

Abschlussbericht

Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen
zweistufigen Filtrations- und Wäscher-Systems
zur Abscheidung von Feinstäuben aus Holz-
Kleinfeuerungsanlagen (30 bis 500 kW)

FNR Feinstaub



© Fraunhofer UMSICHT

erstellt für:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
Hofplatz 1
18276 Gülzow

Oberhausen, den 30. April 2009

FNR Feinstaub

erstellt von:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT

Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner

Osterfelder Straße 3

46047 Oberhausen

Projektteam:

Dipl.-Ing. Esther Stahl

Telefon: 0208 85 98-11 58

E-Mail: esther.stahl@umsicht.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Görgе Deerberg | Projektleiter

Telefon: 0208 85 98-11 07

E-Mail: goerge.deerberg@umsicht.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Josef Robert

Telefon: 0208 85 98-11 50

E-Mail: josef.robert@umsicht.fraunhofer.de

Urheberrechtshinweis

Copyright

Das Urheberrecht an den im Rahmen dieses Projektes von Fraunhofer UMSICHT erstellten Konzepten, Entwürfen, Analysen, Studien und sonstigen Unterlagen liegt bei Fraunhofer UMSICHT. Die Übertragung von Urheberrechten bedarf der Schriftform.

Der Auftraggeber ist zur Nutzung der vorliegenden Studie für die nach dem Auftrag vorgesehenen Zwecke berechtigt. Vervielfältigungen sind nur mit der ausdrücklichen Zustimmung von Fraunhofer UMSICHT zulässig. Veränderungen, Übersetzungen oder digitale Nachbearbeitungen sind nicht zulässig. Eine Weitergabe an Dritte mit Ausnahme von öffentlichen Fördermittelstellen oder Kapitalgebern ohne schriftliche Freigabe durch Fraunhofer UMSICHT ist nicht zulässig.

© Copyright Fraunhofer UMSICHT, 2009

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Vorgehensweise	5
4	Ergebnisse	7
4.1	Aufbau des Versuchsstands	7
4.2	Testbetrieb des Ofens	8
4.3	Mikrosiebfilter	11
4.3.1	Grundlagen zur Mikrosiebfiltration	11
4.3.2	Versuchsergebnisse I	13
4.3.3	Optimierung Versuchsfilter	15
4.3.4	Versuchsergebnisse II	16
4.3.5	Test an realen Anlagen	16
4.4	Abgaswäscher	18
4.4.1	Grundlagen zur Abgaswäsche	19
4.4.2	Konzipierung Versuchswäscher	20
4.4.3	Wahl des Waschmediums	20
4.4.4	Versuchsergebnisse I	21
4.4.5	Optimierung Versuchswäscher	22
4.4.6	Versuchsergebnisse II	23
4.4.7	Test an realen Anlagen	24
4.5	Gesamtsystem	25
4.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	27
5	Zusammenfassung und Ausblick	29
	Literatur	31

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Verfahrensschema 2-stufige Filtration mit Mikrosiebfiltration und Rauchgaswäsche	4
Bild 2: RI-Fließbild des realisierten Versuchsstands	7
Bild 3: Ofen und Versuchsstrecke	8
Bild 4: Partikelanzahlverteilung	10
Bild 5: Mikroskop-Aufnahme Mikrosieb (links) und Metallgewebe (rechts), jeweils 1.000-fache Vergrößerung	12
Bild 6: Manuelles Abstreifen des Filterkuchens	14
Bild 7: Modifizierter VersuchsfILTER	15
Bild 8: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads	16
Bild 9: Versuchsbetrieb an einem 200 kW- Hackschnitzelkessel	17
Bild 10: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads im Feldversuch	18
Bild 11: Rapsöl vor und nach Einsatz im Wäscher (2 Stunden Betriebszeit)	21
Bild 12: Teerabscheiderate Wäscher	22
Bild 13: Abscheidegrad des Wäschers in Abhängigkeit von Öltemperatur	23
Bild 14: Zweitstufiges Abscheidsystem aus Mikrosiebfilter und Wäscher – erste Entwicklungsstufe	25
Bild 15: Ergebnisse der gravimetrischen Staubmessung der Systeme am Hackschnitzelkessel	26
Bild 16: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads des Kombinationssystems	26
Bild 17: Druckverlust des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Gebläseleistung nach einer Betriebsstunde	27
Bild 18: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Abscheidesysteme	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Konzentration von Teerkomponenten im Abgas	11
Tabelle 2: Staubgehalte der Reingasmessungen	13
Tabelle 3: Vergleich verschiedener Absorbermedien	20

1 Einleitung

Laut WHO verkürzt sich durch Feinstaubbelastung der Luft die durchschnittliche Lebenserwartung in der Europäischen Union um 8,6 und in Deutschland sogar um 10,2 Monate [WHO, 2006]. In den nächsten 10 bis 20 Jahren gehört die Feinstaubreduzierung neben der Reduzierung von Treibhausgasen zu einem der zentralen Themen des nationalen und internationalen Umweltschutzes. Gleichzeitig werden in Deutschland biomassebasierte Kleinfeuerungsanlagen (Öfen, Pellet- und Hackschnitzelheizungen etc.)¹ stark propagiert, um die vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen. So geht man zurzeit von einem Anlagenbestand von ca. 14 Mio. Kleinfeuerungsanlagen in Deutschland aus, die ebenso viel Feinstaub emittieren, wie der Straßenverkehr [UBA, 2006].

Aufgrund der jüngsten Erkenntnisse hinsichtlich des Gefährdungspotenzials von Holzfeuerungen und des öffentlichen Drucks insbesondere infolge des Inkrafttretens der EU-Feinstaub-Richtlinie (1999/30/EG) beabsichtigt die Bundesregierung, die derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen für die von kleinen Holzfeuerungsanlagen ausgehenden Feinstaubemissionen drastisch zu verschärfen [UBA, 2006]. Der Referentenentwurf zur Novellierung der 1. BImSchV - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen lautet in Kurzform [BMU, 2007]:

- § Senkung der Leistungsgrenze für Emissionsanforderungen von 15 auf 4 kW Nennwärmeleistung (NWL)
- § Wiederkehrende Messungen bei Feuerungsanlagen ausgenommen Einzelraumfeuerungsanlagen, Typenprüfungen bei Einzelraumfeuerungsanlagen, zeitliche Begrenzung des Betriebs für Zusatzheizungen
- § Deutliche Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) und Staub; Umsetzung für Neuanlagen in zwei Stufen: ab Inkrafttreten und ab 01.01.2015
 - § Einzelraumfeuerungen: 100 mg/m³ (1. Stufe) und 40 mg/m³ (2. Stufe); Pelletöfen: 50 bzw. 30 mg/m³ (1. Stufe) und 30 bzw. 20 mg/m³ (2. Stufe)
 - § Pelletöfen: 60 mg/m³ (1. Stufe), 20 mg/m³ (2. Stufe)
 - § Heizkessel: 100 mg/m³ (1. Stufe), 20 mg/m³ (2. Stufe)
 - § Austauschverpflichtung von Altanlagen (lange Übergangszeit)
- § Bessere Beratung der Betreiber von Einzelraumfeuerungsanlagen im Rahmen einer Feuerstättenschau (alle 5 Jahre)

¹ Kleinfeuerungsanlagen sind Anlagen, die in den Geltungsbereich der 1. BImSchV fallen und daher keiner Zulassungsgenehmigung bedürfen. Die 1. BImSchV umfasst Holzfeuerungsanlagen, die eine Nennwärmeleistung von weniger als 1 MW aufweisen und ausschließlich naturbelassene oder gering belastete Brennstoffe verbrennen.

- § Überprüfung der Feuerstätte
- § Eignung der verwendeten Brennstoffe
- § Beurteilung der Asche

§ Aufnahme von Getreidefeuerungen, Pufferspeicher

Die angestrebten Staubgrenzwerte können von Holzfeuerungsanlagen ohne eine zusätzliche Entstaubungseinrichtung nicht eingehalten werden. Eine Ausnahme bilden moderne Pelletöfen, die sich durch sehr geringe Feinstaubgehalte im Abgas auszeichnen. Im Bereich der Sekundärentstaubung gibt es bislang nur sehr wenige marktfähige sogenannte Feinstaubfilter. Die Entwicklung von dezentralen technischen Lösungen zur Reduktion der Feinstaubemissionen ist daher ein dringend zu lösendes Problem.

Aktuelle Studien zeigen, dass die geltenden und die heute diskutierten zukünftigen Grenzwerte als ein Kriterium für Gesundheitsgefährdungen unzureichend sind, da sie sich auf die Staubmasse beziehen. Es ist mittlerweile bekannt, dass nicht die Masse, sondern vielmehr die Konzentration, Größe, Form und Stoffeigenschaften der Partikel entscheidende Parameter für das Gefährdungspotenzial von Feinstäuben sind. Zu Feinstäuben sind jedoch nicht nur die festen Partikel zu zählen, sondern auch Kondensate organischer Kohlenwasserstoffe (Teer), von denen ein besonderes Gefährdungspotenzial für die menschliche Gesundheit ausgeht. Bei der Biomasseverbrennung entstehen beide Fraktionen (feste und flüssige Partikel), je nach Güte der Verbrennung, in relevanten Mengen.

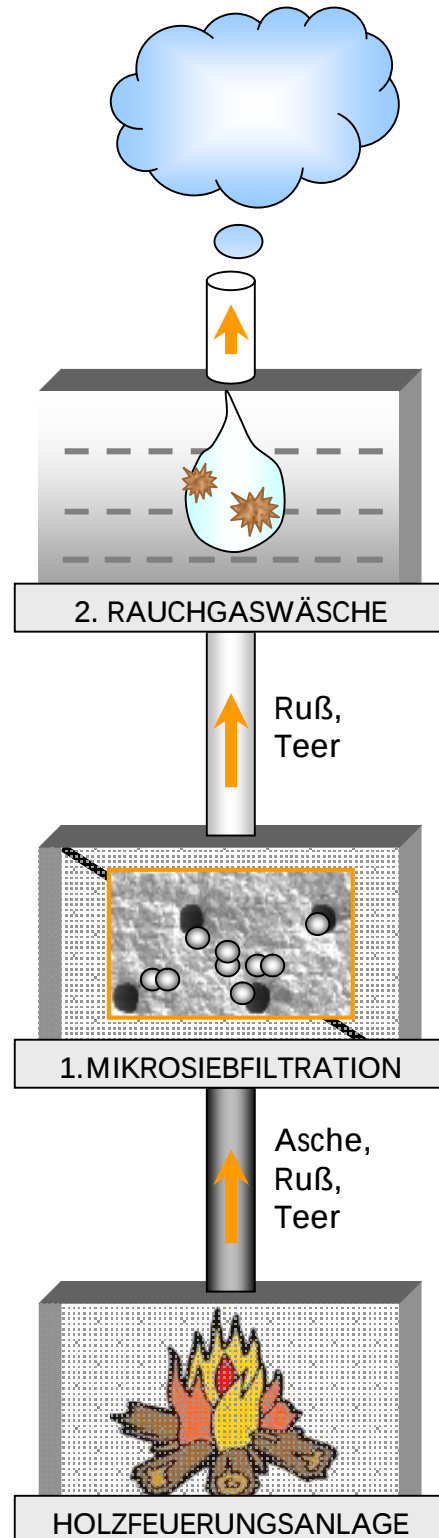
2 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Sekundärentstaubungsverfahrens mit zweistufiger Filtration/Wäsche, dessen technische Umsetzung in eine Demonstrationsanlage erfolgen soll. Mit diesem System sollen gesundheitsrelevante Partikel und Stoffe gezielt aus dem Abgasstrom von Holzfeuerungsanlagen entfernt werden. Dadurch sollen künftige Staubgrenzwerte eingehalten werden. Der Fokus liegt auf größeren Anlagen zur biogenen Festbrennstoffverbrennung zwischen 30 und 500 kW_{th}, die mit diesem System nachgerüstet werden könnten.

Der Lösungsansatz besteht in der Kombination zweier innovativer Verfahren aus der Verfahrenstechnik (Oberflächenfilter und Rauchgaswäscher) zur optimalen Entfernung sämtlicher Feinstaubbestandteile (Asche, Ruß und Teer) aus dem Abgasstrom (s. Bild 1). Eine Abscheidung mineralischer Abgasbestandteile wird durch innovative metallische Mikrosiebe erreicht, die weitgehend temperatur- und korrosionsbeständig sind und aufgrund ihrer Isoporen einen direkten Rückhalt der Feinstaubpartikel an der Sieboberfläche gewährleisten. Das Wäschersystem wird mit einem organischen Lösemittel betrieben, das im Abgasstrom enthaltende Teere fast vollständig absorbiert.

Auf Basis von Vorversuchen sollen zwei Konzepte zur Rauchgasreinigung von Holzfeuerungsanlagen entwickelt, umgesetzt und im Abgasstrom einer realen Feuerungsanlage betrieben werden. Schrittweise sollen die beiden Einheiten weiterentwickelt und schließlich im Feldversuch an einer größeren Versuchsanlage erprobt werden. Hier sollen Rückschlüsse auf weitere Anwendungsbereiche gezogen werden. Zunächst soll das entwickelte Konzept auf Anlagen zwischen 30 und 500 kW Nennwärmeleistung angepasst werden. Eine Übertragbarkeit auf Einzelfeuerstätten (Kaminöfen) soll überprüft und ggf. durchgeführt werden. Das Entstaubungssystem soll neben dem notwendigen Kriterium der zuverlässigen Feinstaubabscheidung und der Nachrüstbarkeit von Altanlagen perspektivisch den Ansprüchen an Bedienerfreundlichkeit, Wartungsarmut, geringem Platzbedarf und vor allem Investitions- sowie Betriebskosten (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) genügen.

Bild 1: Verfahrensschema 2-stufige Filtration mit Mikrosiebfiltration und Rauchgaswäsche



3 Vorgehensweise

Die technische Arbeitsplanung teilt sich in drei Phasen. Begleitet werden diese Abschnitte durch systematische Messungen und Auswertung der Verbrennungsparameter und Abscheideleistungen der einzelnen Verbrennungsphasen unter Verwendung verschiedener Brennstoffe.

Die beiden Konzepte (Mikrosiebfilter und Abgaswäscher) werden in der ersten Arbeitsphase konkretisiert und für einen Abgasstrom von ca. 15-30 Bm³/h ausgelegt. Ein Versuchsstand, bestehend aus einem Scheitholzofen und einer Versuchsstrecke (Teilstrom) wird errichtet und mit Hilfe einiger Verbrennungsversuche charakterisiert. Der Einbau der Versuchsabscheider erfolgt in der Versuchsstrecke. Unter kontrollierten Versuchsbedingungen wird das System schrittweise hinsichtlich der Filtrationsparameter Abscheideleistung, Druckverlust und Abreinigung optimiert. Zur Optimierung der Mikrosiebabscheidung werden zum Einen Metalllochfolien von Fraunhofer UMSICHT mit 3, 8 und 16 µm Porendurchmesser eingesetzt. Alternativ werden zwei verschiedene Metalldrahtgewebe (8 und 36 µm Filterfeinheit) verwendet. Das Wäschersystem wird unter Berücksichtigung des Lösungsvermögens der im Abgasstrom enthaltenen Teere optimiert und anschließend die Kombination der beiden Systeme überprüft, sowie eine Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt.

In einem zweiten Schritt sollen die beiden Systeme über längere Zeit hinsichtlich der Parameter Abreinigungszyklen, Störanfälligkeit/Betriebssicherheit und Lebensdauer (zeitlicher Verlauf der Abscheidung im Langzeitversuch) überprüft und anschließend für den flexiblen Einsatz in kleinen bis mittleren Holzfeuerungsanlagen (ca. 4 bis 500 kW) umgerüstet werden. Insbesondere die Eignung für andere (problematische) Brennstoffe wie Getreide oder Stroh soll hier ermittelt werden.

Abschließend soll der Betrieb an einer Anlage mit maximal 500 kW erfolgen. Die Abgasreinigung wird im Teilstrom betrieben. Die Reingasstaubgehalte über die Zeit sowie Abreinigungs- und Revisionsintervalle sollen überprüft werden.

Zur Charakterisierung der Verbrennungsbedingungen und Ermittlung der Staub- und Teergehalte werden die folgenden Mess- und Analysengeräte eingesetzt:

- § Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) der Firma TSI
Bestimmung des Mobilitätsäquivalenzdurchmessers von Partikeln im Größenbereich 5 – 560 nm
Sekundengenaue Auflösung Partikelanzahl und –verteilung

- § Gravimetrische Staubmessung nach VDI 2066 (Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung) der Firma Paul Gothe
- § Teermessung nach CEN/TS 15439 (Biomassevergasung - Teer und Staub in Produktgasen - Probenahme und analytische Bestimmung), eigene Zusammenstellung
- § Funkmesssonde A 600 (Gasanalytik) Firma Wöhler
O₂, CO, CO₂, NO, Abgasfeuchte, Temperatur, Gasgeschwindigkeit, Druckverlust
- § Druckcomputer DC 100Pro der Firma Wöhler
Bestimmung Differenzdruck
- § Tauchfühler Testo 925 der Firma Testo
Bestimmung Temperatur
- § Atmosphärendruckmessgerät GDH 200 der Firma Greisinger Electronic
- § Digitales Mikroskop VHX 100 der Firma Keyence
Optisches Lichtmikroskop mit einer 500 bis 5.000-fachen Vergrößerung zur optische Kontrolle der Mikrosiebe und Metallgewebe

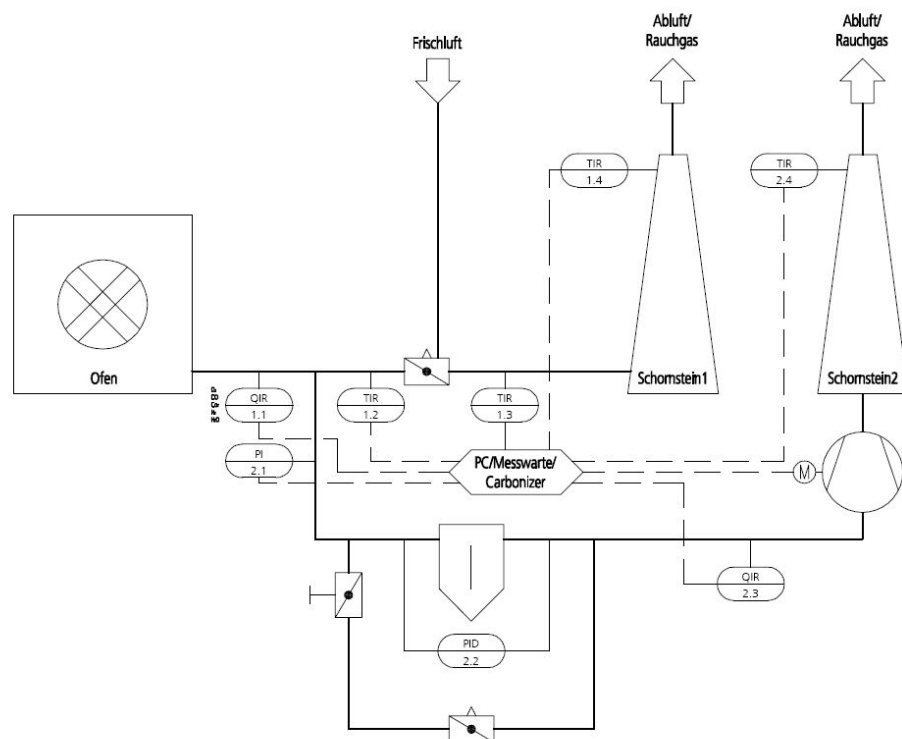
4 Ergebnisse

Im Rahmen der Projektarbeit wurden folgende Ergebnisse erzielt:

4.1 Aufbau des Versuchsstands

Der Versuchsstand ist in einem 20' Standardcontainer untergebracht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 2 dargestellt.

Bild 2: RI-Fließbild des realisierten Versuchsstands



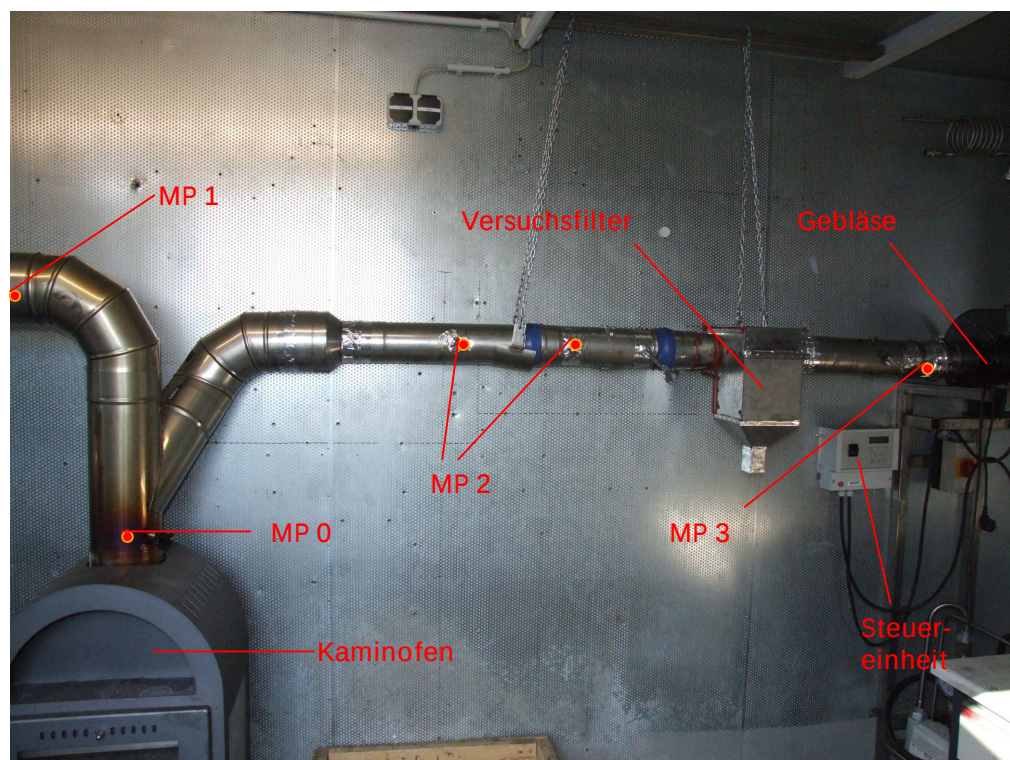
Als Feinstaubquelle dient ein handelsüblicher Kaminofen mit 7 kW Feuerungs-wärmeleistung. Die Abgase werden im Hauptstrom ($\varnothing 150$ mm) durch den Naturzug eines Schornsteins (Schornstein 1) aus dem Brennraum des Ofens gefördert. Ein Zugbegrenzer gewährleistet dabei durch das Einsaugen von Frischluft einen konstanten Unterdruck von 10 Pa im Abgasrohr des Hauptstroms, wodurch geregelte Verbrennungsbedingungen für den Ofen gewährleistet werden.

Der bzw. die Abscheider werden im Bypass betrieben. Ein Teilstrom der Verbrennungsabgase wird mittels eines Verdichters dem Hauptstrom entnommen und durch eine Versuchsstrecke ($\varnothing 100$ mm) und den zweiten Schornstein in die

Umgebung gefördert. Dabei durchströmt das Rohgas den/die Abscheider und wird hier teilweise gereinigt. Bei diesem Vorgang steigt der Strömungswiderstand und dadurch der hervorgerufene Druckverlust des Abscheiders. Um dennoch konstante Versuchsbedingungen zu gewährleisten, regelt eine MSR-Einheit (Steuereinheit) die Gebläseleistung mittels Drehzahlanpassung. Der Sollwert im Bypass soll 10 Pa betragen. So herrschen vergleichbare Strömungsbedingungen in beiden Abgasströmen und eine isokinetische Stromteilung und damit gleiche Partikelzusammensetzungen sind annähernd gewährleistet.

Zur Analyse des Verbrennungs- und Abscheidevorgangs sind einige Messpunkte in die Versuchsstrecke integriert (s. Bild 3). Die Messpunkte befinden sich direkt hinter dem Ofen (MP0), vor (MP1) dem Zugbegrenzer sowie vor (MP2) und hinter (MP3) dem Abscheider. Die gravimetrische Staubmessung nach VDI 2066 wird nur an den MP 2 und 3 betrieben, da auf eine Gasberuhigungsstrecke von 60 cm zu achten war. Zur Überwachung des Druckverlusts des Abscheiders wird ein Differenzdruckmanometer am Abscheider installiert.

Bild 3: Ofen und Versuchsstrecke



4.2 Testbetrieb des Ofens

Zur Erzielung möglichst reproduzierbarer Ergebnisse wurde ein allgemeiner Versuchsablauf definiert und das Abbrand- und Emissionsverhalten des Ofens

daraufhin charakterisiert. Das Entfachen des Kaminofens geschieht mit etwa 1.000 g abgewogenem Anmachholz und Papier. Der Primär- und Sekundärluftschieber wird dabei vollständig geöffnet und während der durchzuführenden Versuche in dieser Stellung gelassen. Somit ist eine optimale Luftzufuhr gewährleistet. Auf das sich bildende Glutbett (Feuer erloschen) wird nun 1.500 g Brennholz (Buche oder Birke), welches in zwei oder drei Scheite aufgeteilt ist, aufgelegt. Es kommt zur sogenannten ersten regulären Anbrandphase, die etwa 30 min andauert. Danach sind in der Regel alle Flammen erloschen und die Ausbrandphase beginnt. Das verbleibende, verkohlte Holz glimmt noch ca. 15 min. Anschließend kann durch Auflegen mit einem weiteren Abbrandzyklus begonnen werden.

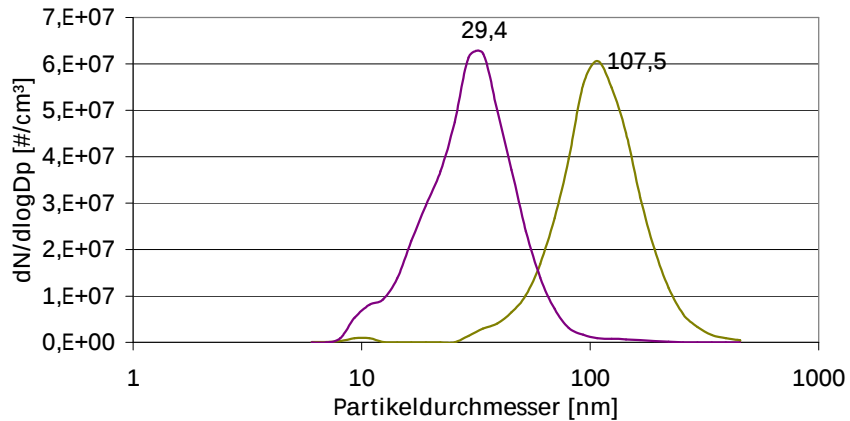
Die durchschnittlich gemessene Staubmenge bei der Verfeuerung von Birke beträgt 279 mg/Nm^3 und fällt damit mehr als doppelt so hoch aus, als die ermittelte Staubfracht der Buche (120 mg/Nm^3). Des Weiteren ist die immense Streuung der gemessenen Werte bemerkenswert. So sind bei der Birkeverbrennung Werte im Bereich von 162 bis 402 und bei der Bucheverbrennung im Bereich von 44 bis 225 mg/Nm^3 vorhanden.

Die Partikelkonzentration steigt nach Entfachen des Holzes stark auf ungefähr $6 \times 10^8 \text{ Partikel/cm}^3$ an. Zeitgleich steigen Temperatur und CO-Konzentration an. Nach der Anbrandphase ist nach ca. 10 Minuten ein deutlicher Abfall bis auf $1,5 \times 10^8 \text{ Partikel/cm}^3$ feststellbar. Nach weiteren 15 Minuten sinkt die Partikelkonzentration erneut, bis nach insgesamt 50 Minuten die Flammen erloschen sind. Dieser Verlauf zeigt das Emissionsverhalten eines kalten Ofens. Im aufgewärmten Zustand (Auflegen von Holzscheiten auf ein vorhandenes Glutbett) ist ebenfalls ein deutlicher Anstieg der Partikelproduktion feststellbar, allerdings werden weniger Partikel emittiert und das Niveau der Hauptabbrandphase deutlich schneller (nach ca. 5 Minuten) erreicht.

Bei beiden Verläufen wird ein Zusammenhang zwischen der Temperatur, der CO-Konzentration und der Partikelkonzentration deutlich. Bei steigenden Temperaturen ist eine niedrigere Partikelkonzentration bzw. CO-Konzentration feststellbar. Im Gegenschluss bedeutet dies, dass eine hohe CO-Konzentration mit einer hohen Partikelkonzentration korreliert. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits in [Klippel, 2007] beschrieben.

Das durchschnittliche Partikelspektrum ist in Bild 4 dargestellt.

Bild 4: Partikelanzahlverteilung



In den Abgasen des Versuchsofens weist das Partikelspektrum ein Anzahlmaximum von ca. 30 nm bei einer monomodalen Verteilung auf. Während der Hauptabbrandphase kommt es kurzzeitig zu einer Verschiebung des Partikelspektrums hin zu einem größeren Maximum (107 nm). Ein eindeutiger Zusammenhang mit Temperatur, CO-Konzentration oder O₂-Konzentration konnte nicht festgestellt werden.

Die Teerkonzentration im Abgas der Feuerungsanlage wurde in Orientierungsmessungen nach den Vorgaben der CEN/TS 15439 bestimmt. Über eine Absaugsonde wurde ein Abgasstrom von ca. 180 Litern über 3 Stunden abgezogen und durch eine große und 4 kleine, eisgekühlte Waschflaschen geführt. Die Waschflaschen waren jeweils mit 2-Propanol gefüllt. Nach der Messung wurde das gesamte Waschmittel zusammengeführt auf ein definiertes Volumen aufgefüllt. Anschließend erfolgte die Analyse der Proben mit einem GC-MS. Aufgrund der zeitlichen Länge der Messung wurden mehrere Abbrandphasen erfasst. Folgende Werte konnten ermittelt werden:

Tabelle 1: Konzentration von Teercomponenten im Abgas

Teerkomponente	Messung 1 [mg/Nm ³]	Messung 2 [mg/Nm ³]	Messung 3 [mg/Nm ³]
Phenol	17,3	15,3	3,0
Guaiacol	< 2,1	-	< 2,1
4-Methylguaiacol	< 2,1	-	< 2,1
Toluol	16,8	-	2,1
Inden	7,9	-	< 2,1
Naphthalin	25,0	15,3	2,8
Phenanthren	5,1	-	< 2,1
Fluoranthren	< 2,1	-	< 2,1
Pyren	< 2,1	-	< 2,1
Benzo(a)pyren	< 2,1	-	< 2,1

Messung 2: nur 2 Komponenten bestimmt

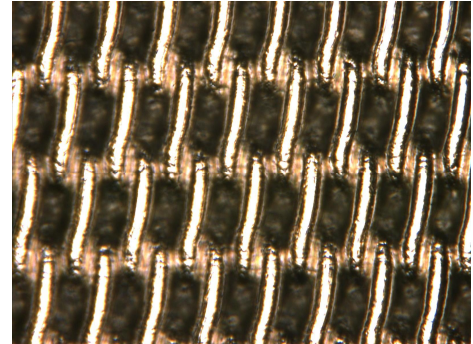
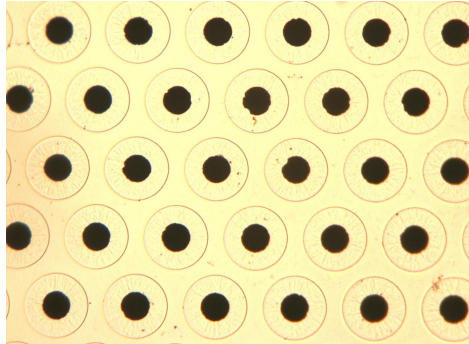
Als Hauptkomponenten konnten Naphthalin, Toluol, Phenol und Inden bestimmt werden. Neben einer Messung mit recht hohen Werten (Messung 1 und 2), wurde in einer dritten Messung jedoch Werte im Bereich der Nachweisgrenze ermittelt. Insgesamt liegen die ermittelten Werte deutlich über den in der Literatur aufgeführten Teerkonzentrationen [Strecker, 2001; Klippel, 2007].

4.3 Mikrosiebfilter

4.3.1 Grundlagen zur Mikrosiebfiltration

Unter Mikrosieben versteht man dünne Folien und dünne Scheiben aus organischen und anorganischen Materialien. Sie zeichnen sich durch eine präzise maßgeschneiderte Porengeometrie und Porenverteilung im Mikrometerbereich aus. Des Weiteren besitzen Mikrosiebe eine glatte Oberfläche mit einer sehr geringen Rauigkeit und haben in der Regel eine verbesserte Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit. Bei den in diesem Projekt verwendeten Mikrosieben handelt es sich um bei Fraunhofer UMSICHT entwickelte perforierte Metallfolien auf Nickelbasis mit bekannten Siebgeometrien. Eine Fertigung aus Kupfer oder anderen Materialien ist prinzipiell auch möglich. Nickel wird jedoch aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit und der Möglichkeit, hohe Festigkeiten der Siebe zu erreichen, bevorzugt eingesetzt. Die Poren können mit Durchmessern von 1- 20 µm gefertigt werden.

Bild 5: Mikroskop-Aufnahme Mikrosieb (links) und Metallgewebe (rechts), jeweils 1.000-fache Vergrößerung



Aufgrund ihrer sehr geringen Dicke und definierten Porenkanälen sind Mikrosiebe nahezu ideale Oberflächenfilter. Nach einer sehr kurzen Anlagerungs- und Verstopfungsphase findet der Aufbau des Filterkuchens statt, der den eigentlichen Partikelrückhalt durch z. B. geometrische Sperrwirkungen des Staubkuchens bewirkt. Für die weiterhin ablaufende Gasfiltration sind nun die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln entscheidend [Schmidt, 1996]. Gute Abscheideleistungen können daher erzielt werden, wenn der Zustand der Kuchenfiltration schnell erreicht wird [Pilz, 1995]. Dabei hat die Oberflächenstruktur des Filtermediums einen großen Einfluss auf den Zeitpunkt des Kuchenaufbaus [Schmidt, 1996]. Nach einer gewissen Filtrationszeit stellt sich ein spezifischer Druckverlust über dem Filter ein. Erreicht dieser einen vorgegebenen Wert, wird üblicherweise die Abreinigung des gebildeten Staubkuchens durch unterschiedliche Verfahren eingeleitet. Direkt nach dem Abreinigungsprozess (oder zu Beginn der Filtration), können Partikel wegen des fehlenden Filterkuchens z. T. ungehindert das Filtermedium passieren (»straight through«) und in das Reingas gelangen [Pilz, 1995].

Ein weiterer Durchtritt von Partikeln an Oberflächenfiltern ist dann gegeben, wenn bereits abgeschiedene Partikel das Filtermedium passieren. Diese Reaktion spielt besonders bei der Bewegung des Filters eine große Rolle (z. B. bei der Regenerierung) [Schmidt, 1996].

Das Abscheideverhalten von Oberflächenfiltern wird von komplexen Vorgängen beeinflusst die vor allem durch die nachfolgenden Größen beschrieben [Schmidt, 1996]:

- § Filteranströmgeschwindigkeit
- § Partikeleigenschaften
- § Rohgaskonzentration
- § Partikelgrößenverteilung des Staubs
- § Elektrische Wechselwirkungen
- § Betriebstemperatur

- § Eigenschaften des Trägergases
- § Filtermedium
- § Art der Regenerierung

4.3.2 Versuchsergebnisse I

Der Mikrosiebfilter ist so gestaltet, dass verschiedene Filtermedien eingesetzt werden können. Die Filterfläche beträgt 0,14 m².

Überprüft wurden Mikrosiebe mit Porengrößen von 3, 8 und 16 µm sowie zum Vergleich zwei Metallgewebe mit einer Öffnungsweite von 8 und 36 µm. Die Reingasstaubgehalte lagen im Mittel zwischen 65 und 186 mg/Nm³, mit hohen Schwankungsbreiten.

Tabelle 2: Staubgehalte der Reingasmessungen

Medium	Birke				Buche			
	Anzahl	Mittelwert	Max	Min	Anzahl	Mittelwert	Max	Min
Metallgewebe 36 µm	6	107	153	77	5	109	189	38
Metallgewebe 8 µm	6	72	140	34	5	65	102	45
Mikrosieb 16 µm	5	139	216	92	5	91	179	58
Mikrosieb 8 µm	3	186	226	165	3	92	104	67
Mikrosieb 3 µm	5	116	163	64	4	132	171	74

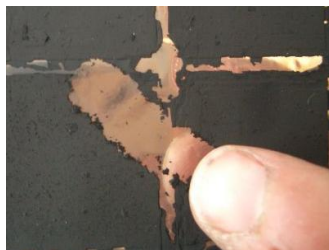
Eine eindeutige Bewertung und Charakterisierung der Siebe fällt daher schwer, insbesondere da die entsprechenden Rohgaswerte nicht zeitgleich ermittelt werden konnten. Die Bestimmung des Abscheidegrads erfolgte daher mittels FMPS-Messung. Mit allen Filtermedien konnten signifikante Abscheidegrade erreicht werden. Dabei wurde bei allen Filtermedien das typische Druckverlust- und Abscheideverhalten von Oberflächenfiltern beobachtet. Nach Beginn der Filtration erfolgt nach kurzer Zeit die Anlagerung von Partikel auf der Sieboberfläche, verbunden mit einem sprunghaften Anstieg des Druckverlusts. Nach dieser Phase erfolgt der Aufbau des Filterkuchens als filterwirksame Schicht mit einem linearen Druckverlustanstieg und hohen Abscheideraten. Im Laborversuch konnten Abscheideraten von über 99 % erzielt werden. Im Technikumsversuch konnten über 85 % erreicht werden, so dass in größeren Anlagen mit Emissionswerten um bzw. unter 150 mg/Nm³ die Zielgröße von 20 mg/Nm³ erreicht werden kann. Die Anfangsdruckverluste lagen bei einer durchschnittlichen Anströmgeschwindigkeit von 1,6 m/s bei 410 Pa für 3 µm-Siebe, 230 Pa für 8 µm-Siebe und 135 Pa für 16 µm-Siebe. Im bestaubten Zustand (6 Stun-

den) erreichten die Siebe Werte zwischen 487 und 538 Pa. Die Unterschiede können mit den unterschiedlichen Porositäten der Siebe begründet werden. Bei fertigungsbedingt gleichem Lochabstand steigt die durchströmbare Fläche exponentiell zur steigenden Porengröße. Im Vergleich zu den 16 µm-Mikrosieben zeigten Metallgewebe leicht höhere Anfangsdruckverluste und höhere Abscheidegrade. Allerdings war die Zeit, bis diese Abscheidegrade erreicht wurden, mit 8 Stunden deutlich länger, als bei den betrachteten Mikrosieben (2 Stunden).

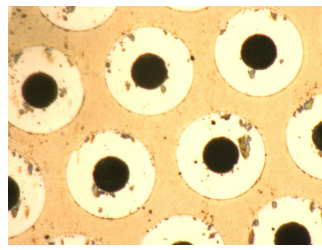
In Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass mit Mikrosieben Abscheidegrade von über 99 % von Stäuben mit einer vergleichbaren Partikelverteilung erreichbar sind. Dabei sagt die Löffgröße der Mikrosiebe zunächst wenig über die Abscheidecharakteristik der Mikrosiebe aus.

Die Regenerierung der Filtermedien wurde mit Rückspülung, Vibration und Ultraschall durchgeführt. Es zeigte sich ein deutlicher Unterschied in der Regenerierbarkeit von Mikrosieben und Metallgeweben. Die manuelle Ultraschallreinigung erwies sich bei Mikrosieben als sehr effektiv mit einer vollständigen Entfernung abgeschiedener Partikel auf der Sieboberfläche. Bei Metallgeweben konnten ebenfalls gute Reinigungsgrade erreicht werden. Ein Abstreifen des Filterkuchens war bei Mikrosieben aufgrund der extrem glatten Oberfläche - ebenfalls erfolgreich (vgl. Bild 6). Bei Metallgeweben konnte aufgrund der strukturierten Oberfläche nur eine grobe Reinigung erreicht werden.

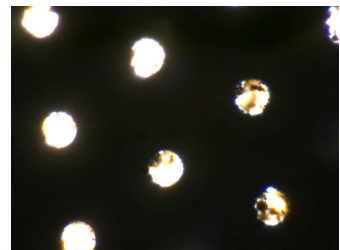
Bild 6: Manuelles Abstreifen des Filterkuchens



Foto



Mikroskop, Auflicht



Mikroskop, Durchlicht

Im laufenden Betrieb wurden Rückspülversuche durchgeführt, indem die Durchströmung des Filters umgekehrt wurde. Hier konnte eine Lösung des Filterkuchens erreicht werden. Nach kurzer Zeit wurde der Filterkuchen jedoch wieder anfiltrierte und der Ausgangsdruckverlust vor der Abreinigung erreicht. Einzig die Rückspülung mit Druckluft zeigte bei Mikrosieben einen signifikanten Abreinigungserfolg. Mehr als 70 % der Filterfläche konnte vollständig vom Filterkuchen entfernt werden.

In Versuchen zur Temperaturbeständigkeit bleiben Mikrosiebe über längere Zeit bis 400 °C stabil und flexibel. Bei Temperaturen über 500 °C wurde ein zunehmendes Verspröden festgestellt. Übliche Abgastemperaturen und auch Abgasspitzen können von Mikrosieben abgefangen werden.

Insgesamt konnte in diesem Arbeitspaket die Vorteilhaftigkeit von Mikrosieben zur Feinstaubabscheidung herausgestellt werden. 36 μm -Metallgewebe und 16 μm -Mikrosieb wiesen ähnliche Anfangsdruckverluste und Druckverläufe während der Filtration auf. Mit 8 μm und 16 μm -Mikrosieben wurde schon nach ca. 2 Stunden ein hoher Abscheidegrad von über 85 % erreicht. Metallgewebe erreichten in den Technikumsversuchen höhere Abscheidegrade, jedoch erst nach ca. 8 Stunden. Aufgrund der extrem glatten Oberfläche von Mikrosieben zeigten sich diese vorteilhaft in der Abreinigung gegenüber Metallgeweben, so dass für weitere Versuche Mikrosiebe mit 16 μm -Poren ausgewählt wurden.

4.3.3 Optimierung Versuchsfilter

Auf Basis der Erkenntnisse der ersten Projektphase wurde ein neues Filtermodul gefertigt und mit 16 μm -Mikrosieben versehen. Zudem konnte auf die sehr flexible Bauweise verzichtet werden, da ein Austausch der Filtermedien nicht von Versuch zu Versuch, sondern erst nach einem längeren Zeitraum vorgesehen war. Die modifizierte Bauweise ist in Bild 7 dargestellt.

Bild 7: Modifizierter Versuchsfilter



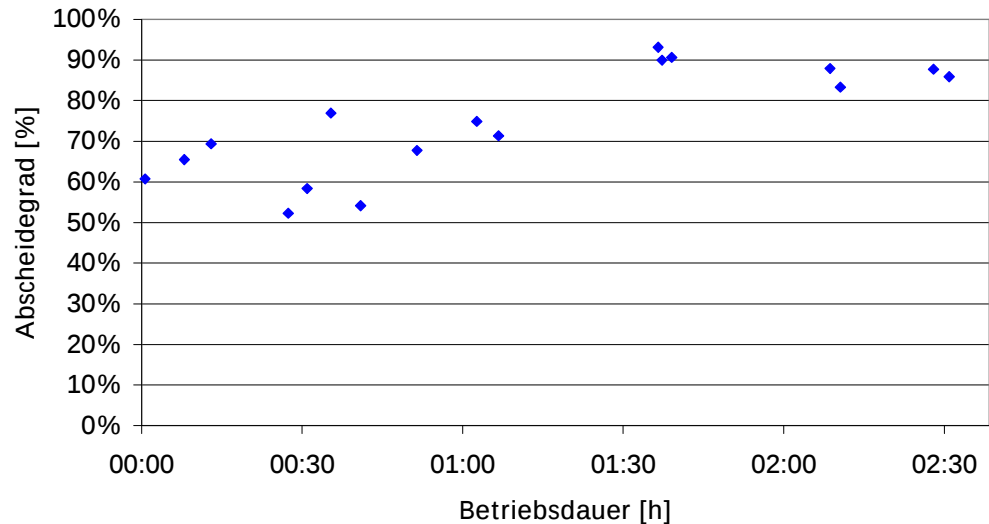
Die Filtereinheit ist nun vollständig aus dem Filterkasten herausnehmbar. Dieser besteht aus Mikrosiebdisks und Zwischenelementen mit wechselseitigen Roh- und Reingasöffnungen. Die Elemente werden über Gewindestangen aufeinander gepresst. Die Einheit kann in den Filterkasten gasdicht eingesetzt werden. Optional sind an den Seiten Druckluftanschlüsse zur Abreinigung vorgesehen.

In den folgenden Versuchen sollte das Betriebsverhalten ermittelt und Aussagen über die Parameter Abscheideeffektivität, Abreinigungszyklen und das Verhalten im Anfahrvorgang, bei Lastwechseln und bei kritischen Brennstoffen (Getreide, Stroh) ermittelt werden.

4.3.4 Versuchsergebnisse II

Die Abscheideleistung des Mikrosiebfilters wurde nach etwas mehr als 1,5 Betriebsstunden mit 90 % bestimmt.

Bild 8: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads



Der Druckverlust betrug zu diesem Zeitpunkt 400 Pa bei einer Gasgeschwindigkeit von 0,55 m/s. Zur Abreinigung des Filters wurde die Druckluftabreinigung gewählt. Die Länge der Abreinigungszyklen kann nicht konkret angegeben werden. Sie hängt von Staubkonzentration des Abgases, dem maximal zulässigen Druckverlust und dem erwünschten Abscheidegrad ab. Im Anwendungsfall kann bei einem maximalen Druckverlust von 400 Pa, 16 µm-Sieben und einer Anströmgeschwindigkeit von 1,6 m/s folglich alle 2 bis 4 Stunden abgereinigt werden. Zur Minimierung der Störanfälligkeit sollte der Filter vor Verwendung stets erwärmt werden, um die Kondensation von Teeren oder Wasser zu vermeiden. Die maximale Lebensdauer der Siebe wurde bei den durchgeführten Versuchen nicht erreicht.

4.3.5 Test an realen Anlagen

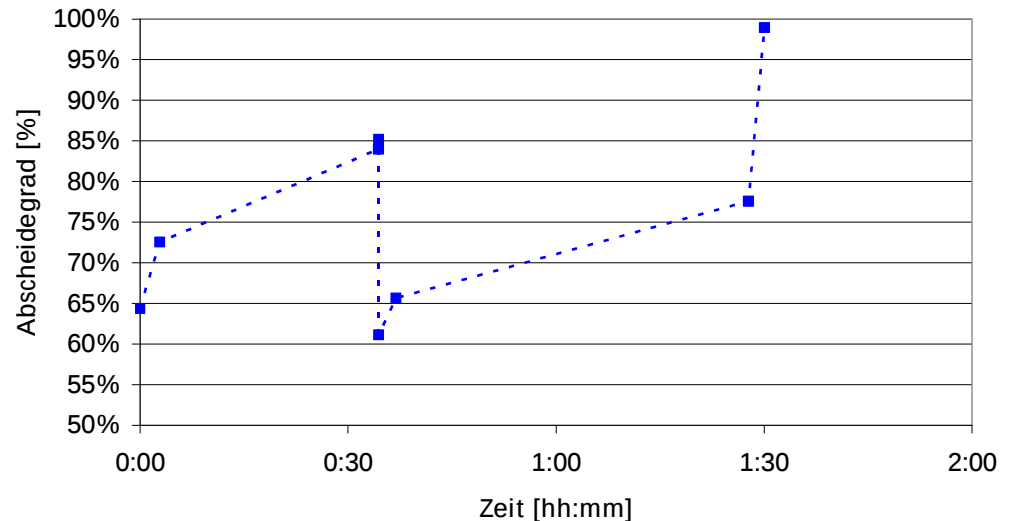
Für Versuche an einer realen Feuerungsanlage wurde der gleiche VersuchsfILTER verwendet, wie in der vorangegangenen Versuchsphase. Als Feuerungsanlage wurde ein 200 kW_{th}-Hackschnitzelkessel ausgewählt und der Abgasstrom im Bypass durch das Filterelement geführt (s. Bild 9).

Bild 9: Versuchsbetrieb
an einem 200 kW-
Hackschnitzelkessel



Die Rohgaskonzentration betrug je nach Lastfall zwischen 36 und 181 mg/Nm³. Das Partikelspektrum war mit einem Partikelanzahlmaximum von 52 nm sehr vergleichbar mit dem Partikelspektrum des Kaminofens. Das in [Obernberger, 2008] beschriebene zweite Maximum zwischen 30 und 70 µm konnte nicht bestätigt werden. Dazu wurde ein Aerosolspektrometer mit einem maximalen Messbereich bis 32 µm verwendet. Es waren ausschließlich Partikel im nm-Bereich messbar. Im µm-Bereich lagen nur Partikel in einer unwesentlichen Anzahl vor. Die Gesamtstaubmasse im Reingas lag im Mittel bei 13 mg/Nm³. Die Werte schwankten je nach Betriebsphase des Ofens und des Filters zwischen 4 und 25 mg/Nm³. Der zeitliche Verlauf des Abscheidegrads ist beispielhaft in Bild 10 dargestellt.

Bild 10: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads im Feldversuch



Nach ca. 30 Minuten kam es im ersten Filtrationszyklus zu einer Abscheidegradsteigerung von 64 auf 85 %. Anschließend wurde eine manuelle Abreinigung des Filters mittels Druckluft mit einer resultierenden Abscheidegradsenkung auf 61 % durchgeführt. In der folgenden Phase wurde nach ca. einer Stunde ein Abscheidegrad von 99 % bestimmt.

Nach der Abreinigung wurden Druckverluste um 140 Pa bei einer Anströmgeschwindigkeit von 1 – 2 m/s gemessen. Je nach Rohgaskonzentration wurden nach einer halben bis einer Stunde Druckverluste von ca. 400 Pa erreicht mit einem Abscheidegrad von ca. 85 %. Anschließend kam es in Folge des sich aufbauenden Filterkuchens zu einem langsameren Druckverlustanstieg mit bis zu 500 Pa nach 2 bis 4 Stunden.

Die Abreinigung wurde mit einer manuellen Druckluft-Rückspülung realisiert. Dabei konnte der Druckverlust um ca. 60 – 70 % gesenkt werden.

4.4 Abgaswäscher

Die vorgesehene Abgaswäsche soll sowohl als separates System als auch als nachgeschaltete Einheit zum Mikrosiebfilter entwickelt werden. Insbesondere durch Kombination der beiden Verfahren wird eine nahezu vollständige Abtrennung der basisch wirksamen Flugaschen im ersten Schritt und anschließend die Abscheidung der im Abgasstrom enthaltenen Teere angestrebt. Folgende Fragen waren zur Konzeption des Wäschermoduls zu klären:

- § Wahl der Geometrie in Hinblick auf die bestmögliche Nutzung der Absorptionstriebkraft bei minimalem Energieaufwand durch Erzeugung einer maximalen Phasengrenzfläche.
- § Wahl des Waschmediums hinsichtlich einer maximalen Beladbarkeit, Stabilität und Regenerationsfähigkeit.

4.4.1 Grundlagen zur Abgaswäsche

Mit Hilfe des Gaswäschers sollen Partikel und Teere aus dem Abgasstrom entfernt werden. Die Abscheidung unterliegt verschiedenen Mechanismen. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Aggregatzustand der Abgasbestandteile. Die bei der Verbrennung entstehenden salzartigen Verbindungen und Ruß liegen in Form von festen Partikeln vor. Die aus unvollständiger Verbrennung resultierenden organischen Bestandteile können je nach vorherrschenden Bedingungen gasförmig oder in flüssiger Form (Tröpfchen) vorliegen. Teilweise adsorbieren sie auch auf den im Abgas befindlichen Feinstaubpartikeln. Kühlen die Verbrennungsabgase auf dem Weg zum Wäscher oder aufgrund der Waschmitteltemperatur im Wäscher ab, kommt es zu einem teilweisen oder vollständigen Auskondensieren der Teere. Die Tröpfchen verhalten sich im Gasstrom wie feste Partikel, so dass hier die gleichen Abscheidemechanismen gelten. Liegen Teere im gasförmigen Zustand vor, sind Absorptionsvorgänge zu beachten. Je nach Zusammensetzung der organischen Bestandteile kann die Temperatur, bei welcher das gasförmige Gemisch auskondensiert, variieren.

Die Abscheidung von Partikeln aus einem Gasstrom mit einer Waschflüssigkeit lässt sich prinzipiell in die folgenden vier Phasen einteilen:

- § Zugabe der Waschflüssigkeit zum Abgasstrom
- § Zusammenführung von Waschflüssigkeit und Staubpartikel
- § Bindung der Staubpartikel in der Waschflüssigkeit
- § Abtrennung der beladenen Staubpartikel aus dem Nasswäscher

Außerhalb des Abscheiders muss gegebenenfalls noch die Aufbereitung des durch die Partikel verunreinigten Waschmittels erfolgen. Wesentliche Parameter für eine effektive Abscheidung sind eine hohe Phasengrenzfläche und eine hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Waschmedium und Gas [Stieß, 1997]. Bei organischen Partikeln ist das Lösungsvermögen der entsprechenden Stoffe im Waschmedium ein limitierender Faktor. Wird das Lösungsvermögen überschritten, liegen die Stoffe in einem 2-Phasen-System vor. Die Absorption von gasförmigen Teeren ist durch die spezifische Gasaufnahmekapazität von des Waschmediums begrenzt.

4.4.2 Konzipierung Versuchswäscher

Der Wäscher wurde als Wirbelwäscher für einen Betriebsvolumenstrom von 15 – 30 Bm³ ausgelegt. Die Wäschergeometrie wurde so gestaltet, dass in den Schikanen Gasgeschwindigkeiten von ca. 5 m/s vorliegen, um die Ausbildung eines Wirbels und den damit verbundenen guten Abscheidegrad zu erreichen.

4.4.3 Wahl des Waschmediums

Die Wahl des Waschmediums erfolgt hinsichtlich einer maximalen Beladbarkeit von organischen Abgasbestandteilen, chemischen Stabilität, Regenerationsfähigkeit, Betriebssicherheit und ökologischen Unbedenklichkeit. Zur Auswahl stehen Pflanzenöl (Rapsöl) und Rapsmethylester (RME, Biodiesel).

Die für die Verwendung als Waschmedium relevanten Eigenschaften sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Absorbermedien

Absorbens	Rapsöl	RME
Alterungsbeständigkeit	leicht biologisch abbaubar	leicht biologisch abbaubar; bei Wassereinlagerung erhöhtes Bakterienwachstum
Chemische Beständigkeit	Alkalische Verseifung	?
Flammpunkt ^{a) b)}	230 – 317 °C	110 – 120 °C
Kinematische Viskosität (20 °C) ^{a)}	72,3 mm ² /s	7,5 mm ² /s
Heizwert ^{a)}	37,6 MJ/kg	37,1 MJ/kg
Gefährdungspotenzial	nicht wassergefährdend	schwach wassergefährdend
Kosten pro Liter ^{a)}	0,75 – 1,05 €/l	0,90 – 1,20 €/l

^{a)} [FNR, 2008]

^{b)} [FAL, 2004]

Die Löslichkeit von einigen PAKs in Öl (Trioleoylglycerol) ist im Vergleich zu Wasser sehr hoch und liegt im Bereich einiger g/100g (z. B. Phenthren 10,22 g/100g, vgl. [Patton, 1984]). Prinzipiell ist die Löslichkeit von Komponenten mit niedrigem Schmelzpunkt höher, als mit hohen Schmelzpunkten. Wasser weist hingegen Werte auf, die um den Faktor 10⁵ geringer sind [Kästner, 2000].

Aufgrund eines Flammpunkts von mehr als 230 °C setzt sich Rapsöl von anderen biogenen lipophilen Medien wie RME ab, da die Angaben zum Flammpunkt von RME stark schwanken. Die Norm E DIN 51606 jedoch fordert einen Flammpunkt von mindestens 110 °C für Biodiesel (RME) [FAL, 2004], welcher deutlich unter dem Wert des Rapsöls liegt.

Somit könnte mit Rapsöl eine höhere Betriebssicherheit im Versuchsbetrieb gewährleistet werden. Insbesondere kann es bei den vorliegenden Abgastemperaturen am Versuchsofen mit mehr als 200 °C oberflächennah schnell zu einer deutlichen Erhitzung des Waschmediums mit einem Erreichen der kritischen Temperatur kommen, so dass für die durchzuführenden Versuche Rapsöl als Waschmedium ausgewählt wird. Mögliche Nachteile von Rapsöl bezüglich der chemischen Beständigkeit, der Alterungsbeständigkeit und der kinematischen Viskosität werden im Folgenden näher betrachtet.

Bei der Abgaswäsche mit Öl treten insbesondere zwei Probleme auf:

§ Alkalische Verseifung

Durch den Eintrag von basisch wirksamen Alkalimetallen kommt es zu einer Verseifung des Absorbens. Dabei können sich bildende Seifenblasen ein unkontrolliertes Aufschäumen des Öls verursachen. Ein weiteres Problem könnte die aufgrund der Emulgatorwirkung der Seife nicht mehr durchführbare Abtrennung von abgeschiedenem Wasser im Öl sein.

§ Bildung eines zündwilligen Gemisches

Durch Eintrittstemperaturen oberhalb von 180°C kann es bei dem Eintrag von Funken zu einer Entzündung des Öls kommen.

Zusätzlich kann aufgrund einer geringen Viskosität bei niedrigen Temperaturen ein hoher Druckverlust bzw. ein schlechter Stoffübergang auftreten.

4.4.4 Versuchsergebnisse I

Der gebaute Wäscher wird in die Versuchsstrecke eingebaut und eine Vielzahl von Verbrennungsversuchen durchgeführt. Als Waschmedium wurde Pflanzenöl eingesetzt. Das Waschmittel war schon nach einer kurzen Einsatzzeit schwarz gefärbt (s. Bild 11).

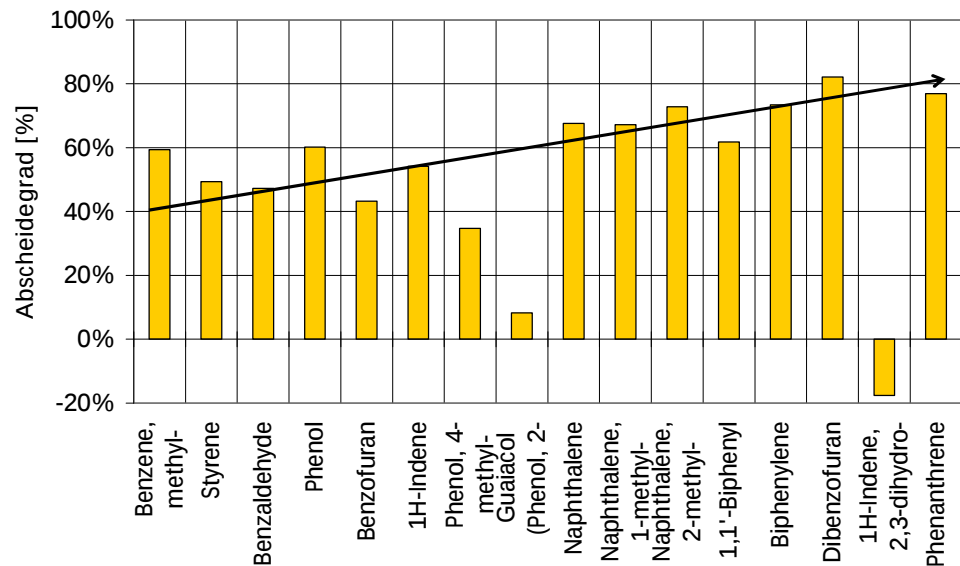
Bild 11: Rapsöl vor und nach Einsatz im Wäscher (2 Stunden Betriebszeit)



Die gravimetrische Bestimmung des Reingasstaubgehalts streute wie auch

schon bei Messungen mit Mikrosieben sehr stark und lag zwischen 31 und 221 mg/Nm³. Im Mittel wurden 119 mg/Nm³ bei der Verbrennung von Birke und 55 mg/Nm³ bei Buche bzw. Eiche erreicht. Die erzielte Teerabscheideleistung lag, je nach Teerkomponente zwischen 40 und 80 %.

Bild 12: Teerabscheide-
rate Wäscher



Der Druckverlust war abhängig von Füllstandshöhe und Anströmgeschwindigkeit. Bei mittlerer Füllstandshöhe und einer Anströmgeschwindigkeit von ca. 1,3 m/s wurden 400 Pa gemessen. Eine Wirbelbildung wurde über einen breiten Bereich an Gasgeschwindigkeiten realisiert. Das Lösungsvermögen von Teeren im gewählten Waschmedium ist hoch und liegt im Bereich mehrerer ml pro l. Nach Überschreiten dieses Lösungsvermögens wird sich ein 2-Phasen-Gemisch ausbilden. Beispielhaft an der Teerkomponente Naphthalin wurde eine Betriebszeit zwischen 1.000 bis 12.300 bestimmt, bis das Lösungsvermögen des Öls überschritten ist. Die Entsorgung der Reststoffe durch Mitverbrennung ist zu favorisieren. Ein starkes Aufschäumen bzw. eine Verseifung des Waschmediums konnte nicht festgestellt werden, möglicherweise zu begründen mit einer Hemmung des Verseifungsprozesses aufgrund der durch die Kondensation von sauren Abgasbestandteilen vollzogene Neutralisation der eingetragenen basischen Flugasche.

4.4.5 Optimierung Versuchswäscher

Wesentliche Ziele zur Optimierung des Wäschermoduls sind die Vermeidung des Austrags von Waschmediumtröpfchen in den Reingasstrom und die Optimierung der Wirbelbildung zur Erhöhung des Stoffübergangs während der Filtrati-

on. Des Weiteren soll ein externes Kühlaggregat und Ölumwälzung mittels Pumpe integriert werden.

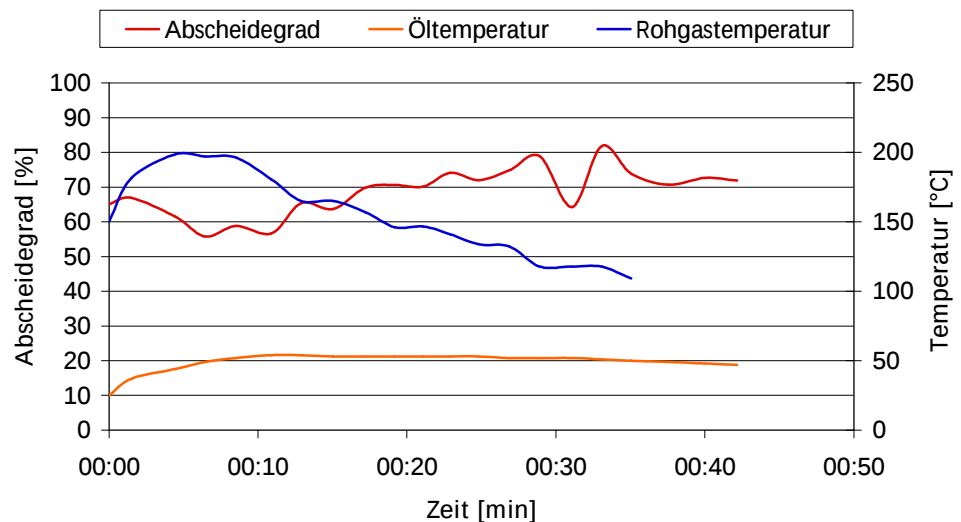
Zur Optimierung wurde eine einphasige Simulation des Wäschermoduls mit einer CFD-Software (Fluent) durchgeführt und mittels Parametervariation eine optimierte Geometrie bestimmt. Das Ergebnis wurde zunächst in einem Acrylglasmodell umgesetzt.

Durch die Simulation konnte eine deutliche Verbesserung der Gasgeschwindigkeit in der Schikane von 5 auf 60 m/s erhöht werden. Dadurch sollte eine höhere Zentrifugaltriebkraft erreicht werden. Partikel werden aufgrund ihrer Masse zur Wandung bzw. zum Waschmedium gedrängt. Anorganische Partikel und kondensierte Teere werden so abgeschieden. Des Weiteren wird durch ein stärkeres »Zerreißen« des Waschmediums eine größere Kontaktfläche zwischen Gas und Waschmedium erreicht, der einen verbesserten Stoffübergang mit einer höheren Absorption gasförmiger Teere sowie eine stärkere Kühlung und folglich Auskondensation der Teere erzielt.

4.4.6 Versuchsergebnisse II

Der Wäscher zeigte nach einer Optimierung der Strömungsführung eine Abscheideleistung von 70 bis 80 % bei einer Öltemperatur von 50 °C (s. Bild 13).

Bild 13: Abscheidegrad des Wäschers in Abhängigkeit von Öltemperatur



Der Druckverlust konnte im Vergleich zum vorherigen Modell um 43 % gesenkt werden. Zur Regulierung der Waschmediumtemperatur wurde ein Kühlkreislauf integriert. Die Temperatur konnte zuverlässig unter 70 °C gehalten werden. Bei Temperaturen zwischen 20 und 40 °C war die Abscheideleistung aufgrund der geringeren Viskosität des Mediums jedoch geringer. Bei Temperaturen über 60 °C waren ebenfalls geringere Abscheideleistungen feststellbar.

Möglicherweise werden aufgrund der weiter gestiegenen Viskosität vermehrt Öltröpfchen mit dem Abgasstrom mitgerissen. Die Beladungsgrenze des Waschmediums konnte nicht erreicht werden. Eine Verseifung des Pflanzenöls konnte ohne Staubvorabscheidung nicht festgestellt werden.

Für den möglichen Einbau in unterschiedliche Feuerungsanlagen mit z. T. auch kritischen Brennstoffen (Getreide, Stroh) sind schwankende Betriebszustände (verschiedenen Volumenströmen und Beladungen) zu beachten. Diese können von beiden Systemen gut aufgefangen werden, z. B. in der Realisierung durch eine entsprechende Steuerungstechnik.

Eine Reduzierung der Abwassermengen aus dem Wäscher ist durch eine ständige Auffrischung bzw. Regenerierung durch eine Partikelentfernung aus dem Öl denkbar. Aufsalzungen können dadurch vermieden werden. Eine Ölpflege ließe sich nach der Ölkühlung in den Ölkreislauf integrieren. Die Entsorgung des Waschmittels durch Mitverbrennung im Ofen ist prinzipiell möglich. Die Entsorgung im Abwasser ist hingegen fraglich. Zur Zeit ist die Ableitung von wässrigen Kondensaten in Deutschland nicht geklärt, so dass hier keine Aussage getroffen werden kann.

4.4.7 Test an realen Anlagen

Der Einbau des Wäschers erfolgte analog zum Mikrosiebfilter (vgl. Kapitel 4.3.5). Abgase eines 200 kW-Hackschnitzelkessels wurden durch den im Bypass eingebauten Wäscher hindurchgeführt und relevante Parameter bestimmt.

Die Gesamtstaubmasse im Reingas lag im Mittel bei 25 mg/Nm^3 . Die Werte schwankten je nach Betriebsphase des Ofens und des Filters zwischen 14 und 44 mg/Nm^3 . Der Abscheidegrad im Feldversuch war maximal 60% . Einen maximalen Abscheidegrad bei 50°C , wie in den vorangegangenen Versuchen beobachtet, konnte nicht bestätigt werden. Die ermittelten Druckverluste unterschieden sich nicht von der vorherigen Projektphase. Signifikanter Unterschied sind die geringeren Abgastemperaturen von ca. 70°C , so dass auf einen Kühlkreislauf verzichtet werden konnte. Auch während dieses Versuchsbetriebs konnte keine Abhängigkeit des Waschmittelalters von der Abscheideleistung festgestellt werden. Eine Verseifung wurde ebenfalls nicht beobachtet.

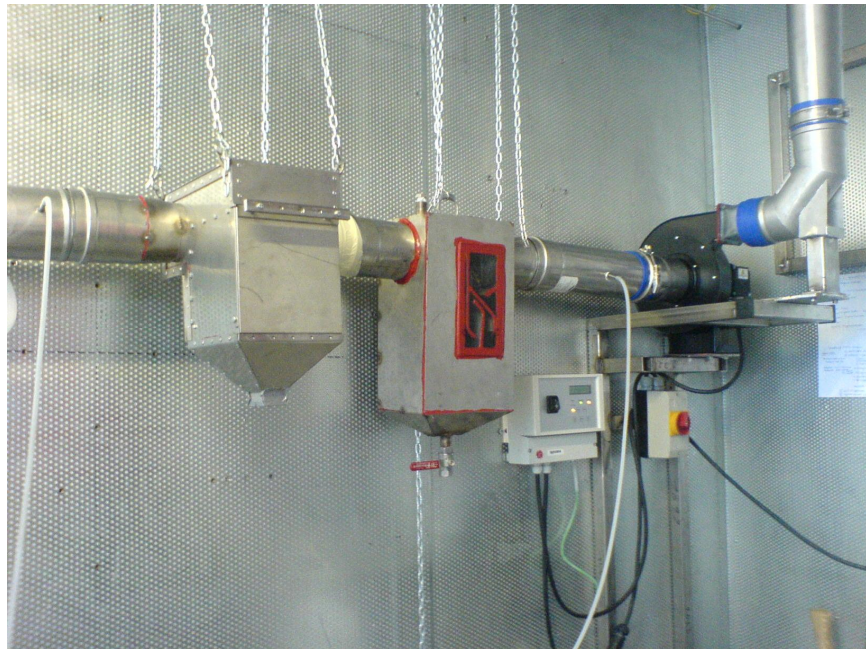
Die doch relativ geringen Reingasstaubgehalte konnten nicht durch die mittels FMPS bestimmten Gesamtabscheidegrade bestätigt werden. Diese waren unerwartet gering. Eine mögliche Begründung könnten die niedrigen Abgastemperaturen sein. Im Reingas wurden unter 50°C gemessen. Der Taupunkt des Abgases wurde mit 52°C bestimmt. Somit wird bei den vorliegenden Reingas-temperaturen der Abgastaupunkt unterschritten, so dass möglicherweise kondensierte Wassertröpfchen als Partikel mitgemessen wurden und so der Abscheidegrad niedriger bestimmt wurde, als er war.

Der optimale Zeitpunkt für einen Ölaustausch konnte nicht ermittelt werden. Hier sind weitere aufwändige Teermessungen und Ölanalysen erforderlich, die im Rahmen des Projekts nicht realisiert werden konnten

4.5 Gesamtsystem

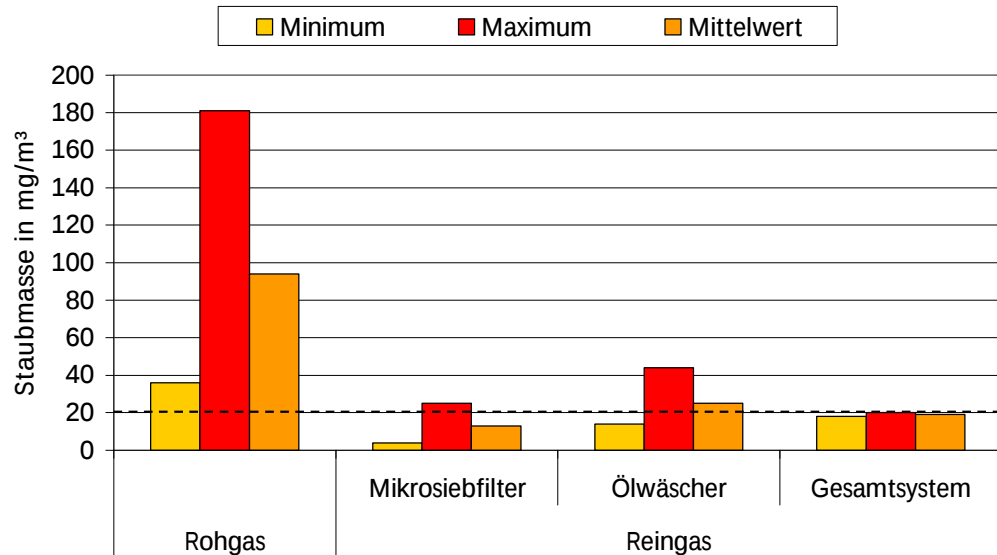
Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wurde insbesondere in der zweiten und dritten Projektphase untersucht. Aufgrund der modularen Bauweise der Einzelsysteme konnten diese hintereinander in die Versuchsstrecke eingebaut und relevante Parameter untersucht werden (vgl. Bild 14).

Bild 14: Zweitstufiges Abscheidsystem aus Mikrosiebfilter und Wäscher – erste Entwicklungsstufe



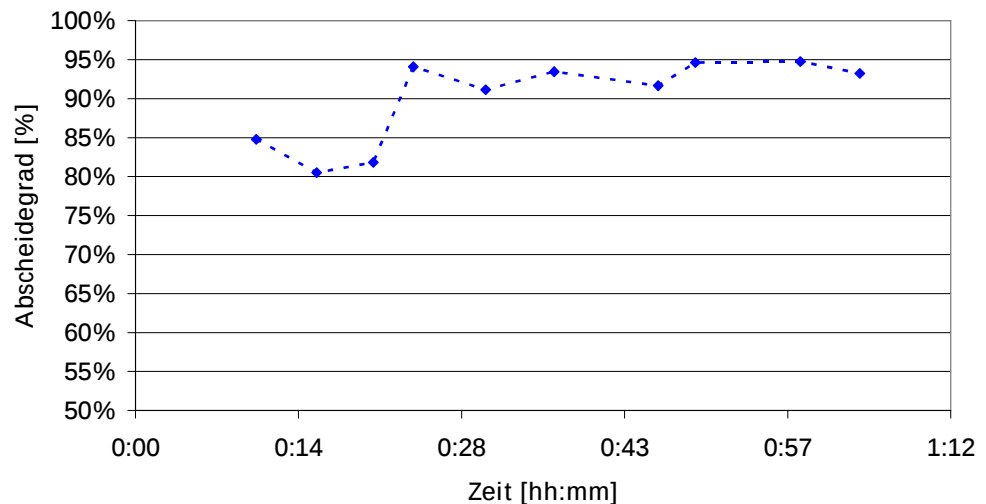
Die Ergebnisse der gravimetrischen Staubmessung bei Versuchen am Hack-schnitzelkessel sind in Bild 15 dargestellt. Die gemessenen Reingasstaubgehalte hinter dem Gesamtsystem wiesen sehr geringe Schwankungen auf. Im Mittel wurden 19 mg/Nm^3 gemessen.

Bild 15: Ergebnisse der gravimetrischen Staubmessung der Systeme am Hackschnitzelkessel



Der zeitliche Verlauf des Abscheidegrads ist beispielhaft in Bild 16 dargestellt.

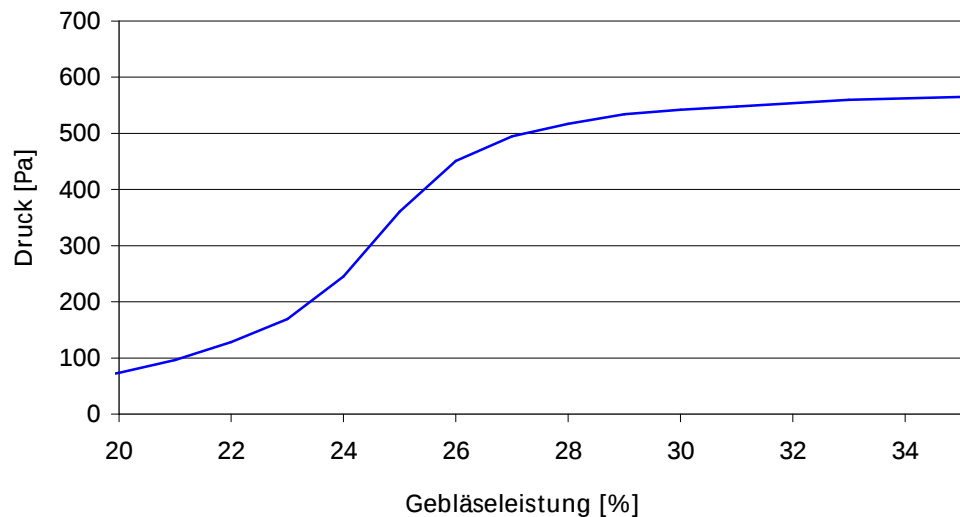
Bild 16: Zeitlicher Verlauf des Abscheidegrads des Kombinationssystems



Die Abscheidegrade lagen zwischen 80 und 95 % im Technikumsversuch. Im Feldversuch wurden Abscheidegrade zwischen 63 und 72 % bestimmt.

Die ermittelten Druckverluste des Gesamtsystems lagen erwartungsgemäß über den Druckverlusten der Einzelsysteme. In Bild 17 ist der Druckverlust des Gesamtsystems nach einer Betriebszeit von ca. einer Stunde (erwärmtes Öl, bestaubter Mikrosiebfilter) dargestellt. Bei einer Gebläseleistung von 29 % betrug der Druckverlust 540 Pa.

Bild 17: Druckverlust des Gesamtsystems in Abhängigkeit von der Gebläseleistung nach einer Betriebsstunde



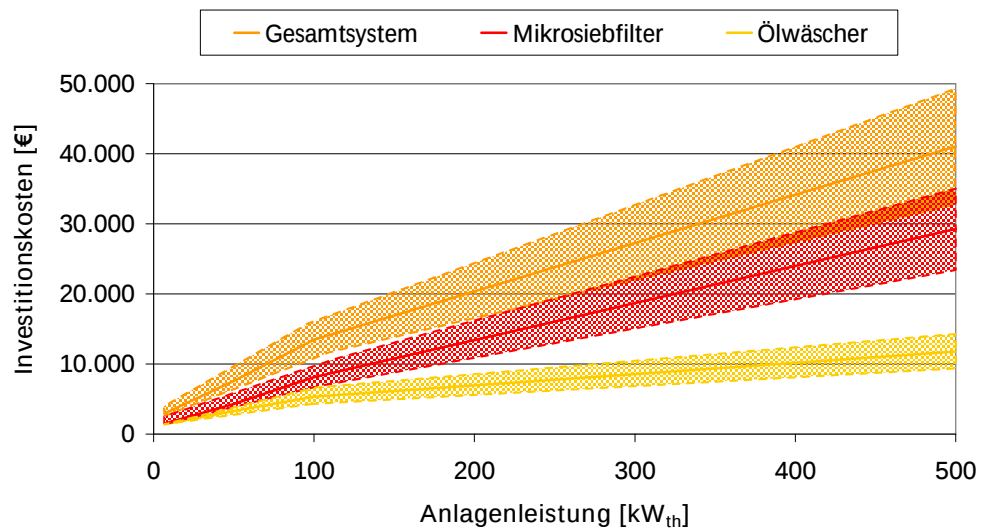
Bei Betrieb des Gesamtsystems konnten im Technikumsversuch die Abscheidegrade des Mikrosiebfilters im separaten Betrieb erreicht werden. Im Feldversuch waren die Gesamtabscheidegrade jedoch leicht geringer. Auch die gravimetrischen Reingaswerte lagen über denen des Mikrosiebfilters. Hauptursache könnte sein, dass durch den Wäscher Öltröpfchen mit dem Abgasstrom mitgerissen wurden und so als Feinstaub erfasst werden. Eine weitere Ursache könnte eine Taupunktunterschreitung des Abgases und damit Kondensieren des im Abgas enthaltenen Wassers sein. Der dann entstehende Nebel würde ebenfalls als Feinstaub erfasst werden. Allerdings sollte dies bei der gravimetrischen Staubmessung keinen Einfluss haben. Daher ist davon auszugehen, dass wenige mg/Nm^3 an Waschmedium ausgetragen werden.

4.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden je nach Anlagengröße Abschätzungen der Investitionskosten, Betriebskosten und Entsorgungskosten durchgeführt. Eine detaillierte Auflistung ist aufgrund der Konzepthaftigkeit des Projekts nicht sinnvoll. Auch ist zu beachten, dass sich die Kosten bei einer späteren Realisierung aufgrund von Preisschwankungen verschieben können. Prinzipiell ist das Wäschersystem günstiger bezogen auf die Investitionskosten. Betriebs- und ggf. Entsorgungskosten fallen beim Wäscher höher aus.

Für die Herstellung der verschiedenen Filtereinheiten können folgende Kosten überschlägig angesetzt werden:

Bild 18: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der verschiedenen Abscheidesysteme



Dabei konnten die Kosten für die Integration einer Anlagensteuerung nicht berücksichtigt werden.

Für den Betrieb der jeweiligen Filtersysteme ist eine Gebläseleistung von

- § 0,12 kW für Anlagen mit 50 kW
- § 0,17 kW für Anlagen mit 100 kW
- § 1,5 kW für Anlagen mit 500 kW

erforderlich. Bei 2.000 Volllaststunden pro Jahr und einem Strompreis von 20 ct/kWh entstehen jährliche Stromkosten in Höhe von

- § 48 € für Anlagen mit 50 kW
- § 68 € für Anlagen mit 100 kW
- § 600 € für Anlagen mit 500 kW

Weitere Betriebskosten entstehen durch den Austausch des Pflanzenöls und ggf. durch einen Austausch der Mikrosiebe und der Wartung der Systeme. Konkrete Wartungsintervalle können hier jedoch nicht angesetzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsprojekts war die Konzipierung eines zweistufigen Rauchgasreinigungssystems für kleine und mittlere Holzfeuerungsanlagen zwischen 30 und 500 kW_{th}. Die zentrale Idee des Entstaubungsverfahrens ist eine innovative high-flux Mikrosiebfiltration mit metallischen, weitgehend temperatur- und korrosionsbeständigen Mikrosieben in Kombination mit einer ölbasierten Wäscherereinheit zur sicheren Abscheidung von gesundheitsgefährlichem Feinstaub und Teer.

Die Entwicklung eines zweistufigen Systems ist im Rahmen der Projektbearbeitung gelungen. Die trenntechnisch guten Eigenschaften der Mikrosiebe und die hohe Absorptionskraft und Aufnahmefähigkeit gegenüber Teeren eines organischen Lösemittels konnten zu einem innovativen Verfahren zur wirkungsvollen Emissionsminderung von Biomassefeuerungsanlagen umgesetzt werden.

Das entwickelte System zeichnet sich durch eine hohe Feinstaubabscheidung aus, die flexibel an bestehende Feuerungssysteme angepasst werden kann. Über 90 % der enthaltenen Partikel unter 1 µm werden zurückgehalten, ebenso wie 40 – 80 % der Teere (je nach Komponente). Die Emissionen gesundheitsgefährlicher Stoffe können so deutlich reduziert werden. Reingastaubgehalte von weniger als 20 mg/Nm³ sind dabei auch schon nach kurzer Betriebszeit erreichbar. Je nach Konfiguration des Abscheiders (zwei- oder einstufig) sind die anvisierten 400 Pa Druckverlust realisierbar.

Auch die Integration des Systems in den Abgasweg von Einzelfeuerstätten oder in Heizanlagen mit problematischen Brennstoffen wie Stroh oder Getreide ist denkbar. Voraussetzung für den Betrieb in Einzelfeuerstätten ist, dass ein Abgasgebläse integriert wird.

Für die spätere Anwendung ist es denkbar, entweder Mikrosiebfiler und Wäscher als Einzelsystem oder als zweistufiges System in Feuerungsanlagen einzusetzen. Das Gesamtsystem könnte insbesondere für problematische Brennstoffe besonders relevant sein, da sowohl hohe Staubbelastungen, als auch eine hohe organische Fraktion im Abgas entfernt werden kann. Der Mikrosiebfiler könnte als Feinabscheider in Anlagen mittlerer Größe mit trockenen Hackschnitzeln eingesetzt werden. Der Anwendungsbereich des Abgaswäschers ist sehr breit. Vorstellbar sind insbesondere problematische Brennstoffe mit hohen Teeremissionen oder der Betrieb für kleine Scheitholzfeuerungen, insbesondere in der Anfahrphase. Hier ist eine Temperatursteuerung feststellbar.

Weitere Arbeitsschwerpunkte könnten insbesondere Langzeitversuche darstellen sowie die wissenschaftliche und technische Vertiefung der Mikrosiebfiltration und des Abgaswäschers. Bei der Mikrosiebfiltration ist die Bestimmung des

optimalen Abreinigungszeitpunktes in Abhängigkeit von der Siebgeometrie, Rohgasparameter und Abreinigungstechnologie zu detaillieren. Dazu gehört die Untersuchung weiterer Abreinigungsstrategien. Auch das Langzeitverhalten im Abgas wird sich erst durch weitere, länger andauernde Versuche bestimmen lassen. Weiteres Optimierungspotenzial besteht in der gezielten Veränderung der Mikrosieboberfläche, zur Minimierung des Druckverlusts, Verbesserung der Abscheideleistung und zur einfacheren Abreinigung. Beim Abgaswäscher ist insbesondere die Lebensdauer des Waschmittels durch gezielte Teermessungen weiter zu konkretisieren.

Literatur

- [B]
[BMU, 2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: »Referentenentwurf zur Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BimSchV)«, Berlin, 2007
- [F]
[FAL, 2004] Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Institut für Technologie und Biosystemtechnik: »Verwendung von Biodiesel in der Landwirtschaft – Möglichkeiten und bestehender Handlungsbedarf«, Abschlussbericht, Braunschweig, 2004
- [FNR, 2008] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.: »Biokraftstoffe. Basisdaten Deutschland«, Gülzow, 2008
- [K]
[Kästner, 2000] Kästner, M.: »Degradation of aromatic and polyaromatic compounds« In: Biotechnology, Vol. 11b: Environmental processes II, Chap. 9, pp. 90-125, Wiley-VCH, Weinheim, 2000
- [Klippel, 2007] Klippel N., Nussbaumer T.: »Wirkung von Verbrennungspartikeln, Vergleich der Gesundheitsrelevanz von Holzfeuerungen und Dieselmotoren«, Bundesamt für Energie, Bern, 2007, ISBN 3-908705-16-9
- [O]
[Obernberger, 2008] Obernberger, I.; Brunner, T.; Bärnthaler, G.: »Aktuelle Erkenntnisse im Bereich der Feinstaubemissionen bei Pelletsfeuerungen«, BIOS Bio-energiesysteme GmbH, Graz, Österreich, 2008
- [P]
[Patton, 1984] Patton, J.S.; Stone, B.; Papa, C.; Abramowitz, R.; Yalkowsky, S.H.: »Solubility of fatty acids and other hydrophobic molecules in liquid trioleoylglycerol«, Journal of Lipid Research, 25(1984), S. 189-197
- [Pilz, 1995] Pilz, T.; Löffler, F.: »Einfluss adhäsiver und kohäsiver Partikeleigenschaften bei der Filtration an Oberflächenfiltern«, In: Zeitschrift: Chemie Ingenieur Technik, 67(1995), S. 745-749. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 1995
- [S]
[Schmidt, 1996] Schmidt, E.; Löffler, F.: »Filternde Abscheider«. In: Brauer, H. (Hrsg.): Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen. S. 150-202. Springer Verlag, Berlin, 1996
- [Stieß 1997] Stieß, M.: »Mechanische Verfahrenstechnik 2«, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [Strecker, 2001] Strecker, M., Marutzky, R., Pieper A., Bahadir, M.: »Verminderung von Emissionen von NO_x, Dibenzo-p- Dioxinen und Dibenzofuranen bei der energetischen Verwertung von Holzabfällen«, Braunschweig, 2001
- [U]
[UBA, 2006] Umweltbundesamt: »Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen«, Hintergrundpapier, Dessau, März 2006

[W]
[WHO, 2006]

WHO
(www.euro.who.int/mediacentre/PR/2005/20050414_1?language=German)