planfilter nach der VDI-Richtlinie 2066 durchgeführt. Dabei wurde aus dem Abgas nach dem Porenbrenner insgesamt ein Teilstrom von 1,00 m<sup>3</sup> entnommen und durch ein Planfilter geleitet. Dabei wurde eine Staubmasse von 0,94 mg bei Betriebsbedingungen abgeschieden. Durch Bezug auf Normbedingungen und Umrechnung auf 13% Restsauerstoff ergibt sich eine Staubkonzentration von etwa 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> bei 13% O<sub>2</sub>.

Diese Messergebnisse dokumentieren den Nachweis, dass mit dem Cleanfire-System eine nahezu emissionsfreie thermische Nutzung fester Biomasse umgesetzt werden kann.

## 4 Potentialstudie

### Arbeitspaket 4 und 5

Durchgeführt von Fst. 1, 2

Als erster Schritt der Studie wurde die Marktsituation in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz betrachtet. Zuerst wurden die vorhandenen Wohngebäuden und deren Altersstruktur, sowie deren Beheizungsstruktur betrachtet. Demnach existiert in diesen drei Ländern eine relativ große Anzahl an nicht renovierten Gebäuden und Gebäuden mit veralteter Heizungsanlage. Die energetische Sanierungsquote ist in allen Ländern sehr niedrig (ca. 1 % für Gebäude). Diese Situation stellt sich in allen drei Ländern ähnlich dar.

Unterschiede gibt es hingegen bei der Beheizungsart. Gas ist in Deutschland und Österreich der wichtigste Energieträger zur Wohnungsbeheizung, gefolgt von Öl. In der Schweiz hingegen dominiert Öl als Brennstoff den Heizungsbestand, während Fernwärme keine Rolle spielt. Der Bestand an Wärmepumpen ist stark zunehmend, da diese Heizungsform die höchsten Verkaufszahlen aufweist. Heizungen mit Holz sind in Deutschland trotz Förderung noch nicht so weit verbreitet. Hier nimmt Österreich mit einem Anteil von 21 % eine Vorreiterrolle ein. In der Schweiz stagniert der Holzanteil auf niedrigem Niveau (siehe Tabelle 1).

In den drei betrachteten Ländern wurden im Jahr 2009 rund 50 000 Biomasseheizungen verkauft. Diese Zahl ist aufgrund der geringen Marktanteile in Deutschland noch ausbaufähig. Die Zahl der verkauften Mini-BHKW liegt bei ca. 4 500 Stück, was einer installierten Leistung von 46 MW entspricht. Die letzten Jahre wiesen zudem eine steigende Tendenz auf. Das Öko-Institut (Gores, 2010) schätzt für das Jahr 2009 mit 10 MW zusätzlich installierter Leistung, die durch die Mini-KWK Förderung geschaffen wurde. Dies entspricht ca. 22 % der installierten Leistung. Nachteilig wird sich möglicherweise der Stopp<sup>1</sup> des Mini-KWK Impulsprogramms auswirken, da die dafür bereitgestellten Haushaltsmittel bereits ausgeschöpft sind.

Als Zweites wurde ein Überblick über die am Markt befindlichen Mikro-KWK-Anlagen gegeben. Als Technologien kommen hauptsächlich Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen und Stirlingmotoren zum Einsatz, wobei Mikro-KWK-Systeme mit Verbrennungsmotoren in Deutschland mit Abstand den größten Anteil haben. Diese Motor-KWK-Systeme werden fast immer mit Erdgas oder Öl betrieben. Brennstoffzellensystemen haben ihren Hauptabsatzmarkt in Japan. Stirling Motoren hingegen finden sich eher in Europa, aber ihr Marktanteil ist vergleichsweise gering. Biomasse-Mikro-KWK haben mit technischen Problemen zu kämpfen und befinden sich häufig noch in der Entwicklung oder sind vom Markt wieder verschwunden. Eine Auswahl über verschiedene Mikro-KWK-Systeme gibt Tabelle 6.

---

<sup>1</sup> Der Stopp ist mittlerweile wieder aufgehoben; seit 1. April 2012 können wieder Zuschüsse beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle gestellt werden.

**Tabelle 5:** Übersicht über die zur Wärmeerzeugung im Gebäudebereich verwendeten Heizungsarten und Energieträger jeweils in Prozent. Die Pfeile geben die Entwicklungstendenz an. Die Prozentwerte sind bezogen auf die Anzahl der mit dieser Heizungsart oder diesem Energieträger beheizten Wohnungen.

	Deutschland (2006)	Österreich (2009)	Schweiz (2009)
<b>Heizungsart</b>	%	%	%
Zentral- / Etagenheizung	79	63	91,1
Fernheizung	13	19,8	3,6
Einzelraumheizung	8	8	4,8
<b>Energieträger</b>	%	%	%
Gas	49↑	25↓	18,7↑
Heizöl	30↓	23↓	58,1↓
Fernwärme	13↓	21↑	3,6→
Holz	3*↑	21↑	6,8→
Strom	4↓	7↓	6,1↓
Wärmepumpe	--	2↑	5↑

\*beinhaltet neben Holzheizungen auch andere erneuerbare Heizungssysteme z. B. Wärmepumpe

**Tabelle 6:** Auswahl verschiedener Mikro-KWK-Systeme. Die grau hinterlegten Felder stellen Systeme auf Biomassebasis dar (Fischnaller, 2011), (Delta, 2011).

Bezeichnung	Hersteller	P <sub>el</sub> kW	P <sub>th</sub> kW	η <sub>el</sub> %	η <sub>ges</sub> %	Entwicklungsstand	Preis	Stand
lion – Powerblock Pellet	OTAG	2	19	8,5	89	Feldtest	--	--
Solo Stirling 161	SOLO Kleinmotoren	9,2	26	19 - 22	>75	Machbarkeit nachgewiesen	25 000	2001
TEK 40	Magnetmotor	40	88	28,5	--	Versuchsbetrieb	400 000	2001
Sunmachine	Sunmachine GmbH	3	15	20	90	Markteintritt / Insolvenz	23 000	2010
KWB Stirling	Stirling powermodul	1	15	--	--	Projekt eingestellt	5 000	2007
--	Stirling DK	35	215	--	--	--	--	2010
--	Maverar	35	105	25	88,3	--	--	--
WhisperGen	Whisper	1	7	11	92,1	Serienfertigung	19 000	2010
--	Lichtblick	19	31	--	90	Serienfertigung	5 000	2010
Dachs 5,5	Senertec	5,5	12,5	27	61	Serienfertigung	19 900	2010
ecopower	Vaillant	3	8	22,5	85	Serienfertigung	20 000	2010
Gamma 1.0 (PEM)	Baxi Inno-tech	1	1,7 – 21,7	32	91	Markteintritt 2013 – 2015	--	2011
BlueGEN (SOFC)	Ceramic Fuel Cells Ltd.	2	0,3 - 10	60 bei 1,5 kW	85	Serienfertigung	34 500	2011

Der dritte Teil der Potentialstudie beschäftigt sich mit den gesetzlichen Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten: Hier wurden vor allem die Regeln zur Emissionsbegrenzung und zur Energieeinsparung betrachtet. Die Förderinstrumente für Heizungserneuerungen und Mini-KWK-Anlagen in allen drei betrachteten Ländern variieren sehr stark und sind in der Schweiz und Österreich nicht bundesweit einheitlich. Allerdings werden umweltverträgliche neue Heizungsanlagen fast überall gefördert. Vor allem Investitionszuschüsse, wie das Mini-KWK Impulsprogramm, können der Marktdurchdringung von Mini-KWK-Anlagen helfen.

Als vorletzter Teil wurde die Wirtschaftlichkeit betrachtet: Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die ökologische Wirkung wurden konventionelle Heizkessel mit Mini-KWK-Anlagen auf Basis von Erdgas und Holz verglichen. Die Erlöse wurden aufgrund des KWKG mit einem Selbstnutzungsanteil von 60% berechnet. Weiterhin wurden verschiedene Konzepte zur Versorgung eines kleinen Nahwärmenetzes verglichen. Ein Vergleichssystem stellte immer ein Holzvergasersystem auf Basis des Cleanfire-Konzepts dar.

Betrachtung Mini-KWK-Anlagen: Für das betrachtete Gebäude (Einfamilienhaus, Altbau) war das Gasbrennwertgerät am kosteneffizientesten. Darauf folgen mit annähernd gleichen Kosten der Pelletkessel, das Cleanfire-KWK-System und der Brennwertkessel mit solarer Unterstützung. Die Gas-KWK-Anlage (Stirlingmotor) schnitt bei dem betrachteten Vergleich am schlechtesten ab. Ein Grund dafür ist, dass diese eine etwas zu geringe Leistung für das untersuchte Haus hatte und somit der integrierte Zusatzbrenner sehr oft in Betrieb war. Gas-Mikro-KWK mit Ottomotor haben geringere Investitionskosten im Vergleich zum Stirlingmotor und sind damit ähnlich wirtschaftlich wie Biomasse-Mikro-KWK-Systeme. Der größte Nachteil der Mini-KWK-Anlagen besteht in ihren hohen Investitionskosten, die sich aufgrund der niedrigen Volllaststundenzahl stark auf die Wärmeerzeugungskosten auswirken.

Betrachtung Nahwärmenetz: Für die Berechnungen wurde ein kleines Heizwerk mit einer Leistung von 500 kW im Auslegungsfall angenommen. Dabei soll die Grundlast von einem Cleanfire-Vergaser mit Kraftwärmekopplung und 100 kW thermischer Nennleistung bereitgestellt werden. Die Spitzenlast wird mit einem Gaskessel abgedeckt. Diese Variante wird mit einem System aus zwei konventionellen Hackgutkesseln, einem Hackgut- und Gaskessel und einem einzelnen Gaskessel verglichen. Hier schnitt der alleinige Gaskessel am schlechtesten ab. Die Hackgutkombinationen waren aufgrund der niedrigen Brennstoffkosten am kosteneffizientesten. Das Cleanfire-KWK-System verursacht zunächst gleiche Kosten wie ein einzelner Gaskessel. Die Zusatzerlöse, die durch den Stromverkauf (KWKG oder EEG) erzielt werden, verbessern die Wirtschaftlichkeit deutlich. Die Wirtschaftlichkeit der Hackgutkessel wird dennoch nicht erreicht.

Als letztes wurde die ökologische Wirkung betrachtet: Bei der ökologischen Wirkung der Systeme wurden der nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen betrachtet. Der in den KWK-Anlagen produzierte Strom reduziert diese beiden Größen, da diese den Strom quasi als Nebenprodukt zur Wärmeerzeugung generieren und so Strom aus dem deutschen Kraftwerksmix ersetzen. Die gasbefeuerten Systeme verursachten die höchsten Primärenergieverbräuche und Emissionen. Die Kombination von Solaranlage und Gasbrennwertkessel ermöglichte nur leichte Verbesserungen, da der positive Effekt der Solaranlage teilweise durch Speicherverluste wieder kompensiert wurde. Durch die Verwendung des Brennstoffs Holz haben der Pelletkessel und das Cleanfire System den geringsten Primärenergieverbrauch und die niedrigsten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Das Cleanfire KWK-System wird sogar CO<sub>2</sub> und Primärenergie eingespart, da die Stromproduktion viel weniger CO<sub>2</sub> als der Kraftwerksmix verursacht. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei der Betrachtung des Nahwärmenetzes. Je größer der Biomasseanteil an der Wärmebereitstellung ist, desto positiver ist die ökologische Bilanz.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse und die ökologische Bewertung wurden von Kreislaufsimulationen unterstützt. Die Ergebnisse decken sich bis auf kleinere Abweichungen mit denen der Berechnungen. Für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb muss ein ausreichend hoher Wärme- und Strombedarf, wie er bei Mehrfamilienhäusern oder Handwerksbetrieben mit Wärmebedarf vorkommt, vorhanden sein und auch muss eine gewisse Gleichzeitigkeit der beiden Bedarfe bestehen, um einen hohen Eigennutzanteil des Strom zu erreichen, was die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern kann.

Aufgrund der großen Anzahl an zu erneuernde Heizkessel ist eine große Menge an potentiellen Kunden vorhanden. Die positiven ökologischen Eigenschaften sprechen für den Einsatz einer auf Holz basierenden KWK Technik. Allerdings sind die hohen Investitionskosten und die geringere Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Gaskesseln noch ein Hemmnis, zumal die benötigt hohen Volllaststunden nur in schlecht gedämmten Altbauten (EFH) erreicht werden. Alternativ für diese Technik sind kleine Bürogebäude, Mehrfamilienhäuser oder kleine Betriebe mit Wärmebedarf geeignet. Um die Attraktivität zu erhöhen, sind Programme wie die nun wieder gültige Mini-KWK-Förderung sehr wichtig.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt Cleanfire war es Ziel, Biobrennstoffe, wie Holzpellets effizient und emissionsarm für die Wärmebereitstellung und für Mikro-KWK-Anlagen zu nutzen. Zu diesem Zweck wurde ein 10 kW Gegenstrom Festbettvergaser mit angeschlossenem Porenbrenner entwickelt.

Der Gegenstrom-Festbettvergaser produziert ein sehr staubarmes aber teerreiches Gas, dadurch dass die Vergasungsreaktion und die Pyrolyse im unteren Bereich des Vergasers stattfindet. Das Holzgas strömt anschließend durch die kältere Brennstoffschüttung und kühlt dabei ab, was zur Kondensation von Alkalimetallen, die oft die Keimzelle für Stäube bilden, führt. Dieses staubarme Holzgas wird dann anschließend in einem angeflanschten Porenbrenner verbrannt.

Der Porenbrenner besteht aus zwei Zonen: Der Flammensperre und der Verbrennungszone. Die Flammensperre aus gepresster Aluminiumoxid-Faserkeramik ist eine zylindrische Platte mit 200 millimetergroßen Bohrungen und verhindert einen Flammenrückschlag in die Mischkammer. Die Verbrennungszone besteht aus einer porösen Keramikstruktur ( $\varnothing$  60 mm und Höhe/Dicke 3 mal 20 mm) aus Siliziumcarbid, innerhalb der die eigentliche Verbrennungsreaktion stattfindet. Der Vorteil besteht darin, dass durch den Festkörper und den damit erheblich verbesserter Wärmetransporteigenschaften eine sehr gute Wärmeauskopplung möglich ist. Auch wird das Brenngas durch den Wärmerücktransport vorgeheizt, was es ermöglicht auch niederkalorische Gase, z. B. Holzgas, sicher zu verbrennen. In einem solchen Fall ist ein Startbrennstoff erforderlich, um den Brenner auf Betriebstemperatur vorzuheizen. Der Porenbrenner wurde wie der Vergaser auf eine Leistung von 10 kW ausgelegt und ist horizontal eingebaut.

Die Versuchsanlage aus Vergaser und Brenner wird über eine SPS gesteuert und kann in drei Betriebsmodi gefahren werden: alleiniger Vergaserbetrieb, alleiniger Brennerbetrieb (nur Erdgas) und kombinierter Vergaser- und Brennerbetrieb. Die ersten beiden Betriebsweisen dienen dazu, das Verhalten der Anlage kennen zu lernen, während die dritte, die die eigentliche Zielstellung des Projekts abbildet, für die Emissionsmessungen verwendet wurde.

Parallel zu den ersten Versuchen wurde der Brenner mit Ansys Fluent simuliert. Hierbei konnte das Verhalten des Brenners qualitativ gut abgebildet werden. Die Druckverluste und die Temperaturverteilung stimmen mit den Messungen gut überein. Die Temperaturen der Verbrennung werden bei der Simulation noch überschätzt. Aber dennoch ist die Simulation geeignet, um den Brenner hinsichtlich Wärmeübertragungsverhalten und Langzeitstabilität zu optimieren.

Zur Emissions- und Staubmessung wurde der Brenner mit Erdgas gestartet und die Leistung auf 3 kW erhöht. Anschließend wurde der Vergaser vorgeheizt, in dem der Sekundärluftstrom zugunsten der Primärluft verringert wurde. Sobald sich ein Temperaturanstieg im Vergaser zeigte, wurde die Brennstoffschüttung in den Vergaser gefördert und weiter aufgeheizt, bis die Holzpellets zündeten. Nun wurde die Primärluftmenge soweit reduziert, so dass keine Verbrennung, sondern Vergasungsreaktionen stattfinden. Des Weiteren wurde

die Erdgasleistung reduziert und die Sekundärluftmenge wieder erhöht, um das Holzgas vollständig zu verbrennen. Mit den Messungen wurde begonnen, sobald sich nach dem Übergang ein stationärer Zustand eingestellt hatte. Zur Feinstaubmessung wurde mit einem Planfiltermessverfahren nach der VDI Richtlinie 2066 und einem Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) gemessen. Die CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen konnten durch das FTIR Spektrometer und mit einem Eheim Visit Abgasmessgerät gemessen werden.

Diese Versuche zeigten einen sehr niedrigen Staubgehalt von nur 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> bei 13% Restsauerstoff, CO-Konzentrationen zwischen 4 und 8 ppm und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen um 25 ppm, was für Anlagen in diesem Leistungsbereich sehr gute Werte darstellen. Allerdings ist ein langsam steigender Druckverlust über den Brenner bei Holzgasbetrieb festzustellen, was einen Betrieb der Versuchsanlage über mehrere Tage noch nicht zulässt.

Zur Weiterentwicklung sind weiterführende Untersuchungen hinsichtlich geeigneter Werkstoffe insbesondere in Hinblick auf die Langzeitstabilität des Porenbrenners erforderlich. In diesem Rahmen muss das Vergaser-Brenner-System weiterentwickelt und optimiert werden. Dabei muss ein wesentliches Ziel sein, eine abgestimmte Pyrolyse- und Brennerleistungsmodulation zu erreichen, um das Cleanfire-System auch im nicht-stationären Zustand nahezu emissionsfrei und betriebssicher einsetzen zu können.

Die Einsatzpotentiale einer solchen Technologie wurden in einer begleitenden Potentialstudie untersucht. Dazu wurden das Alter und die Beheizungsstruktur in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz mit dem Ergebnis betrachtet, dass ein Großteil der Heizungsanlagen in diesen Ländern veraltet ist und bisher nur in Österreich Biomasseheizungen eine deutliche Rolle spielen. Von anstehenden Ersatzinvestitionen der alten Heizungsanlagen kann in Zukunft zwar der allgemeine Heizungsmarkt profitieren, aber Biomasseheizungen sind aufgrund der höheren Investitionskosten im Vergleich zu Erdgas und auch wegen gestiegener Brennstoffpreise häufig eine zu teure Alternative.

Mikro-KWK-Systeme sind im Vergleich zu normalen Heizungssystemen ein Nischenprodukt und verwenden hauptsächlich Erdgas als Brennstoff. Die wenigen Systeme mit Biomasse befinden sich noch in der Entwicklung oder sind wieder vom Markt verschwunden. Gründe dafür sind häufig technische und auch wirtschaftliche Probleme. Die Wirtschaftlichkeit wurde im dritten Teil der Potentialstudie näher untersucht. Dabei zeigte sich, dass Biomasse-Mikro-KWK-Systeme sich unter folgenden Bedingungen wirtschaftlich darstellen lassen. Zunächst ist ein großer Wärmebedarf notwendig, um eine genügend hohe Auslastung des Systems zu erreichen. Dies können beispielsweise unsanierte Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser oder kleine Gewerbebetriebe mit Wärmebedarf sein. Zum zweiten muss der Strombedarf so hoch sein, dass ein möglichst hoher Anteil des erzeugten KWK Stroms selbst genutzt werden kann.

Die ökologische Bewertung zeigt, dass Biomasse Mikro-KWK-Anlagen einen zu einer Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergieverbrauch führen. Gerade die Stromproduktion, die als „Zusatzgewinn“ bei der Wärmeproduktion anfällt, senkt die Emissionen im Vergleich zum deutschen Kraftwerkspark deutlich.

Aus Umweltschutzaspekten wäre ein Zuwachs an Mikro-KWK-Anlagen sinnvoll. Aus wirtschaftlicher Sicht sind solche Systeme noch im Nachteil und nicht für jeden Gebäudetypus

geeignet, was auch die Marktdurchdringung schwierig macht, obwohl ein Großteil der Heizungssysteme erneuerungsbedürftig ist. Deshalb ist auch in Zukunft eine Förderung über das KWK Gesetz oder über Investitionszuschüsse erforderlich.

Technisch konnte im Projekt bewiesen werden, dass mit dem Cleanfire-Konzept eine emissionsarme Nutzung von standardisierter Biomasse möglich ist. Zu einem marktfähigen Produkt sind aber noch verschiedene Probleme zu lösen, die zum einen eine Weiterentwicklung eines besseren Regelkonzepts für den modulierenden Betrieb im Gebäude und eine Verbesserung der Langzeitstabilität betreffen.

## 6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

### Durchgeführte Maßnahmen

Die Potentialstudie wurde den Projektpartnern in Papierform als auch elektronisch ausgehändigt. (Projekttreffen im Juli 2011)

Ergebnisse wurden auf der European Biomass Conference in Berlin in einer Präsentation vorgestellt. (6. – 10 Juni 2010)

Weitere Ergebnisse wurden auf dem 3rd International Symposium on Gasification and its Application in Kanada vorgestellt. (14. – 17. Oktober 2012)

### Geplante Maßnahmen

Der Endbericht wird den Projektpartnern elektronisch und in Papierform übermittelt.

Die Versuchsergebnisse des Vergaser- und des Brennerbetriebs, insbesondere das Verhalten der Keramikstruktur bei der Verbrennung von Holzgas sollen in Zeitschriften wie FUEL, Biomass and Bioenergy oder Advances in Applied Ceramics eingereicht werden. (Sommer 2013)

## 7 Literaturverzeichnis

- (Cromme, 2002) Cromme, P.; Scheffler, M.; Greil, P.: Ceramic Tapes from Pre ceramic Polymers. In: Advanced Engineering Materials, Vol. 4 (11), S. 873 – 877, 2002
- (Delta, 2011) Delta Energy & Environment Ltd. (Hrsg.): Delta's Micro-CHP Market Statistics and Market Forecast, 2011
- (Durst, 1997) Durst, F.; Kesting, A.; Mößbauer, S.; Pickenäcker, K.; Pickenäcker, O.; Trimis, D.: Der Porenbrenner – Konzept, Technik und Anwendungsgebiete. In: Gaswärme International, Vol. 46 (6), S. 300 – 307, 1997
- (Fischnaller, 2011) Fischnaller, M.; Volz, F.; Kunde, R.; Spliethoff, H.; Gaderer, M.: Potentialstudie Cleanfire, Marktpotential, gesetzliche Rahmenbedingungen, Konkurrenz und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für ein Holzpelletvergaserkonzept zur sauberen dezentralen Bereitstellung für Wärme und Strom, 2011
- (Füssel, 2011) Füssel, A.; Böttge, D.; Adler, J.; Marschallek, F.; Michaelis, A.: Cellular Ceramics in Combustion Environments. In: Advanced Engineering Materials, Vol. 13 (11), S. 1008 – 1014, 2011
- (Gaderer 2008) Gaderer, M.: Wärmeversorgung mit Biomasse bei kleiner Leistung. Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München, Promotion, 2008
- (Gores, 2010) Gores, S.: Markt für Blockheizkraftwerke. Absatz 2009 und aktuelle Entwicklung. Öko-Institut e. V. Berlin. Präsentation vom 13 Dezember 2010
- (Kappauf, 2012) Kappauf, J.: CFD Simulation eines Porenbrenners. Lehrstuhl für Energiesysteme, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2012
- (Kunde, 2007) Kunde, R.; Gaderer, M. et al.: Praxistest zur Erhebung der Emissionssituation von Pelletfeuerungen im Bestand, Endbericht zum Forschungsvorhaben LfU 0103301049. Augsburg: LfU Augsburg (Landesamt für Umwelt), 2007
- (Kunde, 2007a) Kunde, R.; Gaderer, M. et al.: Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Praxistest zur Erhebung der Emissionssituation von Pelletfeuerungen im Bestand“, ZAE Bayern und Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2007.

- (Nussbaumer, 2002) Nussbaumer, T.: Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik der Holzvergasung. ETH Zürich, 7. Holzenergiesymposium, 2002
- (Obernberger, 2003) Obernberger, I., Carlsen, H. und Biedermann, F.: Sate of the Art and future developments regards small scale biomass CHP Systems with focus on ORC and Stirling engine technologies. Nordic Bioenergy 2003 conference, 2003
- (Oser, 2003) Oser, M.; Nussbaumer, T.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R.: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Bern, Schweiz: Bundesamt für Energie, 2003
- (Soraru, 2000) Soraru, G. D.; Kleebe, H.-J.; Ceccato, R.; Pederiva, L.: Developement of mullite-SiC nanocomposites by pyrolysis of filled polymethylsiloxane gels. In: Journal of the European Ceramic Society. Vol. 20, S. 2509 – 2517, 2000
- (StMUGV, 2006) Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit: Feinstaubbroschüre 2006, Artikel-NR: stmugv\_luft\_00007, Daten+Fakten+Ziele: Feinstaub - Diffuser Staub - Klares Handeln Fortschreibung, 2006
- (SWM, 2010) Stadtwerke München Service GmbH: Erdgasqualität im Verteilungsnetz Großraum München. [Online] 2011. [Zitat vom: 11. Januar 2011.] <http://www.swm.de/dms/swm/dokumente/schulen/downloads/erdgasqualität.pdf>
- (VDI, 2006) Verein Deutscher Ingenieure: Richtlinie 2066. (1975 und 1999). Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung. Berlin: Beuth Verlag, 2006