

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters für Biomassekessel**

Zuwendungsempfänger:

**Universität Stuttgart - Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik - Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)**

Förderkennzeichen:

**11NR316 bzw. 22031611**

Laufzeit:

01.10.2013 bis 31.05.2015

Datum der Veröffentlichung:

**November 2015**

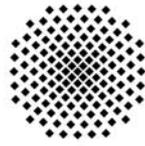
Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



**Universität Stuttgart**

**Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters für  
Biomassekessel**

Michael Struschka

Julia Goy

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685 6 3487

Fax: +49 711 685 6 3491

[ifk@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:ifk@ifk.uni-stuttgart.de)

November 2015



**Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)**

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart <b>Schlussbericht</b>
3a. Titel des Berichts <b>Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters für Biomassekessel</b>	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Struschka, Michael Goy, Julia	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.5.2015
	6. Veröffentlichungsdatum 30.11.2015
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  <b>Universität Stuttgart - Fakultät 4 Energie-, Verfahrens- und Biotechnik - Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart</b>	9. Ber.Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) <b>22031611 bzw. 11NR316</b>
	11a. Seitenzahl Bericht 40
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 11055 Berlin	12. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung: max. 2000 Zeichen  Mit Inkrafttreten der 2. Stufe der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, 2010) zum 1. Januar 2015 gelten für neu errichtete oder wesentlich geänderte Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe niedrige Staubgrenzwerte (0,02 g/m <sup>3</sup> , bezogen auf 13 Vol% O <sub>2</sub> ), die in der Praxis nur unter bestimmten Randbedingungen (z.B. Einsatz guter Brennstoffqualitäten) eingehalten werden können. Bei Verwendung von schlechten Brennstoffqualitäten sollten die Feuerungsanlagen mit Staubabscheidern ausgerüstet werden, damit die gesetzlichen Vorgaben im praktischen Betrieb sicher eingehalten werden können. Bisher ist kein Staubabscheider am Markt verfügbar, der für diese Anwendungsfälle kostengünstig und robust ist sowie langzeitstabil mit höheren Abscheidegraden betrieben werden kann.  In diesem Projekt wurde ein funktionsfähiges Muster eines Gewebefilters mit allen notwendigen Komponenten für einen zuverlässigen und betriebssicheren Filterbetrieb entwickelt. Hierzu gehören u.a. eine Abreinigungsverrichtung, Einrichtungen zur Überwachung und Regelung des Filter- und Abreinigungsbetriebs, Gebläse und eine Filterregelung. Ein wesentliches Entwicklungsziel war, eine sehr geringe Staubkonzentrationen im Reingas von < 10 mg/m <sup>3</sup> zu erreichen, was überwiegend eingehalten wurde. Die eingesetzten Filterelemente zeigten eine hohe chemische und physikalische Beständigkeit, d.h. weder der Chlorgehalt im Abgas noch höhere Eingangstemperaturen des Abgases führten zu Schäden am Filtergewebe selbst. Andere verwendete Bauteile zeigten jedoch z.T. deutliche Korrosionsspuren. Insgesamt konnte ein vergleichsweise einfaches, kostengünstiges Abreinigungsverfahren entwickelt werden, welches auch eine kompakte Bauweise mit wirtschaftlichen Druckverlusten aufweist und für eine breite Biomassepalette geeignet ist. Darüber hinaus konnten grundlegende Erkenntnisse zur Wirkungsweise sowie zum Betrieb und Einsatz von Gewebefiltern bei Biomassefeuerungen gewonnen werden. Zur Untersuchung des Filterelements und den Abreinigungstechniken wurde ein Standard-Prüfverfahren zur Durchführung von vergleichbaren Messungen entwickelt und umgesetzt.	
19. Schlagwörter Biomasse, Verbrennung, Staubabscheidung, Gewebefilter, Filterregelung, Prüfstand	
20. Verlag	21. Preis



# Inhalt

<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>2</b>
2.1 Staubabscheider für kleine und mittlere Biomassefeuerungen .....	2
2.2 Staubemissionen bei Biomassefeuerungen .....	3
<b>3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden</b> .....	<b>5</b>
3.1 Arbeitsprogramm.....	5
3.2 Aufbau des Filterprüfstandes .....	7
<b>4 Entwicklung und Bau des Filter-Funktionsmusters</b> .....	<b>10</b>
4.1 Entwicklung neuer Filterelemente .....	10
4.2 Entwicklung einer neuen Abreinigungstechnik.....	14
4.3 Entwicklung einer Filterregelung .....	16
4.4 Bau des Filter-Funktionsmusters.....	17
<b>5 Untersuchungsergebnisse</b> .....	<b>20</b>
5.1 Funktionstest des Filterprüfstandes .....	20
5.2 Druckverluste der unbelegten Filtergewebe.....	21
5.3 Abgasversuche mit Filtergewebe PZ 60.....	21
5.4 Abgasversuche mit Filtergewebe PZ 25.....	23
5.4.1 Standardisierter Prüfablauf und Versuchsprogramm .....	23
5.5 Ergebnisse - Variation vom Brennstoff.....	26
5.6 Ergebnisse - Variation des Bürstenmaterials .....	29
5.7 Ergebnisse - Variation der Phase 2 (Alterungsphase) .....	31
5.8 Ergebnisse - Abreinigung mittels Absaugung .....	33
5.9 Ergebnisse - Weitere Anmerkungen und Erkenntnisse.....	36
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>38</b>
<b>7 Literatur</b> .....	<b>40</b>



## 1 Einleitung und Zielsetzung

Mit Inkrafttreten der 2. Stufe der 1. BImSchV (Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen, 2010) zum 1. Januar 2015 gelten für neu errichtete oder wesentlich geänderte Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe niedrige Staubgrenzwerte ( $0,02 \text{ g/m}^3$ , bezogen auf 13 Vol%  $\text{O}_2$ ), die in der Praxis nur unter bestimmten Randbedingungen (z.B. sehr gute Brennstoffqualität, korrekte Anlageneinstellung, keine Anlagenmängel) eingehalten werden können. Bei schlechten Brennstoffqualitäten (z.B. Hackschnitzel mit hoher Feuchte und hohem Anteil an feinen Bestandteilen wie z.B. Nadeln) sollten die Feuerungsanlagen mit Staubabscheidern ausgerüstet werden, damit die Vorgaben der 1. BImSchV im praktischen Betrieb sicher eingehalten werden können. Allerdings weisen die derzeit auf dem Markt verfügbaren Staubabscheider für diesen Anwendungsbereich oft nur geringe Abscheidegrade auf, sind ggf. im Vergleich zum Kesselpreis zu teuer oder ggf. nur wenig erprobt. Bisher ist kein Staubabscheider am Markt verfügbar, der kostengünstig und robust ist sowie langzeitstabil mit höheren Abscheidegraden betrieben werden kann. Hier besteht noch ein wesentlicher Entwicklungsbedarf um für schlechtere Brennstoffqualitäten einen Markt im kleineren Leistungsbereich der Feuerungsanlagen zu erhalten.

Hieran knüpft das vorgestellte Projekt an, welches als Zielstellung die Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters zur Staubabscheidung in Biomassekessel kleiner bis mittlerer Leistung (bis ca. 500 kW) hat. Das Entwicklungsprojekt wird in Zusammenarbeit mit den Firmen LK Metallwaren GmbH in Schwabach und Oskar Winkel Filtertechnik in Amberg durchgeführt.

Die Entwicklung soll in 2 Stufen erfolgen. In einer ersten Stufe soll in diesem Projekt ein funktionsfähiges Muster des Gewebefilters entwickelt werden, welches alle notwendigen Komponenten für einen zuverlässigen und betriebssicheren Filterbetrieb aufweist. Hierzu gehören u.a. eine Abreinigungsverrichtung, Einrichtungen zur Überwachung und Regelung des Filter- und Abreinigungsbetriebs, Gebläse und eine Filterregelung.

Wesentliche Entwicklungsziele sind hierbei: sehr geringe Staubkonzentrationen im Reingas von  $< 10 \text{ mg/m}^3$ , eine hohe chemische und physikalische Beständigkeit der Filterelemente, ein einfaches, zuverlässiges und vor allem sehr kostengünstiges Abreinigungsverfahren, eine kompakte Bauweise mit wirtschaftlichen Druckverlusten und einer Eignung für eine breite Biomassepalette (von Holzbrennstoffen bis zu Reststoffen aus der Landwirtschaft).

Neben den eigentlichen Entwicklungsarbeiten sollen auch grundlegende Vorgänge und Anforderungen beim Einsatz von Gewebefiltern in diesen Biomassefeuerungen mit besonderer Berücksichtigung des typischen Betriebsverhaltens dieser Anlagen in der Praxis betrachtet werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Staubabscheider für kleine und mittlere Biomassefeuerungen

Derzeit werden für kleinere Biomassefeuerungen (Nennwärmeleistung < 100 kW) im Wesentlichen Elektrofilter entwickelt bzw. werden bereits am Markt angeboten, wobei für insgesamt 5 Filtersysteme eine für den Betrieb notwendige allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vorliegt. Bei den angebotenen bzw. entwickelten Filtersystemen findet die Staubabscheidung meist im Verbindungs- bzw. Abgasrohr statt. Einige Systeme werden auf der Schornsteinmündung bzw. kurz vor der Schornsteinmündung installiert. Da der Abscheideraum hierbei nicht deutlich definiert ist, ist die Abreinigung und Entnahme des abgeschiedenen Staubes bisher nicht befriedigend gelöst. Reinigungsarbeiten können deshalb von üblichen Betreibern nicht selbst durchgeführt werden. Außerdem weisen diese kleinen Elektrofilter nur eine mittlere bis geringe Abscheideleistung auf, können nur schlecht funktionsüberwacht werden und sind anfällig gegenüber Verschmutzung. Letzteres führt im praktischen Betrieb zu häufigen Durchschlägen, die mit Schallemissionen und einbrechender Abscheideleistung einhergehen (siehe z.B. Kiener et al., 2010 und Struschka et al., 2015).

Neben den kleinen und einfach aufgebauten Elektrofiltern wurde auch ein Tiefenfilter zur Staubabscheidung bei kleinen Biomassefeuerungen entwickelt (Athmann al., 2013), welches auf der Schornsteinmündung installiert wurde. Als Filtermedium wurden Fasermatten eingesetzt, eine Abreinigung war nicht vorgesehen, vielmehr sollten die Fasermatten ausgetauscht werden, wenn deren Aufnahmevermögen für Staub erschöpft war bzw. der Druckverlust durch die Staubbiladung zu hoch wurde.

Auch für mittlere Biomassefeuerungen (Nennwärmeleistung ab ca. 200 kW) gibt es bisher nur wenige Anbieter von Staubfiltern, z.B. Firma Köb Holzheizsysteme GmbH der Viessmann Group in A-Wolfurt oder Firma Nestro Lufttechnik GmbH in Schkölen. Diese Staubabscheider stehen nur für eigene Kesseltypen (z.B. Firma Köb) zur Verfügung oder sind bisher an Biomasseanlagen nur wenig erprobt und nur in Kombination mit einem Zyklon (z.B. Firma Nestro) einsetzbar (siehe z.B. Struschka et al., 2014).

Der von der Firma Köb angebotene Gewebefilter für den Holzheizkessel vom Typ Pyrot (Nennwärmeleistungsbereich 100 bis 1.250 kW) ist in Modulbauweise aufgebaut und kann somit an unterschiedliche Kesselleistungen (derzeit bis 540 kW) angepasst werden. Der Entwicklungsansatz für dieses Filtersystem stammt von der Firma Oskar Winkel Filtertechnik und wurde von dieser, in Zusammenarbeit mit der Firma Köb und mit Unterstützung des IFK, bis zur Serienreife weiterentwickelt (siehe z.B. Struschka et al., 2009).

Darüber hinaus bieten auch andere etablierte Filterhersteller (z.B. Scheuch GmbH in A-Aurolzmünster) Gewebefilter für Biomassefeuerungen an. Filter z.B. der Firma Scheuch werden allerdings überwiegend erst ab Kesselfeuerungsleistungen von über 1 MW (bzw. meist 5 MW) eingesetzt. Vereinzelt sind auch Gewebefilter an Kesseln < 1 MW Feuerungswärmeleistung installiert. Diese Filter sind allerdings nicht speziell an diese kleinen und mittleren Feuerungen und deren Betriebsverhalten angepasst. Die mangelnde Anpassung kann, wie anhand eigener Erfahrungen ermittelt wurde, zu negativen Auswirkungen auf den Kesselbetrieb führen. So kann z.B. der Druckstoß bei der Filterabreinigung zu überhöhten Reaktionen der Unterdruckregelung des Kessels führen, wodurch sich die Verbrennungsbedingungen

ebenfalls verändern. Dies kann zu erhöhten Rohgasstaubgehalten führen, wodurch sich die Abreinigungsintervalle verkürzen und damit die Störungen im Verbrennungsablauf zunehmen.

Bei Gewebefiltern werden, mit Ausnahme bei der Firma Köb, meist textile Filtergewebe eingesetzt, die nicht sehr temperaturbeständig sind (bis ca. 250 °C). Da ein Austrag von glühenden Partikeln bei Biomassefeuerungen nie ganz ausgeschlossen werden kann, müssen diese Filtermaterialien vor Funkenflug geschützt werden, um Beschädigungen an den Filterschläuchen zu verhindern. Dies kann z.B. durch Multizyklone erreicht werden, was allerdings die Kosten für die Abgasreinigung deutlich erhöht.

Bei den marktgängigen Systemen erfolgt die Abreinigung der beladenen Filterelemente mit Druckluftstößen. Hierzu muss vor Ort Druckluft erzeugt werden. Dies führt zu höheren Investitions- und Betriebskosten. Außerdem kann es durch die Druckluftherzeugung und die Druckluftstöße für die Betreiber der Feuerungsanlage und die Nachbarschaft zu Lärmbelästigungen kommen, was weitere Kosten für deren Reduzierung (z.B. Einbau von Abgasschalldämpfern) verursacht.

Zusammengefasst lässt sich der Stand der Technik bei Gewebefiltern wie folgt beschreiben:

- derzeit werden nur wenige Gewebefiltersysteme für Heizkessel mit Nennwärmeleistungen < 500 kW am Markt angeboten. Filter von Systemanbietern benötigen meist einen Funkenschutz (z.B. Zyklon), wodurch höhere Kosten verursacht werden
- die am Markt angebotenen Systeme für Kesselleistungen > 100 kW sind aufgrund der Konstruktion und der Druckluftabreinigung für die kleinen und mittleren Kessel unwirtschaftlich und z.T. auch unpraktikabel (kleinere Heizkessel sind oft in Wohn- oder Mischgebieten installiert, was eine Druckluftherzeugung und Abreinigung aufgrund der Lärmentwicklung erschwert)
- nicht alle angebotenen Gewebefiltersysteme sind auf das spezielle Betriebsverhalten kleiner Biomassekessel (z.B. relativ kurze Betriebszeiten, häufige Kesselstarts, häufiger Betrieb im Teillastbereich) angepasst. Eine mangelhafte Anpassung des Filtersystems hat aber u.U. negative Auswirkungen auf die Verbrennungsverhältnisse, was die Emissionen von gasförmigen Produkten unvollständiger Verbrennung erhöhen und die Betriebssicherheit des Filters mindern kann
- bei bisherigen Lösungen ist z.T. ein Bypass notwendig, damit beim Anfahren des Heizkessels und im Gluthaltebetrieb eine Kondensation von Wasserdampf im Filter vermieden wird oder damit eine effektive Abreinigung erreicht wird. Da bei Heizkesseln diese Betriebszustände aufgrund des Einsatzzwecks als Gebäudeheizung häufig auftreten können, verschlechtert sich der Filterwirkungsgrad erheblich, wenn z.B. bei emissionsträchtigen Zuständen der Filter umfahren werden muss.

## 2.2 Staubemissionen bei Biomassefeuerungen

Moderne Biomassefeuerungen sind, bei sachgerechter Installation und richtiger Einstellung und Betriebsführung sowie bei Verwendung guter Brennstoffqualitäten in der Lage, einen

nahezu vollständigen Ausbrand mit geringen Staubemissionen zu erreichen, wobei die emittierten Stäube hauptsächlich aus anorganischen Verbindungen bestehen. Ungünstige Verbrennungsbedingungen, verursacht von z.B. schlechten Brennstoffqualitäten, An- und Abfahr- sowie Regelvorgängen und falschen Kesseleinstellungen können zu hohen bis sehr hohen Emissionen von Produkten unvollständiger Verbrennung führen, wobei auch die Staubemissionen entsprechend ansteigen. Neben anorganischen Verbindungen enthalten die Stäube hierbei verstärkt Ruß und kondensierte kohlenstoffhaltige Verbindungen.

Somit tragen die verschiedenen Partikelbildungsmechanismen bei der Biomasseverbrennung in Abhängigkeit der Verbrennungsbedingungen unterschiedlich stark zu den Gesamtstaubemissionen bei, wodurch sich auch die Partikel- bzw. Staubeigenschaften stark ändern. Unter nahezu vollständigen Verbrennungsbedingungen gehören folgende Partikelbildungspfade zu den wichtigsten [Oser et al, 2003]:

- Fest-Dampf-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Hierbei verdampfen die Komponenten im Glutbett (bei  $> 600\text{ °C}$ ) und bilden, bei der Temperaturabnahme im Abgas, über Nukleation, Koagulation und heterogene Kondensation Partikel. Bei den so entstandenen Partikeln handelt es sich um anorganische Salze im Größenbereich von 100 nm (vor allem Kaliumverbindungen wie z.B. Kaliumsulfat ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) und Kaliumchlorid (KCl)).
- Fest-Partikel-Pfad anorganischer Bestandteile: Diese schwerflüchtigen anorganischen Komponenten des Holzes gelangen als feste Komponenten ins Abgas und können dort durch Kondensation und Koagulation wachsen. Diese Salze, meist Calciumverbindungen wie CaO, haben einen aerodynamischen Durchmesser im Bereich von 1  $\mu\text{m}$ .

Läuft die Verbrennung unvollständig ab, werden Kohlenstoff-Partikel mit dem Abgas emittiert, die bei der pyrolytischen Zersetzung freigesetzt wurden und anschließend nicht vollständig oxidiert sind. Dabei kann zwischen kohlenstoffhaltigen festen oder flüssigen Zersetzungsprodukten sowie C-haltigen Syntheseprodukten unterschieden werden:

- C-haltige (kondensierte) Zersetzungsprodukte sind organische Verbindungen (z.B. Teere), welche aus Fragmenten der Holzbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin bestehen.
- Zu den kohlenstoffhaltigen Syntheseprodukten gehört z.B. Ruß. Die Rußbildung wird durch Sauerstoffmangel in der Flamme und durch hohe Temperaturen begünstigt.

Bei höheren Gasgeschwindigkeiten im Brennstoffbett, bei z.B. Rostfeuerungen, können sowohl Aschepartikel mitgerissen (Flugasche) als auch Ablagerungen abgelöst und freigesetzt werden. Diese Partikel liegen meist im Größenbereich  $\geq 10\ \mu\text{m}$  und sind für die Gesamtstaubemissionen aufgrund des i.d.R. geringeren Anteils eher von untergeordneter Bedeutung.

### 3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden

#### 3.1 Arbeitsprogramm

Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines kompakten und kostengünstigen Gewebefilters zur Staubabscheidung in Biomassekesseln kleiner bis mittlerer Leistung (bis ca. 500 kW). Neben den eigentlichen Entwicklungsarbeiten sollen grundlegende Vorgänge und Anforderungen beim Einsatz von Gewebefiltern in diesen Biomassefeuerungen mit besonderer Berücksichtigung des typischen Betriebsverhaltens dieser Anlagen in der Praxis untersucht und in Bezug auf die Filterentwicklung bewertet werden. Schwerpunktmäßig sollten folgende Punkte bearbeitet werden:

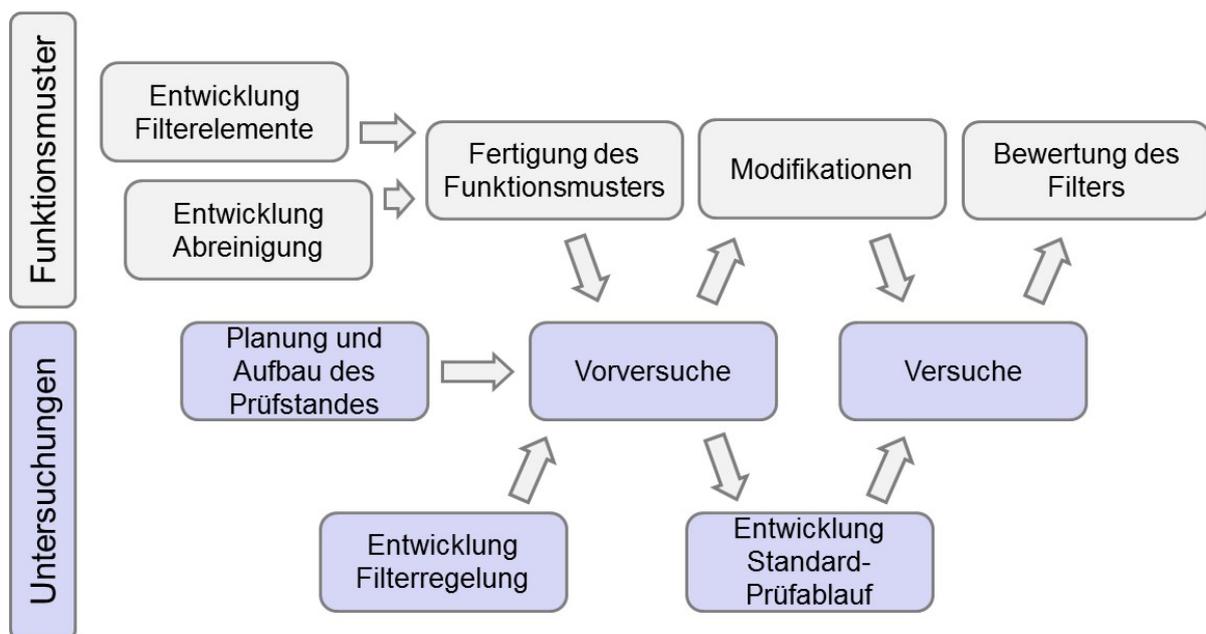
- **Entwicklung neuer Filterelemente:** neue Filterelemente sollten entwickelt werden, die große Abscheideflächen, geringen Druckverlust und eine ausreichende mechanische Stabilität aufweisen. Außerdem sollen die Elemente so geformt und beschaffen sein, dass eine zuverlässige, dichte und kostengünstige Montage im Filtergehäuse möglich ist.
- **Entwicklung einer neuen Abreinigungstechnik:** eine neue, an die speziellen Belange des geplanten Einsatzbereiches angepasste Abreinigungstechnik für die Filterelemente soll entwickelt und deren einzelne Komponenten getestet werden. Abreinigungstechnik und Filterelemente sind bestmöglich aufeinander abzustimmen. Die Kosten für die Abreinigungstechnik bestimmen wesentlich die Gesamtkosten und die Wirksamkeit sowie Zuverlässigkeit des Filtersystems.
- **Entwicklung einer Filterregelung:** Es soll eine einfache aber vollumfängliche Filterregelung entwickelt und an das Funktionsmuster adaptiert werden, um alle Sicherheits- und Betriebsfunktionen überwachen und regeln zu können. Außerdem sind die Schnittstellen zur Kesselregelung zu definieren und ggf. Anforderungen an die Anpassung der Kesselregelung fest zu legen.
- **Bau des Filter-Funktionsmusters:** Aufbau eines voll funktionsfähigen Filtermusters bestehend u.a. aus Gehäuse, Filterelementen, Abreinigungseinrichtung, Saugzuggebläse, Filterregelung und notwendiger Überwachungstechnik (z.B. Unterdruck- und Temperaturmessung). Adaption der Regelung, Durchführung von Funktionstests.
- **Grundlegende Untersuchungen mit dem Filter-Funktionsmuster:** Es sollen grundlegende Untersuchungen mit dem Funktionsmuster an Feuerungsabgasen durchgeführt werden. Hierdurch sollen einerseits allgemeingültige Erkenntnisse zur Konstruktion, dem Betrieb und Verhalten von Gewebefiltern beim Einsatz in kleineren und mittleren Biomassefeuerungen erhalten werden, die dann der gesamten Fachwelt zur Verfügung gestellt werden kann. Außerdem soll das spezielle Betriebsverhalten des Funktionsmusters bewertet werden. Neben Funktionstests (Abscheideleistung, Robustheit, Temperaturbeständigkeit) sollen auch Dauertests durchgeführt werden, um das Langzeitverhalten des Filters bewerten zu können.
- **Modifikation des Funktionsmusters:** In einer Entwicklungsschleife soll, aufbauend auf den Ergebnissen des AP 6, eine Verbesserung des Funktionsmus-

ters erreicht werden. Die Entwicklungsfortschritte sollen anhand von Versuchen mit Feuerungsabgasen aufgezeigt und bewertet werden. Ziel dieses AP ist der Nachweis, dass die wesentlichen Bestandteile des Funktionsmusters (Filterelemente, Abreinigungseinrichtung und die Filterregelung) die technischen Anforderungen für den Einsatz an Biomassefeuerungen erfüllen und wirtschaftlich realisierbar sind. Dies ist die Voraussetzung für die dann geplante nächste Entwicklungsstufe (Entwicklung eines marktreifen Produkts).

Die schwerpunktmäßige Aufteilung der oben beschriebenen Arbeitsinhalte auf die Projektpartner gestaltete sich wie folgt (insgesamt waren alle Projektpartner jeweils in jedem Arbeitsinhalt unterstützend tätig):

Entwicklung und Konstruktion neuer Filterelemente:	LK Metallwaren GmbH Oskar Winkel Filtertechnik
Entwicklung und Konstruktion einer neuen Abreinigungstechnik	LK Metallwaren GmbH Oskar Winkel Filtertechnik
Entwicklung einer Filterregelung	IFK
Bau eines Filter-Funktionsmusters	LK Metallwaren GmbH Oskar Winkel Filtertechnik
Grundlegende Untersuchungen mit Funktionsmuster	IFK
Modifikation des Filter-Funktionsmusters	IFK

In Abbildung 3.1 sind die Vorgehensweise und die einzelnen Arbeitsschritte des Projektablaufs schematisch dargestellt.



**Abbildung 3.1 Schematische Darstellung der Vorgehensweise und der Arbeitsschritte im Projektablauf**

### 3.2 Aufbau des Filterprüfstandes

Zur Untersuchung des entwickelten Funktionsmusters und für dessen Modifikation wurde ein Prüfstand geplant und aufgebaut. Die Untersuchungen des Funktionsmusters erfolgten mit dem Abgas eines Biomasse-Heizkessels. Das Filterfunktionsmuster ist in einer eigens für den Filter entworfenen und aufgebauten unabhängigen Filterprüfeinheit eingebaut. Die Untersuchungen erfolgen im Bypass der Feuerung, wobei mittels eines Gebläses ein regelbarer Teilvolumenstrom durch das Filter (Funktionsmuster) gesaugt wird. Abbildung 3.2 zeigt den schematischen Aufbau des Filterprüfstandes.

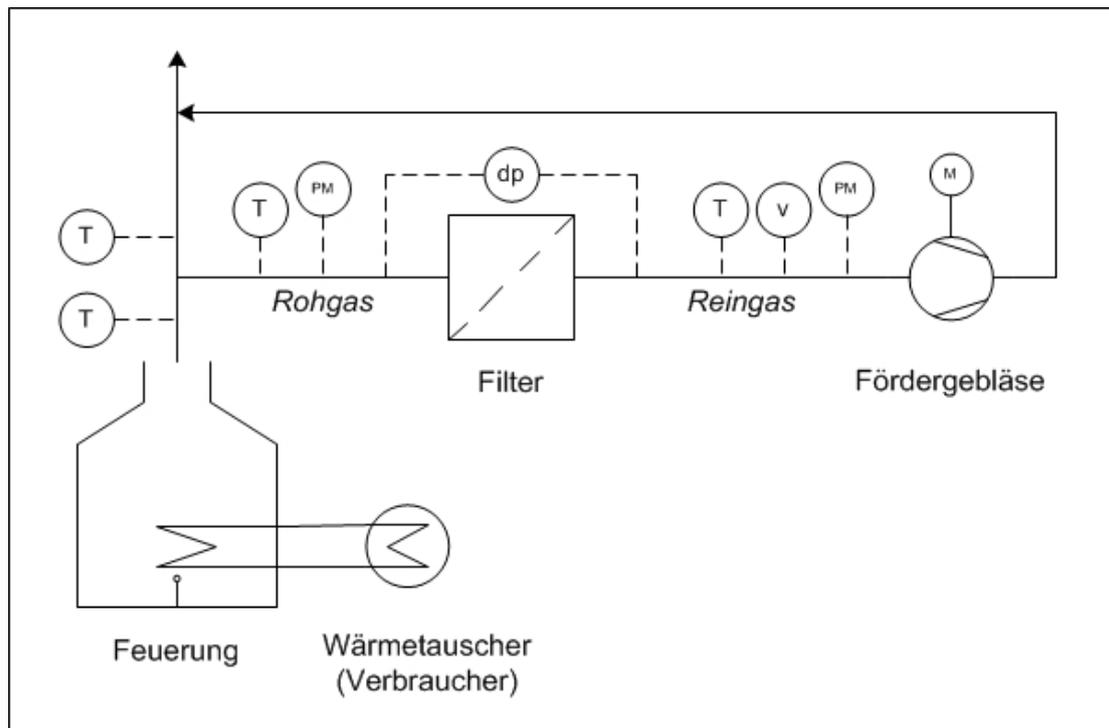
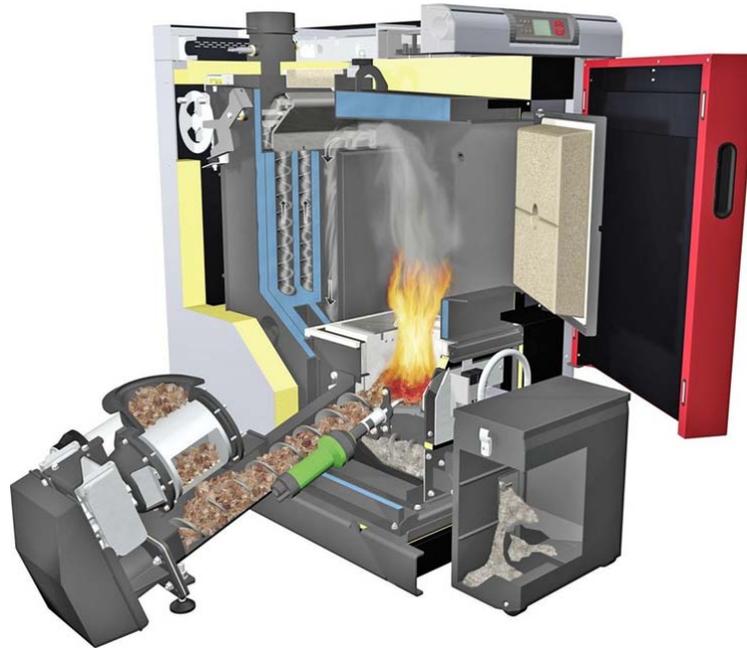


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung des Filterprüfstandes

Neben Temperaturen im Abgas der Feuerung, im Rohgas am Filtereingang und im Reingas am Filterausgang werden der Differenzdruck zwischen Filtereingang und Filterausgang (Druckverlust des Filters) und der Abgasvolumenstrom (Bypassvolumenstrom) durch den Filter kontinuierlich gemessen. Zur Charakterisierung der Verbrennungsbedingungen werden die Konzentrationen an  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{VOC}$  im Abgas ermittelt, wobei diese Messungen bei unveränderter Kesseleinstellung und beim Betrieb mit einer Brennstoffqualität nicht immer durchgängig erfolgten. Zur Bestimmung des Abscheidegrades des Funktionsmusters wurden exemplarische Staubmessungen mit gravimetrischen Staubmessverfahren im Roh- und Reingas des Funktionsmusters durchgeführt.

Zur Regelung des Fördergebläses der Prüfeinheit, zur Steuerung der Filterabreinigung sowie zur Erfassung aller Messgrößen wird ein entsprechend aufgebautes LabVIEW-Programm verwendet.

Als Feuerungsanlage wurde der Hackgutkessel T4-24 mit einer Nennwärmeleistung von 24 kW des Herstellers Fröling Heizkessel- und Behälterbau GmbH in A-4710 Grieskirchen eingesetzt, der für Holzhackgut und Holzpellets geeignet ist. Der Heizkessel ist für Technikumsversuche durch erweiterte Einstellmöglichkeiten, der Möglichkeit des Austauschs einer Umlenkplatte am Feuerraumausgang als Abtrennung zum Wärmetauscher (hierdurch werden höhere Abgastemperaturen erreicht) modifiziert. Abbildung 3.3 zeigt ein Schnittbild des für die Untersuchungen eingesetzten Hackgutkessels.



**Abbildung 3.3** Schnittbild des eingesetzten Hackgutkessels T4-24 des Herstellers Fröling (Fröling, 2015)

Als Brennstoffe wurden Waldhackschnitzel mit einer Beimischung von Heupellets, Holzpellets mit einer Beimischung von Heupellets und Holzpellets ohne Beimischung eingesetzt. Die Brennstoffmischung Waldhackschnitzel / Heupellets wurde hauptsächlich in Vorversuchen eingesetzt. Eine Brennstoffanalyse der in den Hauptversuchen eingesetzten Holz- und Heupellets zeigt Tabelle 3.1. Heupellets unterscheiden sich u.a. durch den höheren Asche- und Kaliumgehalt von den Holzpellets.

Die Heupellets wurden beigemischt, damit sich im Abgas höhere Staubkonzentrationen ergeben. Dies war einerseits notwendig, um die Versuchszeiten zu reduzieren, da sich dadurch eine schnellere Beladung des Filters ergibt mit entsprechend häufigeren Abreinigungszyklen. Andererseits ergab sich dadurch auch eine gewünschte größere Varianz der Staubeigenschaften, da sich der Rußanteil im Staub je nach Beimischungsanteil der Heupellets und Betriebszeit zwischen den Reinigungsintervallen des Heizkessels veränderte.

**Tabelle 3.1 Elementaranalyse, Heizwert und Ascheanalyse der in den Hauptversuchen eingesetzten Holz- und Heupellets**

Bezeichnung	Einheit	Holzpellets DINPlus	Heupellets
Elementaranalyse -Bezug wf-			
flüchtige Stoffe	%	83,2	73,5
Fixed C	%	16,4	17,0
Kohlenstoff (C)	%	50,3	44,1
organ. Wasserstoff (H)	%	5,6	6,9
Sauerstoff (O)	%	43,5	37,6
Stickstoff (N)	%	0,1	1,4
Chlor (Cl)	%	0,0	0,4
Asche (A) 550°C	%	0,5	9,5
Bestimmung Heizwert -Bezug roh-			
Brennwert (Hs)	kJ/kg	18.793	16.426
Heizwert (Hi)	kJ/kg	17.676	15.132
Auszug Ascheanalyse			
Aluminium (Al)	%	0,64	1,4
Eisen (Fe)	%	0,98	1,0
Kalium (K)	%	10,7	16,8
Kalzium (Ca)	%	24,1	7,9
Magnesium (Mg)	%	3,6	3,1
Mangan (Mn)	%	4,6	0,06
Phosphor (P)	%	1,7	2,6
Schwefel (S)	%	0,69	1,1
Silizium (Si)	%	2,2	19,2
organ. Kohlenstoff (C)	%	6,6	3,7
Rest	%	43,7	42,8

wf wasserfrei

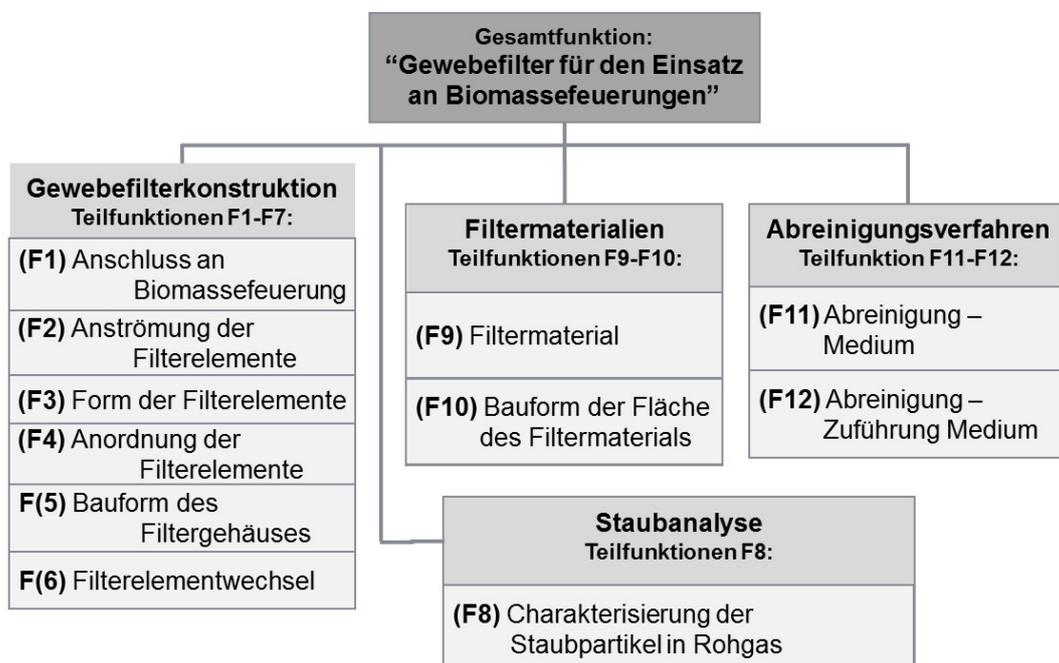
roh Rohsubstanz, wie verfeuert

## 4 Entwicklung und Bau des Filter-Funktionsmusters

Wesentliche Bestandteile des Funktionsmusters sind die Filterelemente, die Abreinigungstechnik für die Filterelemente und eine Filterregelung. Für den Aufbau des Funktionsmusters wurden alle Komponenten neu entwickelt und aufeinander abgestimmt. Das Funktionsmuster wurde zur Durchführung der Untersuchungen mit Feuerungsabgasen in den Filterprüfstand des Instituts integriert.

### 4.1 Entwicklung neuer Filterelemente

Die Bauform der Filterelemente und die Anforderungen an das Filtermaterial stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der geplanten Abreinigungstechnik. Zur Auswahl des Filtermaterials und zur Festlegung der Filtergeometrie sowie der Abreinigungstechnik wurde deshalb u.a. eine Literaturrecherche zu Einsatzbereichen von Gewebefiltern, verwendeten Filtermaterialien, Filterkonstruktionen und Abreinigungsverfahren mit dem Ziel durchgeführt, eine Bewertung der bisherigen Konstruktionen in Bezug auf den Einsatz an Biomassefeuerungen vorzunehmen. Die technische Bewertung erfolgte anhand einer morphologischen Analyse, wobei die Gesamtfunktion in einzelne Teilfunktionen unterteilt und jeweils bewertet wurden, siehe Abbildung 4.1.



**Abbildung 4.1 Bewertung bisheriger Filterkonstruktionen für den Einsatz an Biomassefeuerungen - Aufteilung der abstrahierten Gesamtfunktion in mehrere Teilfunktionen (Kudryavtseva, 2014)**

Das Ergebnis der Bewertung ergab drei bevorzugte Konzeptvarianten (siehe Abbildung 4.2), wobei die Variante 5 im Prinzip von der Firma Köb umgesetzt und z.B. in Struschka et al. (2009) ausführlich untersucht wurde. Allerdings ist das Ziel in dieser Entwicklung, eine ande-

re Abreinigungstechnik einzusetzen, da die Druckluftabreinigung bei Biomassefeuerungen und in Verbindung mit Edelstahlgeweben auch einige Nachteile besitzt. Im Wesentlichen sind hier zu nennen: Betriebs- und Investitionskosten der Druckluftherzeugung, Lärmentwicklung bei der Abreinigung, Rückwirkung des Druckstoßes in den Kessel und damit eine mögliche Störung der Unterdruckregelung des Kessels, mangelnde Abreinigungswirkung durch die starre Konstruktion der Filterpatronen.

Das Filtermaterial in Form von Edelstahlgewebe hat jedoch bei Biomassefeuerungen, im Vergleich zu textilen Geweben, einige wesentliche Vorteile: sehr hohe Temperaturbeständigkeit und damit unempfindlich gegenüber Funkenflug und ggf. auftretende Temperaturspitzen (zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. Zyklonabscheider vor dem Gewebefilter sind nicht notwendig), chemisch ausreichend stabil gegenüber korrosiven Gasen und mechanisch sehr belastbar, glatte und regelmäßige Oberfläche mit definierten Maschenweiten und Porositäten sowie eine gute Verarbeitbarkeit mit variabler Formgebung.

I Konzeptvariante 7	II Konzeptvariante 5	III Konzeptvariante 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Saugfilter mit Bypass-Anschluss an Feuerung</li> <li>▪ Anströmung der Filterelemente von oben und von außen nach innen</li> <li>▪ Sinterlamellenfilter</li> <li>▪ Horizontale Anordnung der Filterelemente</li> <li>▪ Zentrische Zuführung des Rohgases mit Verteilung durch Einlassdiffusor oder Prallfläche</li> <li>▪ Filtermaterial aus Glasgewebe, PPS, PI mit PTFE-Membrane oder Nanofaserschicht</li> <li>▪ Abreinigung durch schnelle, kurzzeitige, rohgasseitige, Druckabsenkung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Saugfilter mit Bypass-Anschluss an Feuerung</li> <li>▪ Anströmung der Filterelemente von unten und von außen nach innen</li> <li>▪ Filterschläuche</li> <li>▪ Zentrische Zuführung des Rohgases mit Verteilung durch Einlassdiffusor oder Prallfläche</li> <li>▪ Filtermaterial aus Edelstahl-gewebe</li> <li>▪ Druckstoßabreinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Saugfilter mit direktem Anschluss an Feuerung</li> <li>▪ Anströmung der Filterelemente von unten und von außen nach innen</li> <li>▪ Filterpatrone</li> <li>▪ Vertikale Anordnung der Filterelemente</li> <li>▪ Zentrische Zuführung des Rohgases mit Verteilung durch Einlassdiffusor oder Prallfläche</li> <li>▪ Filtermaterial aus Glas-gewebe, PPS, PI mit PTFE-Membrane oder Nanofaser-schicht</li> <li>▪ Druckstoßabreinigung</li> </ul>

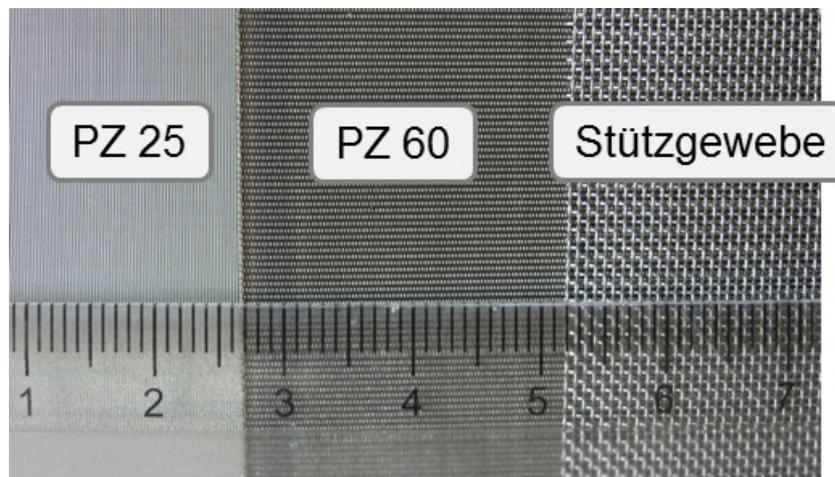
**Abbildung 4.2 Ergebnisse der technischen Bewertung bisheriger Filterkonstruktionen anhand einer morphologischen Analyse (Kudryavtseva, 2014)**

Die Gewebe werden in unterschiedlichen Werkstoffen, Webarten, Drahtstärken und Maschenweiten angeboten. Auf Basis eines internen Pflichtenheftes der Projektpartner über die wesentlichsten Anforderungen an das Filtergewebe und die Filterelemente wurden für die Untersuchungen zwei unterschiedliche Edelstahlfiltergewebe ausgewählt. Deren wesentliche Eigenschaften sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Diese Filtergewebe, die für die eigentliche Partikelabscheidung verantwortlich sind, wurden auf einem groben Stützgewebe montiert.

**Tabelle 4.1 Spezifikationen der für die Untersuchungen ausgewählten Edelstahlfiltergewebe nach Herstellerangaben**

Firma Paul GmbH & Co. KG Metallgewebe- und Filterfabriken, 36393 Steinau an der Straße	Produktbezeichnung	
	PZ 60	PZ 25
Fertigungsqualität	PACO-Filter	
Gewebe	glatte Bindung, Panzertresse (umgekehrte Tresse)	
Werkstoff	1.4404	
Gewebe-Nr.	175 / 50	625 / 104
Filterfeinheit nom. [mm]	0,060	0,025
Drahtdurchmesser (Kette/Schuss) [mm]	0,153 / 0,300	0,041 / 0,160
Gewebedicke [mm]	0,56	0,24
Porosität [%]	53	55
Gewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	2,14	0,87

Die beiden ausgewählten Filtergewebe und das verwendete Stützgewebe sind in Abbildung 4.3 abgebildet.



**Abbildung 4.3 Strukturen der Filtergewebe PZ 25 und PZ 60 sowie des Stützgewebes**

Aufgrund der im folgenden Kapitel beschriebenen ausgewählten Abreinigungstechnik musste eine einfache, rotationssymmetrische Form der Filterelemente gewählt werden, die auch in einer Modulbauweise eingesetzt werden kann, um die Filtergröße an die Feuerungsleistung des Heizkessels anzupassen. Durch die für das Funktionsmuster gewählte einfache Geometrie ist die Filterfläche je Filterelement vergleichsweise gering, allerdings können die einzelnen Filterelemente mit geringen Abständen zueinander sehr kompakt in ein Gehäuse integriert werden. Abbildung 4.4 zeigt den Aufbau des eingesetzten Filterelementes mit den verwendeten Geweben (Stützgewebe und Obergewebe PZ 60). In Tabelle 4.2 ist die Berechnung der effektiven Filterfläche von 0,18 m<sup>2</sup> für das Filterelement aufgelistet. Tabelle 4.3 zeigt einen Vergleich von Auslegungs- und realen Daten für das Funktionsmuster.

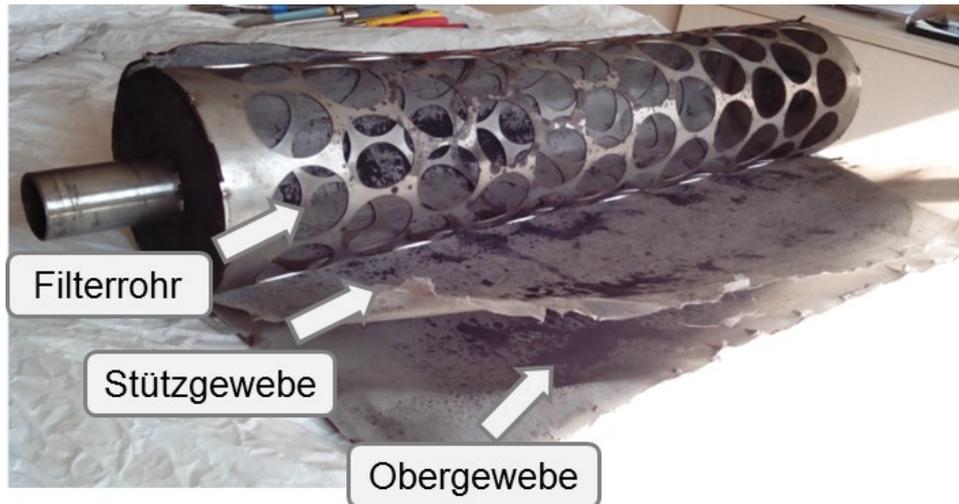


Abbildung 4.4 Aufbau des eingesetzten Filterelementes mit verwendeten Geweben (Stützgewebe und Obergewebe PZ 60)

Tabelle 4.2 Kenndaten des Funktionsmusters - Berechnung der effektiven Filterfläche

Parameter	Einheit	Funktionsmuster
Länge Filterrohr	[m]	0,65
Breite Filterrohr	[m]	0,47
Fläche Filterrohr	[m <sup>2</sup> ]	0,30
Lochdurchmesser Lochblech	[mm]	50,00
Lochradius	[m]	0,025
Lochfläche 1 Loch	[m <sup>2</sup> ]	0,002
Anzahl Löcher im Lochblech	[-]	96,00
Lochfläche alle Löcher (Gasdurchtritt)	[m <sup>2</sup> ]	0,188
Fläche Stege Lochblech (kein Gasdurchtritt)	[m <sup>2</sup> ]	0,114
Überlappung und Abdichtung (kein Gasdurchtritt)	[m <sup>2</sup> ]	0,013
<b>effektive Filterfläche</b>	<b>[m<sup>2</sup>]</b>	<b>0,18</b>

Tabelle 4.3 Kenndaten des Funktionsmusters - Vergleich von Auslegungs- und realen Daten

Parameter	Einheit	Auslegung	Funktionsmuster	Anteil real zu ausgelegt
effektive Filterfläche	[m <sup>2</sup> ]	0,24	0,18	75%
Gasvolumenstrom	[Bm <sup>3</sup> /h]	30	14	47%
Gasgeschwindigkeit	[m/s]	1,05	0,5	48%
Filterflächenbelastung	[Bm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h]	120	78	65%

Das Stütz- und Obergewebe wird auf das Filterrohr punktförmig aufgeschweißt und die Nähte werden mit z.B. Hochtemperatursilikon abgedichtet. Hierdurch entsteht eine dichte und langzeitstabile Verbindung zwischen Gewebe und Filterrohr.

## 4.2 Entwicklung einer neuen Abreinigungstechnik

Übliche Abreinigungsverfahren bei Gewebefiltern sind z.B. die Druckstoßregenerierung, die Niederdruckrückspülung, eine schnelle Druckabsenkung auf der Rohgasseite, die Rüttelregenerierung, eine Ultraschallreinigung oder die Entfernung des Staubes mittels einer Waschflüssigkeit.

Wesentliche Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Abreinigungsverfahrens für den Einsatz der Filterelemente an Biomassefeuerungen im Geltungsbereich der 1. BImSchV sind: Investitionskosten des Verfahrens (bzw. des gesamten Filters) im Verhältnis zu den Kosten des Heizkessels, Rückwirkung der Abreinigung auf den Kesselbetrieb (diese sollte möglichst rückwirkungsfrei sein), Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität (auch beim Anfall von klebrigen Stäuben oder hohen Staubgehalten im Rohgas muss die Abreinigung zuverlässig funktionieren, die Reinigungswirkung muss über eine längere Betriebszeit, z.B. eine Heizperiode, im Mittel konstant erhalten bleiben), Lärmentwicklung (geringe Lärmentwicklung, so dass keine Zusatzeinrichtungen, z.B. Abgasschalldämpfer, notwendig werden) und der Hilfsenergiebedarf zur Abreinigung (und auch zum Filterbetrieb insgesamt).

Eine Abwägung der o.g. Kriterien und die Bewertung vorhandener Abreinigungstechniken führten letztlich zu folgenden Entwicklungsansätzen:

- Abreinigung mittels Bürsten (Auswahl von 3 Bürsten-Varianten)
- Abreinigung durch eine Absaugung mittels Düsen.

Die Abreinigung erfolgt hierbei derart, dass die Abreinigungstechnik mit einem definierten Kontakt (Anpressdruck) bzw. Abstand zum Filterelement montiert wird und das Filterelement um die Achse gedreht wird. Durch diese Drehbewegung erfolgt die Abreinigung in einem schmalen Bereich über den gesamten Umfang des Filterelements.

Für die Abreinigung mittels Bürsten (Form: Leisten- oder Streifenbürste) sollten 3 unterschiedliche Varianten eingesetzt werden, die sich durch das Borstenmaterial (Drähte bzw. Fasern) und damit den Eigenschaften wie Biegsamkeit, Besatzdichte, Besatzbreite und Temperaturbeständigkeit unterscheiden. In Abbildung 4.5 sind die ausgewählten Bürstenvarianten abgebildet, in Tabelle 4.4 sind die Spezifikationen der für die Untersuchungen ausgewählten Leistenbürsten entsprechend den Herstellerangaben aufgelistet.

Um einen gleichmäßigen Kontakt der Borsten mit dem Filtergewebe zu erreichen, erfolgte eine Aufteilung der Bürsten in 3 Segmente über der Länge des Filterelementes. Aufgrund einer fertigungsbedingten Unwucht des Filterrohrs musste für die Montage der Bürsten eine spezielle Halterungen mit Druckfedern (Federnbezeichnung D-090Z des Herstellers Firma Gutekunst + Co.KG, D-Metzingen) zum Nachführen der Bürstensegmente entworfen und umgesetzt werden.



**Abbildung 4.5** Abreinigung mit Leistenbürsten - Auswahl von 3 Varianten

**Tabelle 4.4** Spezifikation der ausgewählten Leistenbürsten nach Herstellerangaben

Spezifikation der Leistenbürsten	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Material	Kunststoff	Metall	Metall
Herstellerbezeichnung Besatz	Pekalon 0,30 mm natur, glatt	V2a-Draht gewellt 0,10 mm	V2a-Draht gewellt 0,25-30 mm
Breite der Borsten (Aufweitung / Maximum)	2 mm	4 mm	6 mm
Borstenlänge ab Klemmleiste	18 mm	18 mm	18 mm

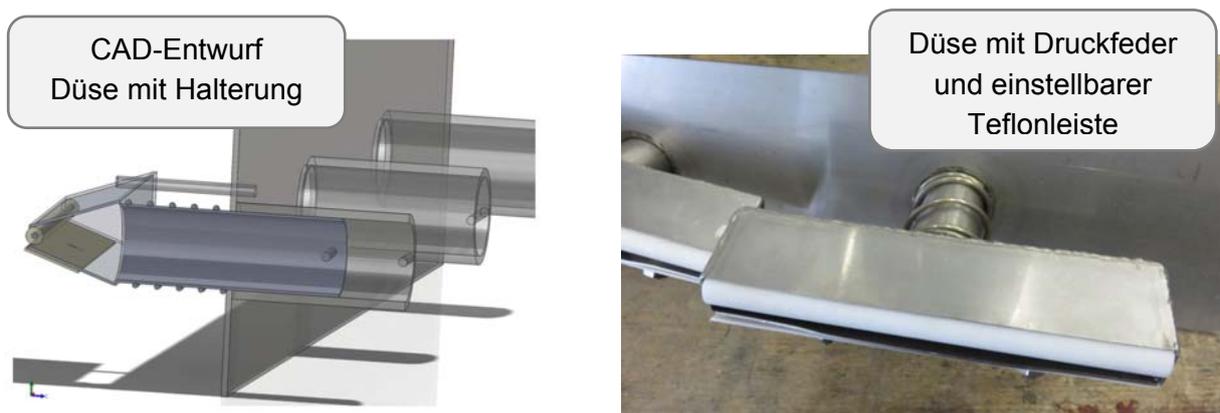
Für die Auswahl der Druckfedern wurde angenommen, dass der Anpressdruck der Federn dem Eigengewicht des Bürstensegmentes entsprechen sollte. Jedes Bürstensegment besitzt zwei Halter mit je einer Feder, siehe Abbildung 4.6.



**Abbildung 4.6** CAD-Entwurf der Haltekonstruktion für die Streifenbürsten (links) und Foto eines Bürstensegments mit 2 Haltern (rechts)

Die Abreinigung mit Bürsten wird durch die Filterregelung gestartet und gestoppt und ist somit automatisiert möglich.

Neben der Bürstenabreinigung wurde auch die Variante Düsenabreinigung umgesetzt. Wegen der Unwucht des Filterrohrs erfolgte hier eine Aufteilung in 4 Segmente über der Länge des Filterelementes, d.h. es werden vier einzelne Düsen eingesetzt. Damit durch die Düsen eine gute Saugwirkung auf der Filteroberfläche erreicht wird, müssen diese möglichst dicht und mit einem definierten Anpressdruck auf dem Filtergewebe aufliegen. Die Anpressung an das Filtergewebe erfolgt hierbei ebenfalls durch Druckfedern (Federbezeichnung D-263Z-10 des Herstellers Firma Gutekunst + Co.KG, D-Metzingen). Aufgrund des zu großen Anpressdruckes wurden die Standardfedern nachträglich gekürzt und so der richtige Anpressdruck eingestellt. In Abbildung 4.7 ist ein CAD-Entwurf der Haltekonstruktion für die Düsen und das Foto eines Düsensegments mit einem zentrischen Halter mit Druckfeder dargestellt. Eine Verdrehsicherung verhindert, dass sich die Düsensegmente durch die Drehbewegung des Filterelementes aus der waagrechten Position verstellen. Absaugung und Abreinigung erfolgen segmentweise durch das manuelle Anschließen eines Staubsaugers an das jeweilige Düsensegment.



**Abbildung 4.7 CAD-Entwurf der Haltekonstruktion für die Düsen (links) und Foto eines Düsensegments mit einem Halter und Druckfeder (rechts)**

### 4.3 Entwicklung einer Filterregelung

Um alle Sicherheits- und Betriebsfunktionen überwachen und regeln zu können, wurde eine einfache aber vollumfängliche Filterregelung für die Durchführung mit Feuerungsabgasen entwickelt. Die Filterregelung ist hierbei ein Bestandteil der Prüfstandsregelung, siehe hierzu auch Kapitel 4.4.

Die Filterregelung startet die Abreinigung entweder anhand festgelegter Betriebszeiten (z.B. alle 30 Minuten) oder bei Erreichen eines festgelegten Differenzdruckes (z.B. 1.000 Pa). Damit die Abreinigung nicht startet wenn die Filteroberfläche feucht ist, z.B. kurz nach dem Kesselstart, kann eine Temperaturschwelle für die Reingastemperatur gewählt werden, ab der eine Reinigung durchgeführt werden kann.

In der Filterregelung kann eingestellt werden, wie lange eine Reinigung dauern soll, z.B. 25 s, und wie oft diese Reinigungszeit je Reinigungsvorgang durchlaufen werden soll (z.B. 2 Mal). Die Drehgeschwindigkeit des Filterelements wurde so gewählt, dass in 50 s eine vollständige Umdrehung erreicht wurde. D.h. mit 2 x 25 s Reinigungszeit wird einmal die gesamte Oberfläche des Filters gereinigt.

Wichtige Schnittstellen zur Kesselregelung sind die Überwachung folgender Funktionen:

Unterdruck im System bzw. Druckverlust des Filters:

- Sicherheitsüberwachung des Systemdrucks
- Unterdruck im Kessel / Feuerraum
- Wirksamkeit der Abreinigung (Restdruckverlust).

Temperaturen im System:

- Erkennung / Vermeidung von Kondensation auf der Filteroberfläche
- keine Aktivierung der Abreinigung bei kalter Filteroberfläche, z.B. beim Kesselstart, Messgröße: Reingastemperatur

Synchronisation mit Kesselregelung:

- Reinigungsvorgänge: Filterreinigung zeitgleich mit Kesselreinigung absolvieren (Abreinigung im kalten Zustand als „Grundreinigung“)
- Filterreinigung vor Kesselstart oder bevorzugt in Teillast
- Vermeidung doppelter Funktionen / Bauteilen in Filter- und Kesselregelung.

#### **4.4 Bau des Filter-Funktionsmusters**

Die Untersuchungen am Funktionsmuster sollen mit Feuerungsabgasen erfolgen. Hierzu wurde das Funktionsmuster in die zuvor beschriebene Filterprüfeinheit eingebaut (siehe Kapitel 3.2). Der Aufbau des Funktionsmusters ist schematisch in Abbildung 4.8 dargestellt.

Das Abgas strömt seitlich ein und von außen nach innen durch die Filterpatrone und zentral aus. Die Abreinigungsvorrichtung befindet sich mittig an einer Längsseite des Filterelementes. Das Filterelement wird durch einen außenliegenden Motor (in der Abbildung nicht dargestellt) über eine Antriebskette gedreht.

Es ist sowohl ein Rechts- als auch ein Linkslauf möglich. Die Drehgeschwindigkeit ergibt sich aus dem gewählten Verhältnis der Zahnräder die auf den Wellen vom Antriebsmotor und der Filterpatrone montiert sind. Diese wurde so gewählt, dass in 50 s eine Umdrehung erfolgt. Abbildung 4.9 zeigt den Filterprüfstand mit eingebautem Filter-Funktionsmuster.

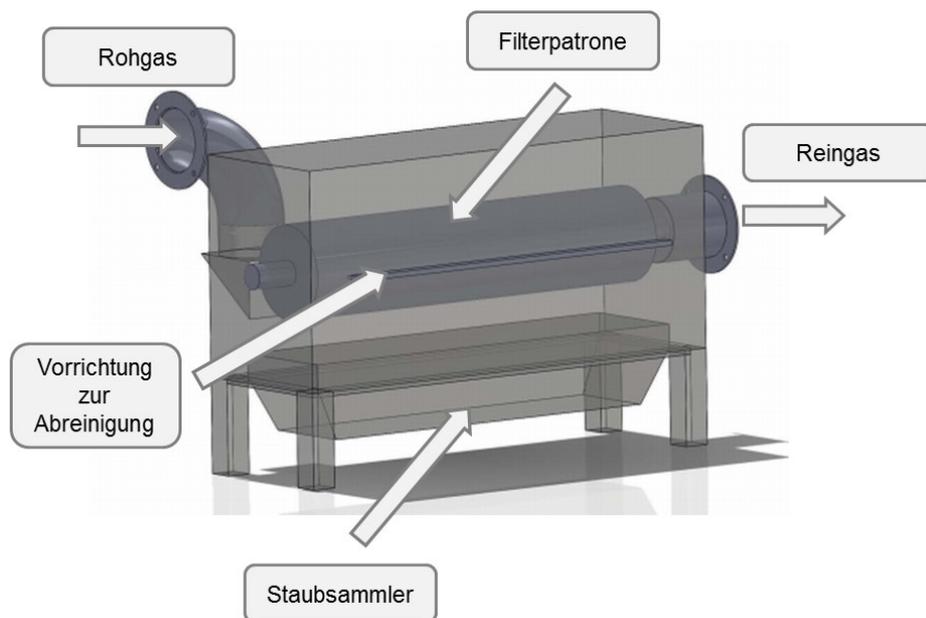


Abbildung 4.8 Schematische Darstellung des Filter-Funktionsmusters

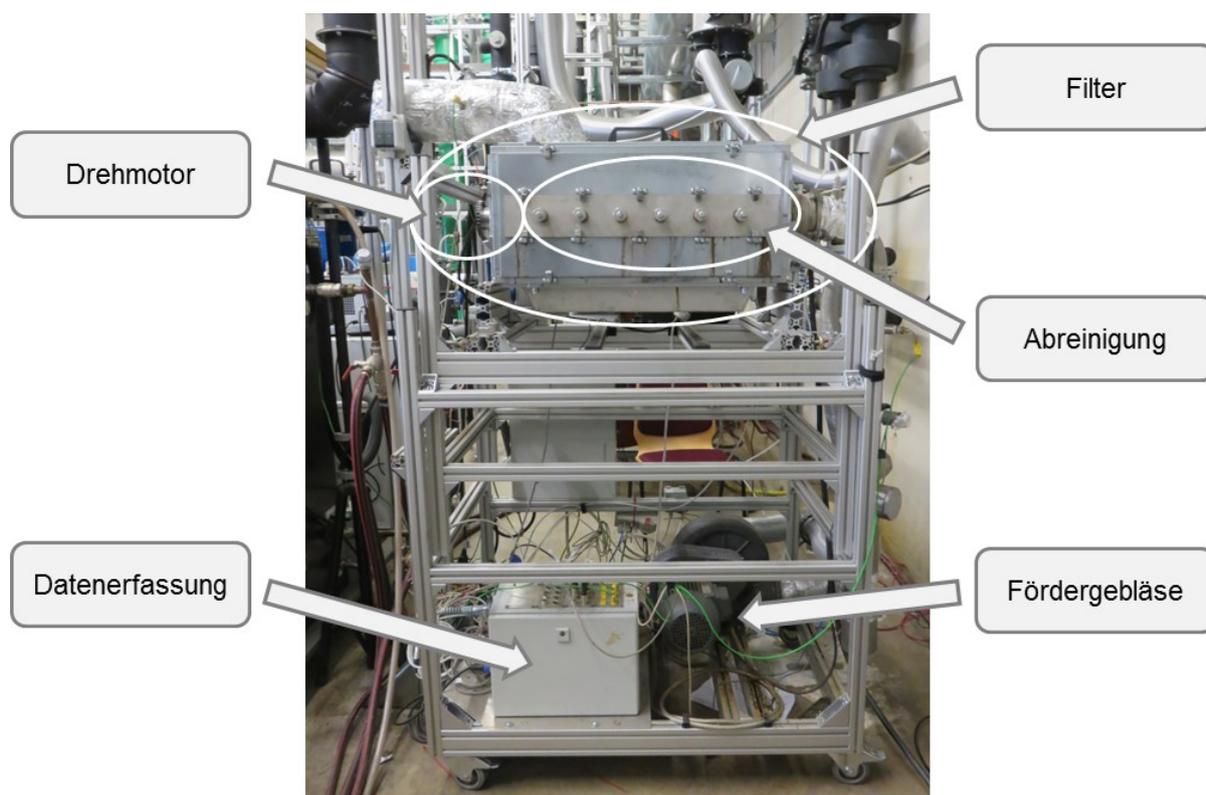


Abbildung 4.9 Filterprüfstand mit eingebautem Filter-Funktionsmuster

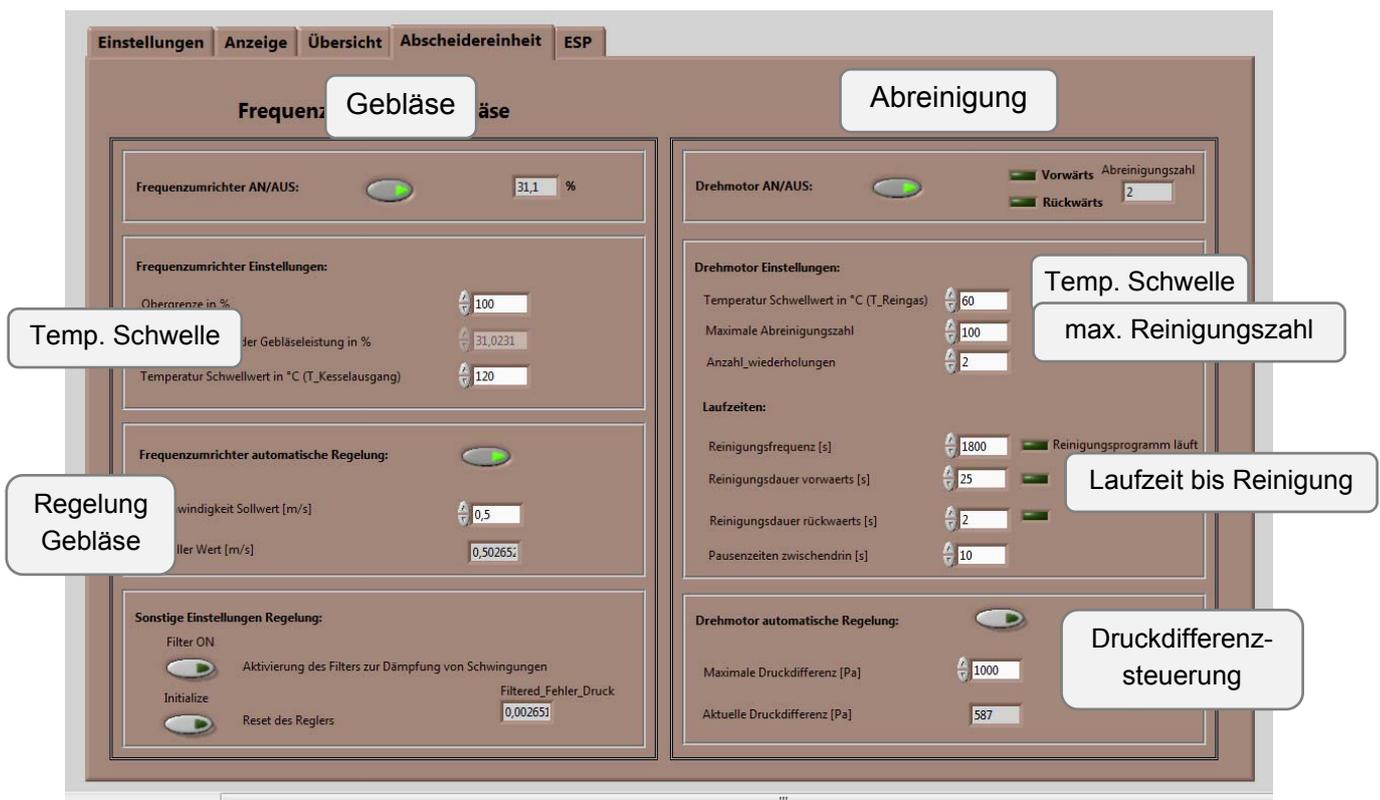
Für einen automatisierten aber sicheren Filterbetrieb sind in der Prüfstandsregelung zwei Temperaturschwellen einstellbar:

- Rohgastemperatur, so dass der Filter nur in Betrieb geht und bleibt, wenn der Heizkessel in Betrieb ist
- Reingastemperatur für die Ansteuerung der Abreinigung, so dass die Abreinigung nicht startet wenn die Filteroberfläche mit Kondensat (Wasser) bedeckt sein könnte.

Die Teilstromentnahme mit dem Fördergebläse des Filterprüfstandes aus dem Abgasstrom des Kessels kann auf zwei einstellbare Arten erfolgen:

- entweder mit konstanter Leistungsstufe für das Fördergebläse oder
- mit konstantem Volumenstrom (Regelung anhand der im Reingas gemessenen Gasgeschwindigkeit).

Für die automatische Ansteuerung der Abreinigung sind verschiedene Parameter einstellbar, u.a. kann die Abreinigung nach der Betriebszeit oder nach dem Druckverlust gestartet werden. Ein Auszug aus der Bildschirmoberfläche der Prüfstandsregelung mit Einstellmöglichkeiten zeigt Abbildung 4.10.



**Abbildung 4.10** Bildschirmoberfläche der Prüfstandsregelung mit Einstellmöglichkeiten für Fördergebläse und Abreinigung des Filters

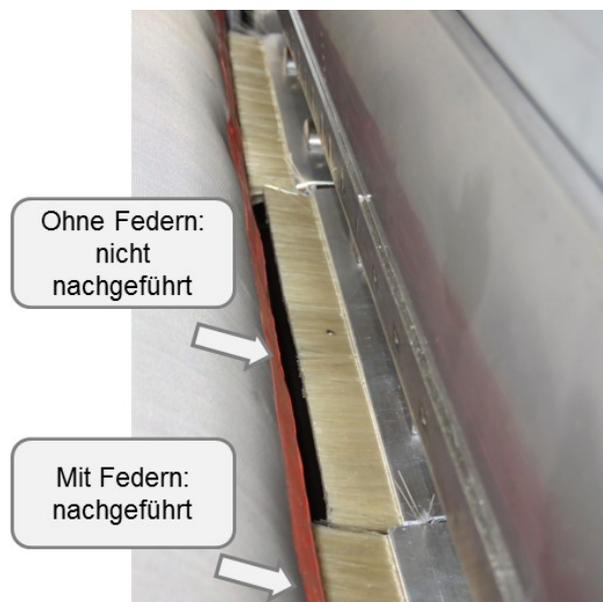
## 5 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst beschrieben. Vor den eigentlichen Untersuchungen mit Feuerungsabgasen wurde ein Funktionstest des Filterprüfstandes durchgeführt.

### 5.1 Funktionstest des Filterprüfstandes

Durch den Funktionstest wurde die grundsätzliche Eignung und richtige Funktionsweise des Filterprüfstandes überprüft und ggf. verbessert. Neben der Inbetriebnahme des Prüfstandes ging es im Wesentlichen darum zu zeigen, dass die Nachführung der Bürsten in der Lage ist, die Unwucht des Filterrohres soweit auszugleichen, dass eine weitgehend gleichmäßige Abreinigung über den Filterumfang möglich ist, siehe Abbildung 5.1.

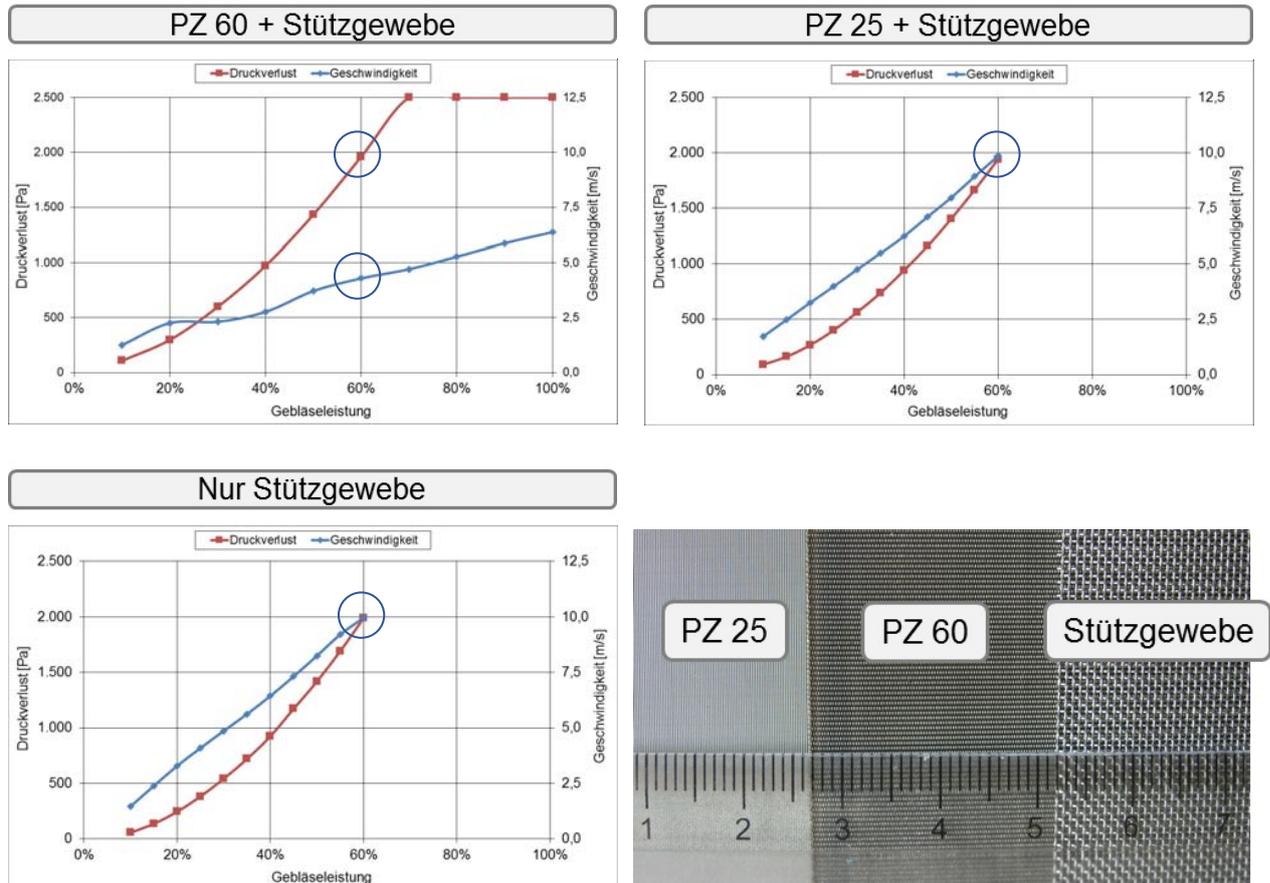
Auch wenn das Filterelement völlig rund gewesen wäre, werden eine Führung und eine geringe aber konstante Anpressung der Bürsten auf die Filteroberfläche notwendig, um eine kontrollierte Abreinigung zu erreichen. Durch die Unwucht mussten die Bürstenhalterungen allerdings über einen längeren Weg nachgeführt werden können. Insgesamt zeigte sich in den Vorversuchen, dass dies mit der gewählten Konstruktion zuverlässig möglich ist, allerdings musste neben der Vorwärtsbewegung des Drehmotors auch die Rückwärtsbewegung mit in die Filtersteuerung integriert werden. Ohne Rücklauf würden sich die Bürsten auf Dauer immer weiter aus der Halterung hinausschieben und komplett nach oben verbiegen.



**Abbildung 5.1** Ausgleich der Unwucht des Filterrohres durch Nachführung mittels Federkraft

## 5.2 Druckverluste der unbelegten Filtergewebe

Die Druckverluste der gereinigten und unbelegten Gewebe (PZ 25, PZ 60 und Stützgewebe) bei Beaufschlagung mit Umgebungsluft (kein Kesselbetrieb) in Abhängigkeit der Gebläseleistung und damit der Gasgeschwindigkeit im Reingas sind in Abbildung 5.2 dargestellt.



**Abbildung 5.2** Druckverluste der gereinigten und unbelegten Gewebe bei Beaufschlagung mit Umgebungsluft in Abhängigkeit der Leistung des Fördergebläses bzw. der Gasgeschwindigkeit im Reingas

Der Druckverlust beträgt bei allen drei Kombinationen etwa 2.000 Pa bei 60 % Gebläseleistung, ein wesentlicher Unterschied ist nicht erkennbar. Die an der Reingasmessstelle (siehe Abbildung 3.2) gemessenen Gasgeschwindigkeiten unterscheiden sich jedoch z.T. deutlich und liegen für das PZ 60 bei 4,3 m/s, für das PZ 25 bei 9,9 m/s und für das Stützgewebe bei 10,0 m/s. Hierdurch wird deutlich, dass eine Filterbeaufschlagung mit einer konstanten Leistungsstufe des Fördergebläses nur bedingt aussagekräftig ist.

## 5.3 Abgasversuche mit Filtergewebe PZ 60

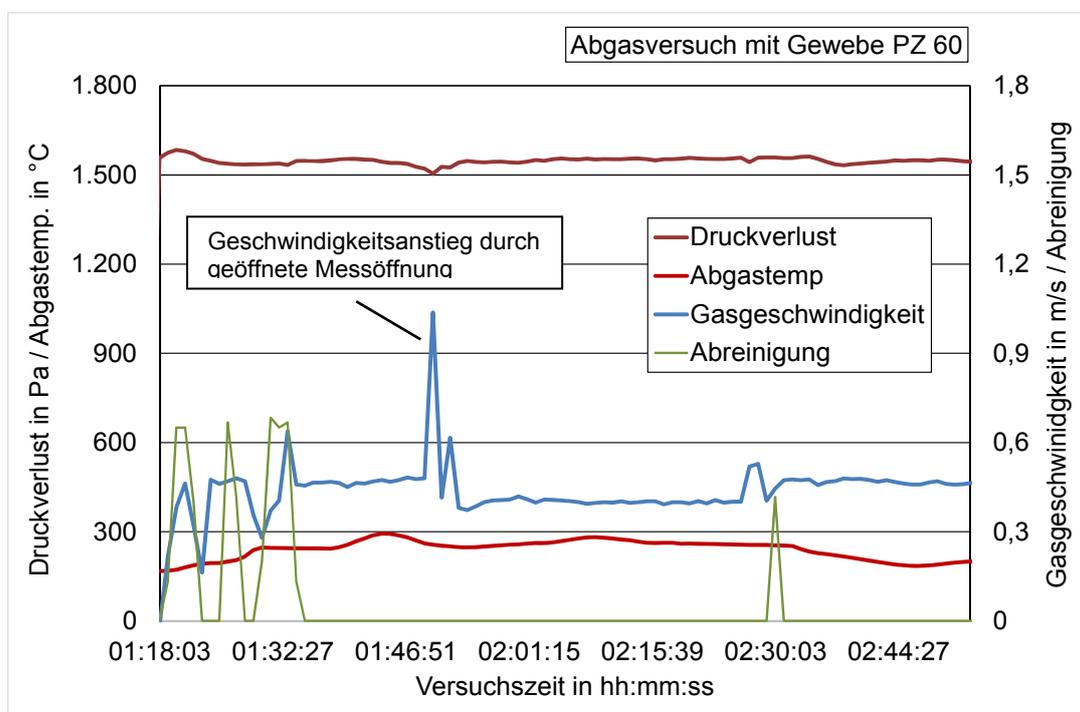
Als erstes Filtergewebe wurde das PZ 60 mit Abgas aus dem Hackgutkessel beaufschlagt. Bei diesen ersten Abgasversuchen wurden Waldhackschnitzel bzw. Waldhackschnitzel mit

einer Beimischung von Heupellets verfeuert. Anhand dieser ersten Versuche sollte die Vorgehensweise zur Erprobung der Filtergewebe und der Abreinigungsvarianten festgelegt werden. Ziel war, eine standardisierte Vorgehensweise festzulegen, um eine Aussage über das Langzeitverhalten des Funktionsmusters treffen zu können und gleichzeitig die Betriebszeit möglichst kurz zu halten, da ja unterschiedliche Varianten untersucht werden sollten.

Bei diesen Versuchen zeigte sich allerdings relativ schnell, dass eine Abreinigung des Filtergewebes mit Bürsten über einen längeren Zeitraum mit diesem Gewebe nicht möglich ist. Aufgrund der höheren Staubgehalte im Abgas, die durch die Beimischung von Heupellets zu den Waldhackschnitzeln erreicht wurden, stieg der Druckverlust meist innerhalb von 30 Minuten bei Einsatz eines vollständig gereinigten Filtergewebes deutlich an, d.h. es hatte sich ein zur Staubabscheidung ausreichender Filterkuchen gebildet.

Wurde nun bei einem derartig belegten Filtergewebe die Abreinigung gestartet, ergab sich kein eindeutiger Zusammenhang zu einer Abreinigungswirkung, welche sich durch eine Abnahme des Druckverlustes (im Falle eines konstant abgesaugten Abgasteilstroms durch den Filter) bzw. eines Anstiegs der im Reingas gemessenen Gasgeschwindigkeit (und damit des Abgasvolumenstromes durch den Filter) im Fall einer Filterbeaufschlagung mit konstanter Gebläseleistung ergeben müsste.

Typische Verläufe des Druckverlustes am Gewebefilter und der gemessenen Gasgeschwindigkeit im Reingas im Zusammenhang mit der Filterabreinigung (eine Filterabreinigung findet statt, wenn der angezeigte Wert für Abreinigung > 0 ist) zeigt Abbildung 5.3.



**Abbildung 5.3** Typische Verläufe des Druckverlustes, der Gasgeschwindigkeit im Reingas und der Abgastemperatur des Heizkessels. Abreinigung des Filters wenn Wert Abreinigung > 0 (Filterpatrone mit Gewebe PZ 60, Hackgutkessel betrieben mit Mischung aus Waldhackschnitzel und Heupellets, Filterbetrieb mit konstanter Gebläseleistung von 50%)

Mit dargestellt ist auch der Verlauf der Abgastemperatur des Heizkessels, die durch den Einsatz einer speziellen Umlenkplatte gegenüber einem marktüblichen Kessel stark erhöht wird.

Hierbei wurde der Gewebefilter mit konstanter Gebläseleistung (50 %) betrieben, d.h. bei einer effektiven Filterabreinigung ist zu erwarten, dass die Gasgeschwindigkeit im Reingas zunimmt. Bei den insgesamt 4 dargestellten Abreinigungsintervallen (Wert für Abreinigung jeweils > 0) ist dieses Verhalten nur einmal eindeutig beim dritten Intervall zu sehen. Aber bereits nach sehr kurzer Betriebszeit sinkt die Gasgeschwindigkeit wieder ab, d.h. der ursprüngliche Belegungszustand wird sehr schnell wieder erreicht.

Nach einigen Stunden Betriebszeit (Größenordnung 12 - 24 h, je nach auftretenden Staubkonzentrationen im Rohgas) war das Filtergewebe so weit zugesetzt, dass bei Druckverlusten im Bereich von 1.500 Pa kaum noch ein Volumenstrom durch das Filter gesaugt werden konnte. Weder eine Bürstenreinigung, noch ein manuelles Absaugen der Filteroberfläche oder eine manuelle Nassreinigung der eingebauten Filterpatrone konnten die notwendige Durchlässigkeit wieder herstellen. Erst der Ausbau der Filterpatrone und eine Nassreinigung von innen und außen ergab wieder die ursprüngliche Durchlässigkeit des Filtergewebes.

Da in den ersten Versuchen auch eine Bürstenabreinigung bei feuchter Filteroberfläche nicht ausgeschlossen war, wurde zuerst vermutet, dass der dann vorliegende klebrige und pastöse Staub in das Gewebe eingedrückt wird und zu einer irreversiblen Verstopfung des Filters (bezüglich der Bürstenabreinigung) führt. Allerdings stellte sich im weiteren Versuchsverlauf heraus, dass eine Abreinigung des feuchten Filters diesen Vorgang zwar beschleunigt aber auch bei einer Bürstenabreinigung mit stets trockenen Filterbelägen es schnell zu einer Verstopfung des Filtergewebes kommt.

Weitere Untersuchungen mit dem Filtergewebe PZ 60 waren damit nicht mehr sinnvoll und stattdessen wurde die Filterpatrone mit dem feineren Edstahlgewebe PZ 25 belegt. Für das Stützgewebe wurde die gleiche Qualität wie beim PZ 60 verwendet.

## **5.4 Abgasversuche mit Filtergewebe PZ 25**

Die Untersuchungen mit dem Filtergewebe PZ 25 sollten mit einem standardisierten Prüfablauf durchgeführt werden, bei dem bestimmte Parametervariationen durchgeführt werden, um möglichst schnell eine Aussage über das Langzeitverhalten des Funktionsmusters mit dem eingesetzten Filtergewebe im Zusammenspiel mit der Abreinigungsvariante zu erhalten.

### **5.4.1 Standardisierter Prüfablauf und Versuchsprogramm**

Der Prüfablauf wurde auf Basis der Untersuchungen mit dem ersten eingesetzten Filtergewebe festgelegt und orientiert sich am Prüfablauf der Richtlinie VDI 3926 Blatt 1 (2004, Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter) in Verbindung mit VDI 3677 Blatt 3 (2012, Filternde Abscheider. Heißgasfiltration). Zur Abbildung des Langzeitverhaltens erfolgt die Durchführung eines Versuches in mehreren Phasen und mit einer künstlich herbeigeführten Alterung des Filtergewebes nach dem in Abbildung 5.4 gezeigten Schema.



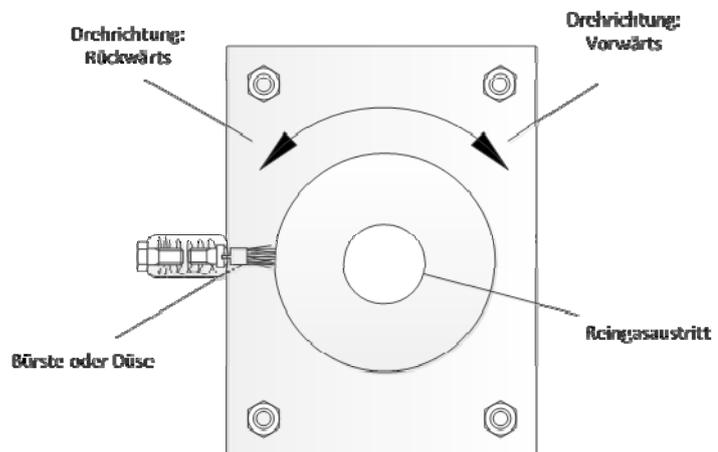
Versuchsphase		Zyklenzahl	Abreinigung	Filterwirkung
1	Konditionierung	10	differenzdruckgesteuert	
	<i>konstant*</i>	1	<i>differenzdruckgesteuert</i>	<i>Staubmessung</i>
2	Alterung	100	zeitgesteuert	
	<i>konstant*</i>	1	<i>differenzdruckgesteuert</i>	<i>Staubmessung</i>
3	Stabilisierung	10	differenzdruckgesteuert	

\* *Einstellung konstanter Bedingungen für die Messdauer*

**Abbildung 5.4 Standardisierter Prüfablauf zur Abbildung des Langzeitverhaltens des Gewebefilters**

In Abbildung 5.5 sind die Einstellungen der Parameter für die Abreinigung sowie die Drehrichtung der Filterpatrone gezeigt. Abbildung 5.6 verdeutlicht den standardisierten Prüfablauf nochmals im Detail für die einzelnen Phasen 1 bis 3.

Parameter	Einheit	Einstellung
Sollgeschwindigkeit für die Regelung	[m/s]	0,5
Druckverlust für Beginn Abreinigung ( 1. Phase)	[Pa]	1.000
Druckverlust für Beginn Abreinigung ( 3. Phase)	[Pa]	1.800
Reinigungsfrequenz / Zykluszeit (2. Phase)	[s]	1.800
Wiederholungen	[-]	2
Laufzeit "Vorwärts"	[s]	25
Laufzeit "Rückwärts"	[s]	2
Pausenzeit	[s]	10



**Abbildung 5.5 Standardisierter Prüfablauf - Einstellung der Parameter zur Abreinigung des Gewebefilters**



Vor jedem Versuch bzw. vor jedem Prüfablauf erfolgte eine vollständige Reinigung der Filterpatrone (Ausbau, Reinigung von innen und außen mit Wasser, Trocknung, Einbau), so dass jeweils vergleichbare Bedingungen bei Versuchsbeginn vorlagen.

**Tabelle 5.1 Versuchsplan der durchgeführten Prüfabläufe mit Filtergewebe PZ 25**

Versuch	Abreinigung	Brennstoff	Variation
1	Bürste Kunststoff (Variante 1 *)	Hackschnitzel mit Heupellets	Variation Brennstoff
2	Bürste Kunststoff (Variante 1 *)	Holzpellets mit Heupellets	Referenzversuch
3	Bürste Draht (Variante 2 *)	Holzpellets mit Heupellets	Variation Bürste
4	Bürste Kunststoff (Variante 1 *)	Holzpellets mit Heupellets	Variation längere Alterungsphase
5	Absaugung 1	Holzpellets mit Heupellets	<i>nur manuell möglich</i>
6	Bürste Kunststoff (Variante 1 *)	Holzpellets	Variation Brennstoff
7	Absaugung 2	Holzpellets mit Heupellets	<i>nur manuell möglich</i>

\* Varianten der eingesetzten Bürsten siehe Tabelle 4.4 für Spezifikation

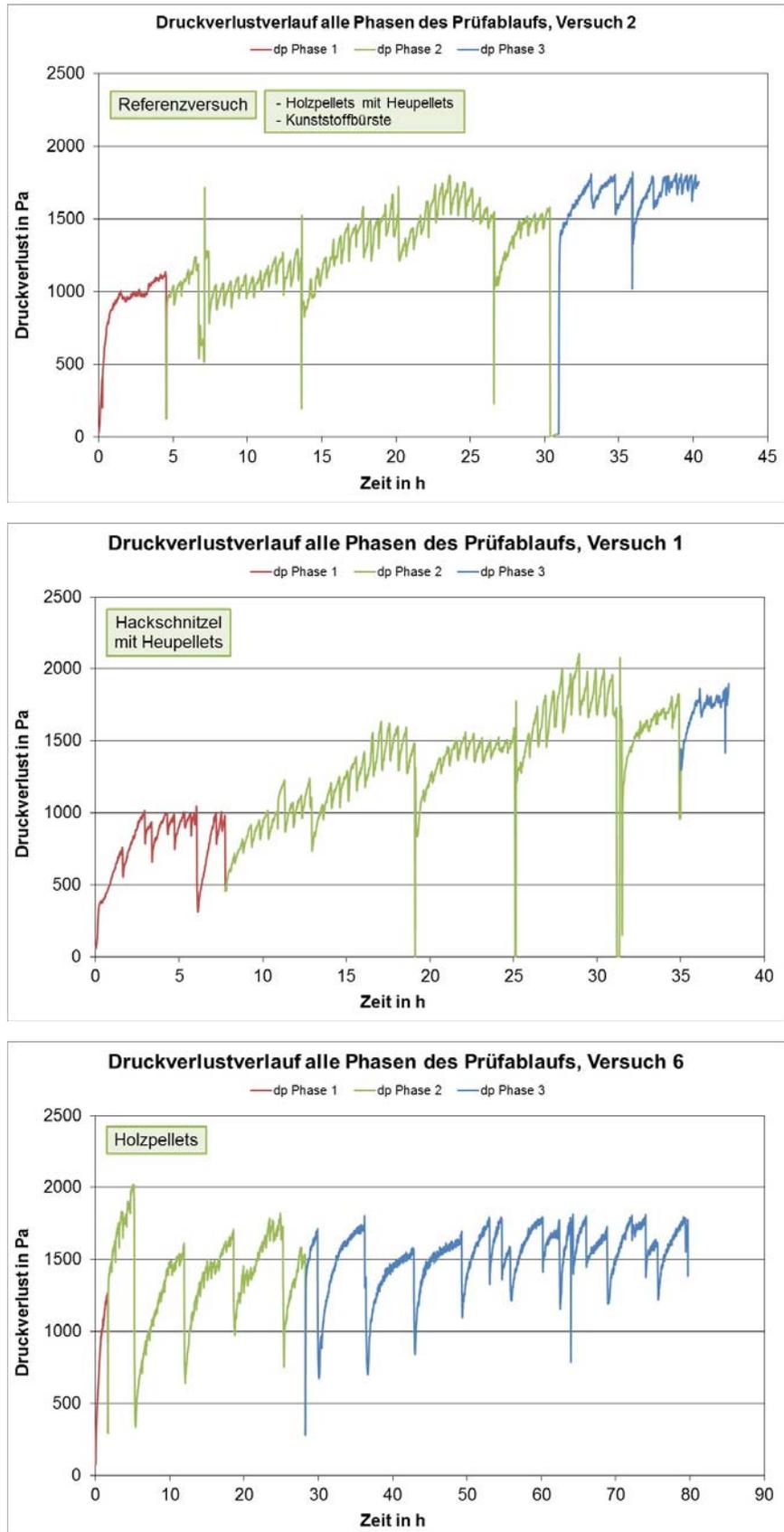
Die Bürstenvariante 3 (Drahtstärke der Bürste 0,25 - 0,30 mm) wurde aufgrund der Ergebnisse von Versuch 3 (Einsatz der Bürste mit Drahtstärke 0,10 mm) nicht mehr eingesetzt, da zu starke Beschädigungen des Filtergewebes befürchtet wurden. Die Drähte der Variante 3 sind wesentlich starrer als bei der Variante 2, wodurch sich der Besatz als nicht flexibel und scharfkantig mit herausstehenden Einzeldrähten darstellt.

Der Versuch 2 wird bei der Vorstellung der Untersuchungsergebnisse ggf. als Referenzversuch betrachtet, um etwaige Unterschiede zu verdeutlichen. Für die Bewertung des Filtermoduls und der Abreinigung werden folgende Kriterien herangezogen:

- Restdruckverluste (vor und nach der Alterung)
- Zyklusdauer (vor und nach der Alterung)
- Vergleich vom Druckverlustverlauf ausgewählter Reinigungszyklen
- Ergebnisse der Staubmessung.

## 5.5 Ergebnisse - Variation vom Brennstoff

Der Einfluss des eingesetzten Brennstoffes auf das Abreinigungsverhalten des Funktionsmusters soll anhand der Druckverlustverläufe der Versuche 1, 2 und 6 bewertet werden, die sich bei den jeweiligen Prüfabläufen ergaben. Hierbei erfolgte die Abreinigung jeweils mit der Bürste aus Kunststoff (Variante 1). Bei diesen Versuchen wurden Hackschnitzel mit Beimischung von Heupellets, Holzpellets mit Beimischung von Heupellets und reine Holzpellets eingesetzt. Die Beimischungsanteile waren jeweils variabel (einige Massenprozent bezogen auf den Hauptbrennstoff) und die Verteilung der Beimischung im Hauptbrennstoff war ebenfalls unterschiedlich. Vor allem bei den Hackschnitzeln ergab sich auch wieder eine gewisse Entmischung, vor allem wenn höhere Anteile mit gröberem Hackschnitzeln vorlagen, die auch zu einer Brückenbildung im Vorratsbehälter neigten.



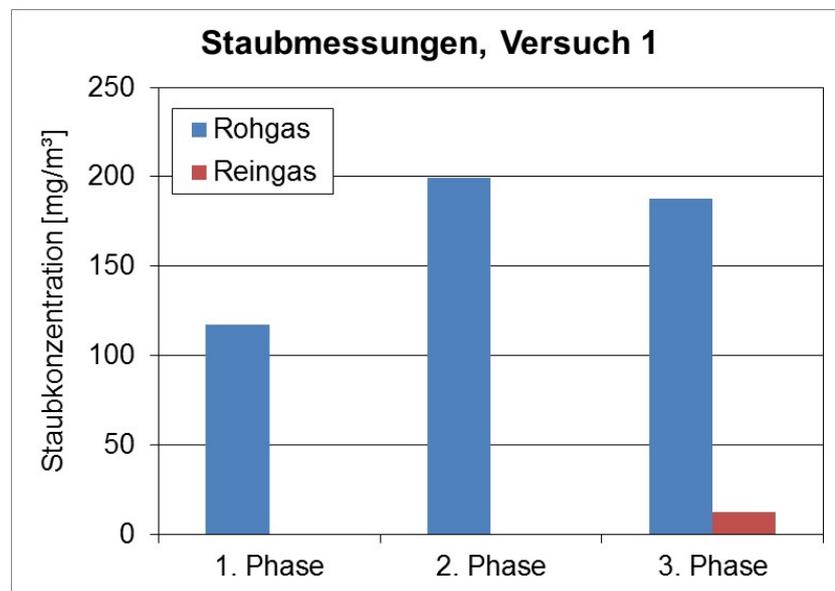
**Abbildung 5.7 Brennstoffvariation - Vergleich der Druckverlustverläufe der Versuche 2 (oben: Referenzversuch Holzpellets mit Heupellets), 1 (mittig: Hackschnitzel mit Heupellets) und 6 (unten: Holzpellets)**

Dieser Brennstoffvergleich zeigt, dass der Hauptunterschied in den Druckverlustverläufen vor allem durch die Beimischung der Heupellets verursacht wird und weniger durch die unterschiedlichen Hauptbrennstoffe. So ist zwischen Hackschnitzeln bzw. Holzpellets jeweils mit Beimischung von Heupellets kein wesentlicher Unterschied erkennbar, weder in den Verläufen des Druckverlustes noch im Niveau der Stabilisierungsphase 3.

Sind Heupellets beigemischt, tritt eine deutlich verstärkte Korrosion (Chlor-Korrosion durch hohen Chloranteil im Heu) der mit Abgas beaufschlagten Bauteile auf, was zu einer hohen Beanspruchung dieser Bauteile führt. Außerdem ist die Partikelkonzentration (Staubkonzentration) im Abgas höher und der Betrieb des Kessels wird deutlich wartungsintensiver und anfälliger für Störungen aufgrund der hohen Verschlackungsneigung der Heupellets.

Bei der Verbrennung von reinen Holzpellets zeigt sich die Abreinigung deutlich stabiler, was vor allem in der sehr langen Phase 3 beim Versuch 6 deutlich wird.

Für den Versuch 1 sind beispielhaft in Abbildung 5.8 die gemessenen Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas für die 3 Phasen des Prüfablaufs dargestellt, wobei nur für das Rohgas alle Werte vorliegen. Die Staubkonzentrationen sind nicht auf einen Bezugssauerstoffgehalt bezogen, da nicht für alle Messungen O<sub>2</sub>-Konzentrationen vorliegen. Es erfolgte eine zeitgleiche Messung im Roh- und Reingas über einen Zeitraum von 30 Minuten mit dem Staubmessgerät Wöhler 500.



**Abbildung 5.8 Gemessene Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas in den drei Phasen des Prüfablaufs bei der Verbrennung von Hackschnitzeln mit Beimischung von Heupellets (Mittelwerte über 30 Minuten)**

Bei konstanter Betriebsweise des Heizkessels mit der Brennstoffmischung aus Versuch 1 liegen die mittleren O<sub>2</sub>-Konzentrationen im Rohgas im Bereich von 9,5 Vol%. Durch Undichtigkeiten in den Zu- und Ableitungen sowie am Funktionsmuster erhöht sich der Sauerstoffgehalt im Reingas hierbei auf ca. 13,7 Vol%.

Im Rohgas liegen bei der Verbrennung von Hackschnitzeln mit Beimischung von Heupellets die Staubkonzentrationen im Bereich von knapp 120 bis rund 200 mg/m<sup>3</sup>, im Reingas wurde für die Phase 3 des Prüfablaufs eine Konzentration von ca. 12 mg/m<sup>3</sup> gemessen.

Abbildung 5.9 zeigt den äußeren Zustand des staubbelegten Filters nach Versuch 1. Die Farbe der an der Oberfläche abgeschiedenen Staubpartikel hängt von der Mischung der Brennstoffe und auch von den Verbrennungsbedingungen ab. Für die Mischung von Hackschnitzeln und Heupellets weist sie hier eine weiß-grau Farbe auf. Deutlich erkennbar ist, dass im mittleren Teil die Filteroberfläche aufgrund einer guten Abreinigung sichtbar ist, wogegen auf der linken und rechten Seite noch eine vergleichsweise dicke Staubschicht auf dem Filtergewebe haftet.



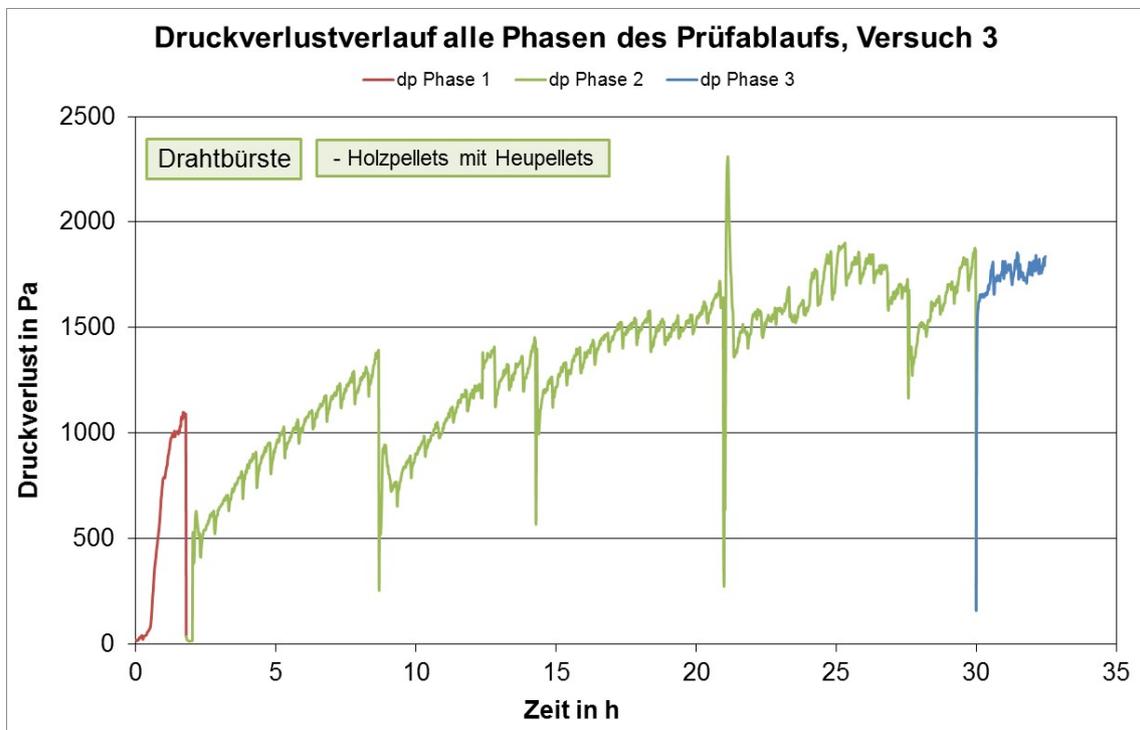
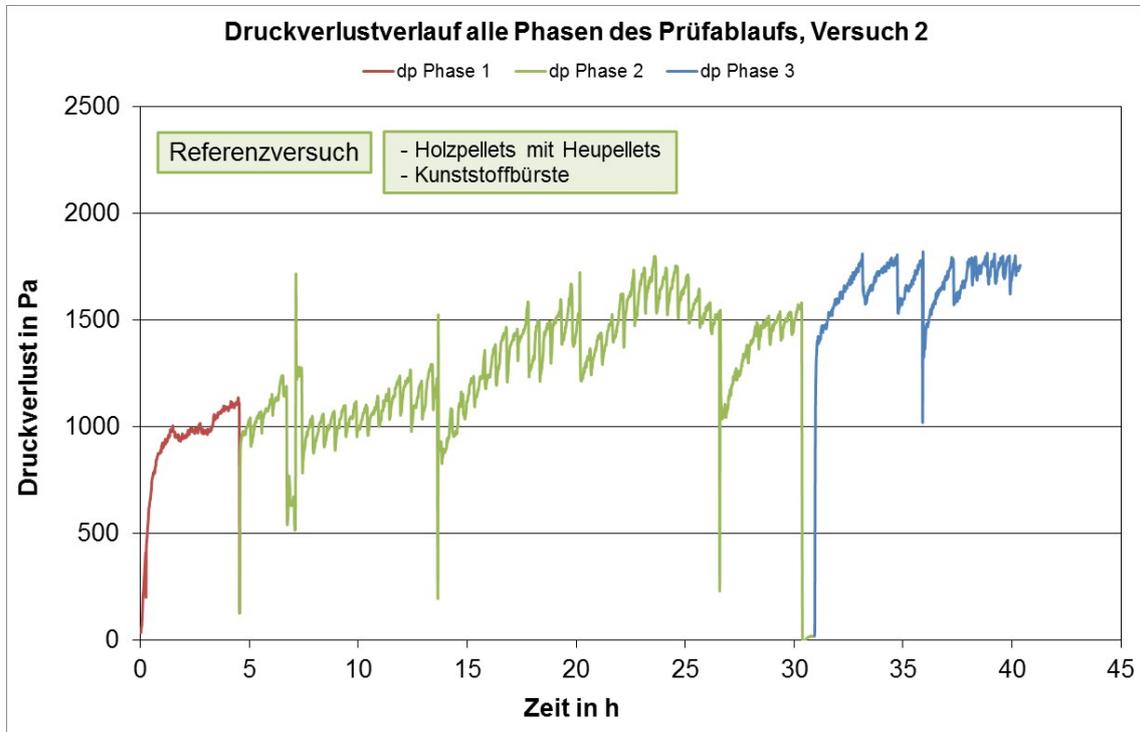
**Abbildung 5.9** Filterzustand nach Versuch 1, Seitenansicht

## 5.6 Ergebnisse - Variation des Bürstenmaterials

Der Einfluss des eingesetzten Bürstenmaterials auf das Abreinigungsverhalten des Funktionsmusters soll anhand der Druckverlustverläufe der Versuche 2 (Referenzversuch) und 3 bewertet werden, die sich bei den jeweiligen Prüfabläufen ergaben. Hierbei erfolgte die Abreinigung mit der Bürste aus Kunststoff (Variante 1) im Versuch 2 und mit der Bürste aus feinerem Edelstahldraht (Variante 2). Bei diesen Versuchen wurden Holzpellets mit Beimischung von Heupellets eingesetzt. Die Druckverlustverläufe der beiden Versuche sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

Insgesamt waren beide Materialvarianten grundsätzlich wirksam, bei den Kunststoffbürsten scheint der Druckverlust bzw. Restdruckverlust auf einem stabileren Niveau zu verbleiben, vor allem gegen Ende der Versuchszeit. Dies könnte daran liegen, dass die Kunststoffbürsten besser am Gewebe anliegen (Borsten sind vorne eng zusammen), bei den Drahtbürsten weitet sich der Besatz vorne etwas auf, wodurch der Kontakt zum Gewebe nicht überall

gleich gut ist. Somit spielt für einen guten und gleichmäßigen Kontakt von Bürste und Filteroberfläche die genaue Form der Borsten ebenso eine Rolle wie das Material selbst.



**Abbildung 5.10** Variation Bürstenmaterial - Vergleich der Druckverlustverläufe von Versuch 2 mit Bürste aus Kunststoff (oben:) und Versuch 3 mit Bürste aus Draht (unten) (Brennstoff. Holzpellets mit Heupellets)

Eine Entscheidung im Sinne des Ausschlusses eines Materials alleine aufgrund des Druckverlustverlaufs ist nicht eindeutig zu treffen, da sich die Verläufe hierfür zu wenig unterscheiden. Allerdings werden die verwendeten Drahtbürsten in der vorliegenden Ausführung eher nicht empfohlen, da schon während der Versuchszeit leichte Beschädigungen des Obergewebes (Rillenbildung war zu erkennen) sichtbar wurde. Dies könnte aber auch an der Verarbeitung der Borsten liegen, d.h. bei besser verarbeiteten Borsten aus dünnem Edelstahl draht könnte die Bewertung positiver ausfallen, was bei zukünftigen Versuchen berücksichtigt werden sollte.

Die Kunststoffbürsten wurden fast die ganze Zeit über eingesetzt und wiesen nach dieser Dauer eine leichte aber erkennbare Alterung auf, die Borsten waren nicht mehr so flexibel und haben sich über die Zeit etwas zugesetzt. Auch hier könnten zukünftig noch mehrere Kunststoffmaterialien getestet werden.

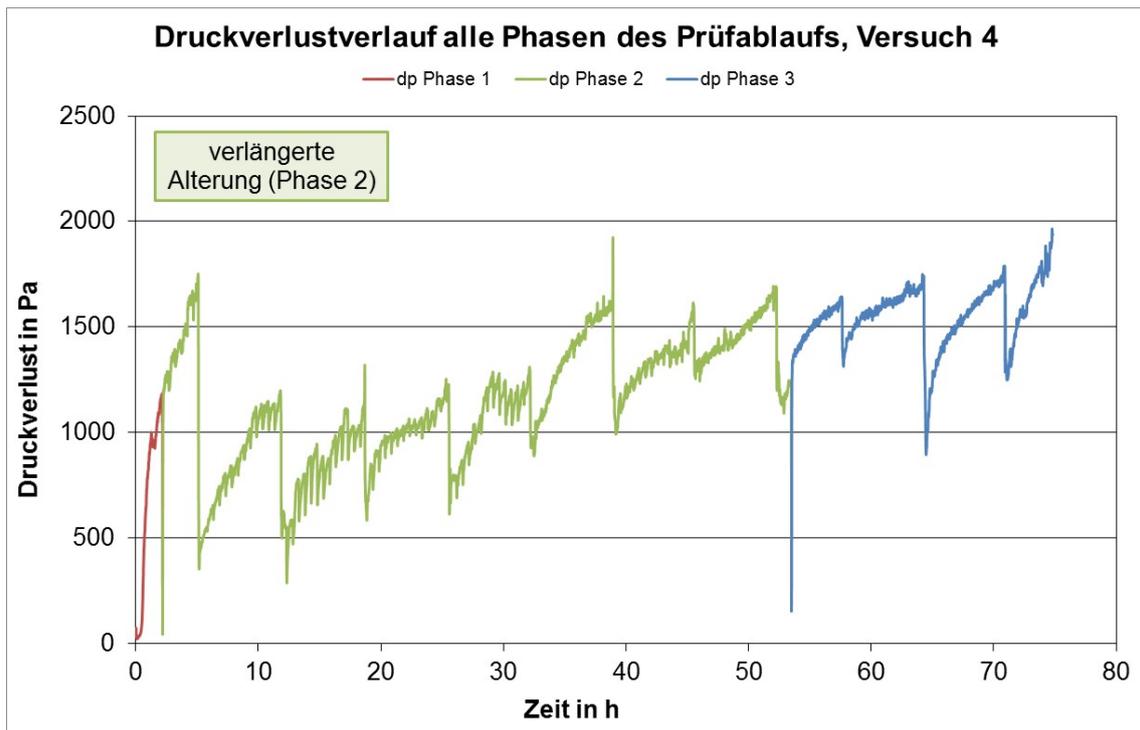
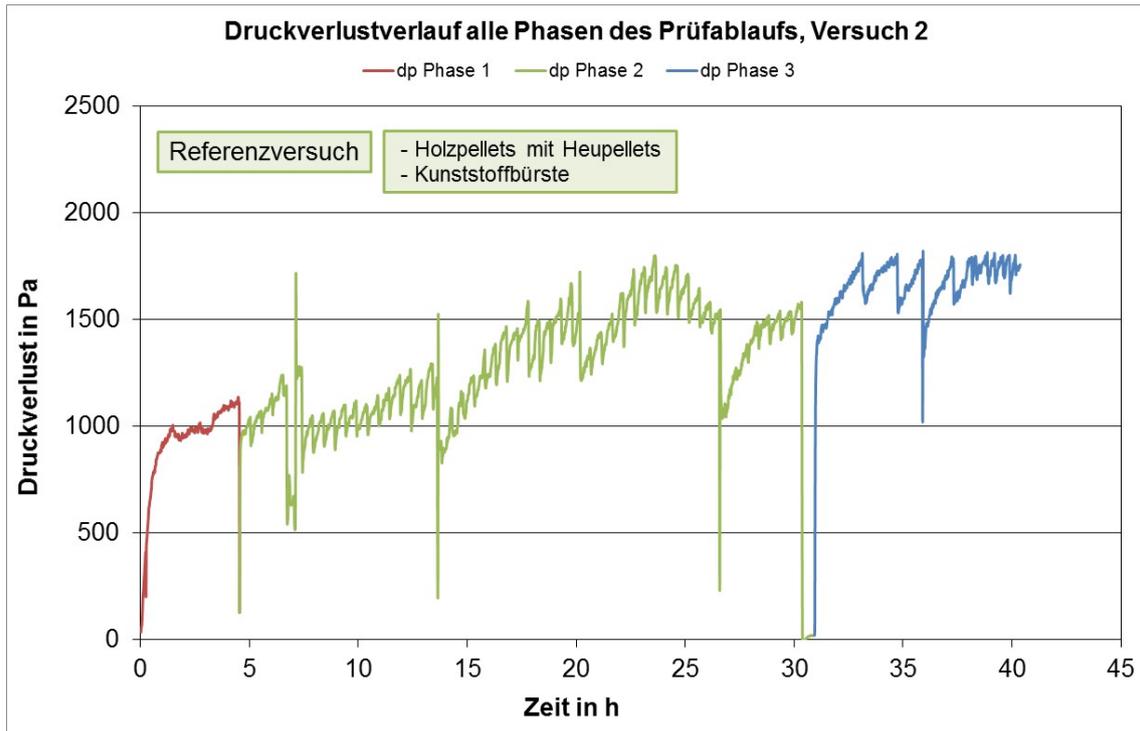
## **5.7 Ergebnisse - Variation der Phase 2 (Alterungsphase)**

Durch die Verlängerung der Phase 2 (Alterungsphase) im Prüfablauf sollte untersucht werden, ob die Dauer des Prüfablaufs ausreichend ist oder diese und ggf. andere Phasen deutlich verlängert werden sollten. Der standardisierte Prüfablauf ist, mit einer Versuchszeit im Bereich von 40 bis 90 Stunden (je nach Brennstoff), vergleichsweise kurz. Deshalb sollte geprüft werden, ob die mit dem Prüfablauf erhaltenen Ergebnisse zum Langzeitverhalten als stabil zu werten sind oder ob doch größere Einflüsse der Phasendauer berücksichtigt werden sollten.

Die nach dem Prüfablauf durchgeführten Versuche dienen vor allem einer schnellen Vorauswahl geeigneter Gewebematerialien und Abreinigungstechniken, können aber im weiteren Entwicklungsverlauf praxisnahe Dauertests (Größenordnung: > 500 h) und Tests an installierten Feuerungsanlagen mit Prototypen des Filters nicht ersetzen. Dauertests über hunderte von Betriebsstunden bzw. eine Heizperiode sind allerdings um ein vielfaches aufwändiger und für die Vorauswahl einer geeigneten Technologie deshalb nicht geeignet.

Der Einfluss einer verlängerten Alterungsphase auf das Abreinigungsverhalten des Funktionsmusters soll anhand der Druckverlustverläufe der Versuche 2 (Referenzversuch) und 4 bewertet werden, die sich bei den jeweiligen Prüfabläufen ergaben. Hierbei erfolgte die Abreinigung jeweils mit der Bürste aus Kunststoff (Variante 1), verfeuert wurden Holzpellets mit einer Beimischung von Heupellets. Die Druckverlustverläufe der beiden Versuche sind in Abbildung 5.11 dargestellt.

Aus den Verläufen der Druckverluste kann bei einer Verdoppelung der Alterungszeit kein wesentlicher bzw. erkennbarer Unterschied abgeleitet werden, weder für die Phase 2 (Alterungsphase) noch für die Betriebsphase 3 (Stabilisierungsphase). Somit sind die Ergebnisse der Variantenvergleiche die mit 100 Abreinigungen erhalten wurden aussagekräftig, eine Erweiterung der Alterung auf 200 Abreinigungen ist nicht notwendig und ergibt keine zusätzlichen Informationen.



**Abbildung 5.11 Variation der Phase 2 (Alterungsphase) - Vergleich der Druckverlustverläufe von Versuch 2 (oben:) und Versuch 4 mit verdoppelter Alterungsphase (unten) (Bürstenmaterial: Kunststoff; Brennstoff: Holzpellets mit Heupellets)**

## 5.8 Ergebnisse - Abreinigung mittels Absaugung

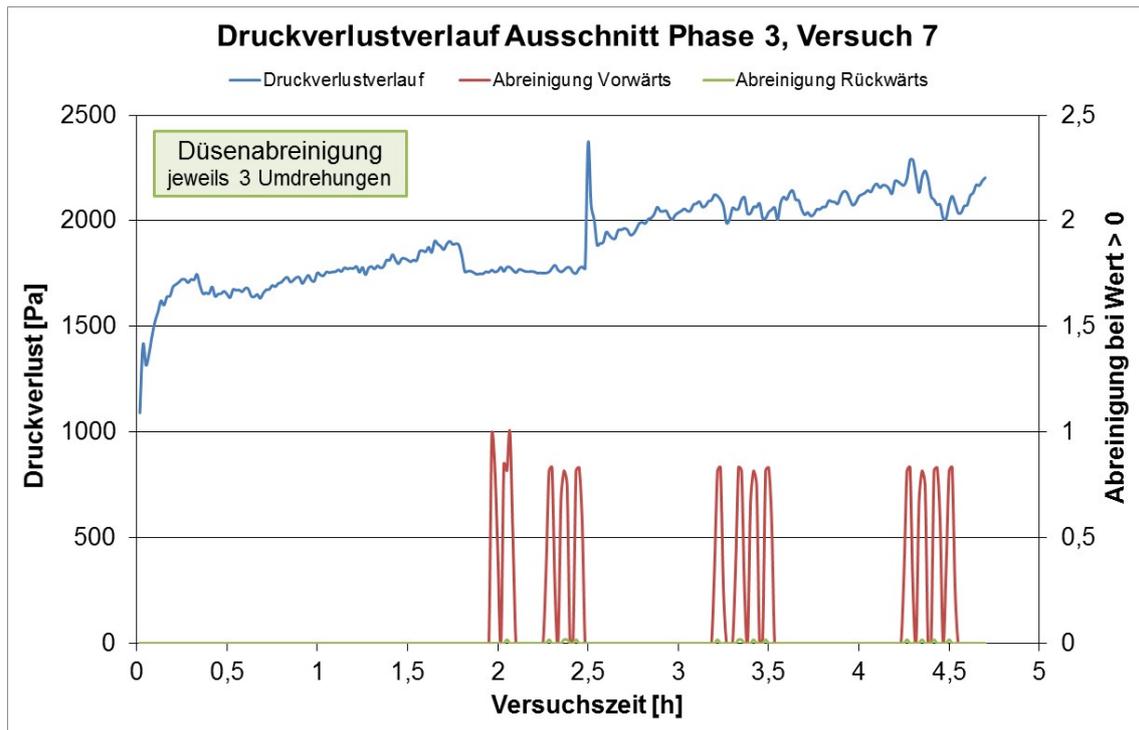
Neben einer Abreinigung des Filtergewebes mit Bürsten wurde auch untersucht, ob diese mittels einer Absaugung des abgelagerten Staubes erreicht werden kann. Die Absaugung mit Düsen konnte nur manuell durchgeführt werden. Dies lag zum einen daran, dass diese nur während des Saugvorganges dicht am Filtergewebe angebracht waren, ansonsten aber etwas entfernt in einer Ruheposition fixiert wurden. Zum anderen musste jeweils der verwendete Staubsauger manuell an den Düsenauslass angeschlossen werden. Deshalb konnte mit der Saugmethode nur ein stark verkürzter Prüfablauf durchgeführt werden.

Ein erster Test mit Absaugdüsen (Absaugung 1) führte zu einem schnellen Abbruch des Versuchs aufgrund einer starken Beschädigung des Obergewebes, da die Federn einen zu hohen Anpressdruck hatten, siehe Abbildung 5.12.



**Abbildung 5.12 Filterzustand nach Testlauf mit Absaugdüsen - Filtergewebe ist aufgefaltet und eingerissen aufgrund zu starker Anpressung der Düsen, Ansicht von oben**

Durch eine Reduzierung des Anpressdruckes der Düsen konnte dann ein Versuchsbetrieb realisiert werden. Ein Ausschnitt der Phase 3 des Druckverlustverlaufs aus dem reduzierten Prüfablauf von Versuch 7 mit Absaugung in der Variante 2 (reduzierter Anpressdruck) zeigt Abbildung 5.13. Der Druckverlust verändert sich auch nach mehrmaliger Durchführung der Absaugreinigung nicht oder nur ganz wenig, dieses Verhalten war in mehreren Versuchsdurchläufen reproduzierbar. Dies bedeutet, dass die Düsenabreinigung im laufenden Betrieb des Filters, d.h. während der Beaufschlagung mit Abgas, bei der gegenwärtigen Ausführung zu wenig effektiv ist.



**Abbildung 5.13 Abreinigung mittels Absaugung - beispielhafter Druckverlustverlauf in Phase 3 des reduzierten Prüfablaufs von Versuch 7 mit Düsen (Absaugung 2) (Brennstoff. Holzpellets mit Heupellets)**

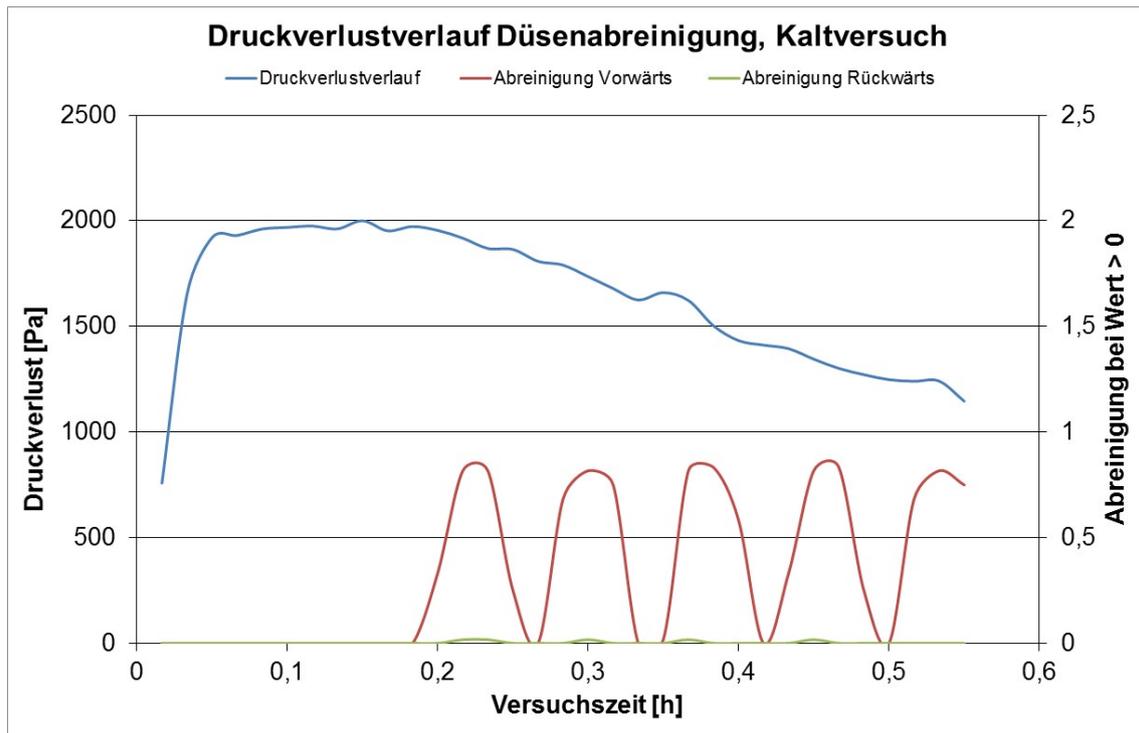
Um eine Reinigungswirkung zu erreichen sind die exakte Positionierung der Düsen an der Gewebeoberfläche und die Anzahl der Umdrehungen während der Abreinigung entscheidend, siehe Abbildung 5.14. So ist deutlich auf den Bildern zu erkennen, dass im mittleren geraderen Segment die Düse besser anliegt und sich eine gute Reinigungswirkung ergibt. An den äußersten Segmenten besteht ein wesentlich schlechterer Kontakt zwischen Absaugdüse und Filtergewebe und dementsprechend auch eine schlechtere Reinigungswirkung. Auch die Anzahl der Umdrehungen bei der Reinigung ist wichtig. Für eine gute Abreinigung sind mindestens drei Umdrehungen notwendig.

Die in Abbildung 5.14 gezeigte Abreinigungswirkung mit der Düsenabsaugung wurde in kaltem Zustand des Filters und damit ohne Beaufschlagung mit Abgas erreicht. Wie in Abbildung 5.13 gezeigt, ergibt sich bei einer Düsenabreinigung mit Abgasbeaufschlagung keine anhand des Druckverlustverlaufs messbare Reinigungswirkung. Dass die Kaltabreinigung mit den Absaugdüsen nicht nur optisch wirkt zeigt Abbildung 5.15. Hierbei wurde ein mit Staub belegter Filter mit einem konstanten Gasvolumenstrom (Umgebungsluft) beaufschlagt. Nach mehreren Reinigungsdurchgängen ging der Druckverlust von etwas unter 2.000 Pa auf rund 1.200 Pa zurück.

Die Ursache für das unterschiedliche Abreinigungsverhalten mit Absaugdüsen bei Abgasbeaufschlagung und im kalten Zustand mit Umgebungsluft kann derzeit nicht genau benannt werden. Allerdings könnte dieses Verhalten genutzt werden, um z.B. mit den Düsen eine Art Grundreinigung bei abgeschaltetem Kessel durchzuführen, wenn das Filtergewebe ansonsten mit Bürsten gereinigt wird.



**Abbildung 5.14** Abreinigung mittels Absaugung - Darstellung der Reinigungswirkung bei einer bis drei Umdrehungen der Filterpatrone im kalten Zustand



**Abbildung 5.15 Abreinigung mittels Absaugung - beispielhafter Druckverlustverlauf bei Abreinigungsversuch eines belegten Filters mit Umgebungsluft mit Düsen (Absaugung 2) (Abreinigung durch Filterdrehung wenn Wert > 0)**

### 5.9 Ergebnisse - Weitere Anmerkungen und Erkenntnisse

Während den meisten Versuchsreihen (siehe Tabelle 5.1) wurden auch zeitgleiche Staubmessungen im Roh- und Reingas durchgeführt. Hierbei wurden gravimetrische Staubmessverfahren, entweder in Anlehnung an Richtlinie VDI 2066 Blatt 1 (2006) oder ein bekanntgegebenes Schornsteinfegermessgerät (siehe z.B. Struschka et al., 2012), eingesetzt.

In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der insgesamt durchgeführten Staubmessungen aufgeführt. Dargestellt sind jeweils die gemessenen Staubkonzentrationen bezogen auf den Abgaszustand, d.h. eine Umrechnung der Konzentrationen auf einen Bezugssauerstoffgehalt wurde nicht durchgeführt. Die Reingaskonzentrationen liegen, unabhängig von den Rohgaskonzentrationen, bei ca. 10 mg/m<sup>3</sup> oder darunter. Die Rohgaskonzentrationen lagen in einem Bereich von knapp 80 bis knapp 200 mg/m<sup>3</sup>. Die Abscheidegrade liegen, selbst bei laufender Abreinigung, im Bereich zwischen 82 und 94 %.

**Tabelle 5.2** Gemessene Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas in den verschiedenen Versuchsreihen (jeweils Mittelwerte über 30 Minuten)

Versuch		Rohgas [mg/m <sup>3</sup> ]	Reingas [mg/m <sup>3</sup> ]
1	Phase 1	117	-
	Phase 2	199	-
	Phase 3	188	12
2	Phase 1	79	14
	Phase 2	77	< 10
3	Phase 1	94	13
	Phase 2	115	< 10
4	Phase 1	96	< 10
6	Phase 1	82	< 10
	Phase 2	153	11

Insgesamt wurde der Filterprüfstand ca. 465 h mit Abgasbeaufschlagung betrieben, wobei auf die Vorversuche etwa 170 h entfielen. Die meiste Zeit waren hierbei die Kunststoffbürsten im Einsatz und meistens wurden dem Basisbrennstoff auch Heupellets beigemischt. Hierdurch zeigten sich nach dem Ende der Untersuchungen deutliche Korrosionsspuren, verursacht durch die starke Beanspruchung sämtlicher Bauteile und aller Materialien mit dem höher chlorhaltigen Abgas, im Vergleich zur Verbrennung mit naturbelassenem Holz. Verstärkt wurde der korrosive Angriff durch die unvermeidbar auftretende Wasserdampfkondensation in kälteren Bereichen des Filtergehäuses bzw. beim Kaltstart der Anlage. Am Ende der jeweiligen Einzelversuche waren die Bürstenleisten (Material: Aluminium) öfter soweit korrodiert, dass sie nicht mehr (alle) der Nachführung am Filterrohr durch die Federn folgen konnten, hier war dann eine Nachbearbeitung notwendig.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurde ein funktionsfähiges Muster eines Gewebefilters mit allen notwendigen Komponenten für einen zuverlässigen und betriebssicheren Filterbetrieb entwickelt. Hierzu gehören u.a. eine Abreinigungsverrichtung, Einrichtungen zur Überwachung und Regelung des Filter- und Abreinigungsbetriebs, Gebläse und eine Filterregelung.

Ein wesentliches Entwicklungsziel war, eine sehr geringe Staubkonzentrationen im Reingas von  $< 10 \text{ mg/m}^3$  zu erreichen, was überwiegend eingehalten wurde. Die eingesetzten Filterelemente zeigten eine hohe chemische und physikalische Beständigkeit, d.h. weder der Chlorgehalt im Abgas noch höhere Eingangstemperaturen des Abgases führten zu Schäden am Filtergewebe selbst. Andere verwendete Bauteile zeigten jedoch z.T. deutliche Korrosionsspuren. Insgesamt konnte ein vergleichsweise einfaches, kostengünstiges Abreinigungsverfahren entwickelt werden, welches auch eine kompakte Bauweise mit wirtschaftlichen Druckverlusten aufweist und für eine breite Biomassepalette geeignet ist. Darüber hinaus konnten grundlegende Erkenntnisse zur Wirkungsweise sowie zum Betrieb und Einsatz von Gewebefiltern bei Biomassefeuerungen gewonnen werden.

Im Einzelnen konnte ein neuartiges Filterelement sowie eine neue Abreinigungstechnik entwickelt, gefertigt und umfassend in Dauertests untersucht werden. Es wurde eine funktionsfähige Filterregelung entwickelt und umgesetzt, die ebenfalls die notwendigen Überwachungsfunktionen und Aspekte der Betriebssicherheit beinhaltet. Zur Untersuchung des Filterelements und den Abreinigungstechniken wurde ein Standard-Prüfablauf zur Durchführung von vergleichbaren Messungen entwickelt und umgesetzt.

Der entwickelte Filter mit neuer Abreinigung hat keine direkte Rückkopplungen auf den Kesselbetrieb, die Abreinigung hat sich als wirkungsvoll gezeigt und besitzt weiteres Entwicklungspotenzial. Zur Umsetzung der Entwicklungsergebnisse in ein Serienprodukt fehlt jedoch noch eine weitere Entwicklungsstufe, in der z.B. noch andere Filtergewebe oder Anlagenparameter untersucht werden. Dies ist jetzt mit dem entwickelten Prüfablauf bei verhältnismäßig geringem Aufwand möglich, da sich die Ergebnisse der standardisierten Untersuchungen sehr gut zu einem Vergleich von verschiedenen Varianten eignen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Wahl des Filtergewebes in Verbindung mit der Abreinigungstechnik für eine wirkungsvolle und langzeitstabile Funktionsweise des Filters entscheidend ist. So konnte ein untersuchtes Filtergewebe (Bezeichnung PZ 60) nicht weiter verwendet werden, da keine funktionierende Abreinigung im Filterbetrieb erreicht werden konnte. Nach dem Wechsel auf das zweite Filtergewebe (Bezeichnung PZ 25) zeigte sich ein komplett anderes Betriebsverhalten des Filters mit deutlichem Reinigungseffekt und damit der Möglichkeit, auch Dauertests durchzuführen.

Als Abreinigungsvarianten wurden die Bürstenabreinigung und eine Absaugung mit Düsen untersucht. Bei beiden Varianten ist ein enger Kontakt von Bürste / Düse und Oberfläche des Filtergewebes notwendig, der jeweils durch die Anpressung mittels Federn erreicht wurde. Für die Bürstenabreinigung wurden unterschiedliche Borstenmaterialien (Kunststoff und Edelstahldrähte) eingesetzt. Hierbei zeigten in der Tendenz die Kunststoffbürsten ein besseres und langzeitstabileres Abreinigungsverhalten. Beim Einsatz von Drahtbürsten spielt die Materialbeanspruchung für das Filtergewebe eine wichtige Rolle. Zu starre und scharfkantige

Borsten in Verbindung mit höheren Anpressdrücken führen leicht zu starken Beschädigungen des Filtergewebes.

Bei der Düsenabsaugung im Filterbetrieb mit Abgas zeigte sich kaum eine Reinigungswirkung. Wurde dagegen das Filtergewebe bei Umgebungstemperatur mit Raumluft gereinigt, konnte eine sehr gute Reinigungswirkung erreicht werden. D.h. die Düsenabsaugung könnte als eine Art Grundreinigung bei abgeschaltetem Heizkessel durchgeführt werden, wenn das Filtergewebe ansonsten mit Bürsten gereinigt wird. Hierdurch würde sich allerdings der apparative Aufwand erhöhen, da eine doppelte Abreinigungstechnik installiert sein müsste.

Die Bürstenabreinigung besitzt gegenüber z.B. der Druckluftabreinigung wichtige Vorteile wie: sehr kompakte Bauweise möglich bei Einsatz mehrerer Filterelemente, vergleichsweise kostengünstig, vergleichsweise wirkungsvoll, sehr geräuscharm, keine Rückwirkungen auf den Feuerungsbetrieb und es ist eine langsame und damit quasi-kontinuierliche Reinigung der Filter während des Kesselbetriebs möglich. Bei sehr niedriger Drehzahl der Filterpatrone erfolgen die Phasen von Staubkuchenaufbau und Abreinigung dann nicht zeitlich sondern örtlich getrennt. Dadurch ergeben sich beim Druckverlust keine hohen Änderungen über die Dauer sondern dieser bleibt eher auf einem konstanten Niveau, was sich positiv auf das Betriebsverhalten der Feuerungsanlage auswirkt. Im Funktionsmuster hat über die Betriebsdauer die Nachführung der Bürstensegmente gut funktioniert, allerdings war hierzu ein gewisser Wartungsaufwand notwendig.

Aufbauend auf den insgesamt positiven Ergebnissen sollten für die Weiterentwicklung dieser Technik zur Marktreife noch weitere Gewebearten in Verbindung mit Bürstenmaterialien untersucht werden, um hier eine optimale Auswahl zu treffen. Außerdem sollten weitere Bauarten von Feuerungsanlagen mit verschiedenen Brennstoffen getestet werden, zum einen mit dem entwickelten Prüfablauf zur Materialauswahl und anschließend im praxisnahen Heizbetrieb (auf dem Prüfstand und als Langzeituntersuchungen über eine reale Heizperiode).

Ansätze zur Weiterentwicklung sind außerdem: die Optimierungen der Konstruktion (z.B. Fixierung des Gewebes auf dem Trägermaterial, Bürstenlagerung, exakte Positionierung der Abreinigung, Materialwahl bezüglich Korrosion beachten, Schwachstellen für Kondensation reduzieren, genaue Fertigung der Stützkonstruktion, Reduzierung des Grunddruckverlustes (ohne Filtergewebe) der Konstruktion).

Des Weiteren sollten noch unterschiedliche Strategien zur Abreinigung untersucht werden, wie z.B. die konkreten Vorteile der quasi-kontinuierlichen Reinigung gegenüber herkömmlichem Verfahren sowie eine Kombination von Bürstenreinigung und Absaugung, wobei die Bürstenreinigung während des Kesselbetriebs eingesetzt werden soll und die Absaugung ab und zu zur Grundreinigung verwendet werden soll.

## 7 Literatur

1. BImSchV: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV) vom 26. Januar 2010. BGBl I, S. 38., 2010.
- Athmann, Uwe; Neuerburg, Florian; Quicker, Peter: Abscheidung von Feinstaub aus Biomassekleinfeuerungen mit Tiefenfiltern. Endbericht zum Forschungsvorhaben unter FKZ 22012810 der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, Lehr und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, November 2013.
- Fröling GmbH: „Hackgutkessel T4“, Online Information unter: <http://www.tga-fachplaner.de/TGA-2011-12/T4-Hackgutkessel-von-24-bis-110-kW,QUIEPTMzOTI4OSZNSUQ9MTAwMjQ4.html> (Zugriff Mai 2015).
- Kiener, Susanne; Turowski, Peter; Hartmann, Hans; Schmoeckel, Gerhard: Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel, Berichte aus dem TFZ 23, Straubing, September 2010.
- Kudryavtseva, Tatiana: Übersicht zum Stand der Technik von Gewebefiltern. Student Research Project Nr. 3260. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2.6.2014.
- Oser, M; Nussbaumer, T.; Müller, P.; Mohr, M.; Figi, R: Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen. Projekt im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Verenum, Zürich 2003.
- Struschka, Michael; Winter, Patricia; Baumbach, Günter: Überprüfung der Wirksamkeit von Staubabscheidern für Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe. Endbericht zum Forschungsvorhaben unter Az. 30972 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart, März 2015.
- Struschka, Michael; Schäfer, Christian; Ertl, Tobias; Münzenmaier, Lena; Brodbeck, Johannes: Emissionsmessungen bei der Verbrennung von Heupellets in einem Heizkessel mittlerer Leistung mit Gewebefilter. Messbericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) in Karlsruhe. , Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart, April 2014.
- Struschka, Michael; Schäfer, Christian; Thienel, Michael: Durchführung einer modellhaften Eignungsprüfung eines Staubmessverfahrens für die Überwachung der neuen Staubgrenzwerte der 1. BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Endbericht zum Förderkennzeichen (UFOPLAN) 3710 42 201. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart, Februar 2012.
- Struschka, Michael; Juschka, Winfried; Ebding, Tobias; Baumbach, Günter: Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines Edelstahl-Gewebefilters an einer Pelletsfeuerung. Untersuchungen mit Förderung durch das Umweltministerium Baden-Württemberg (Förderkennzeichen: BUT 032). Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) der Universität Stuttgart, Juli 2009.
- VDI 2066 Blatt 1: VDI-Richtlinie Messen von Partikeln. Staubmessung in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Berlin: Beuth Verlag, November 2006
- VDI 3677 Blatt 3: VDI-Richtlinie Filternde Abscheider. Heißgasfiltration. Beuth Verlag, Berlin, November 2012.
- VDI 3926 Blatt 1: VDI-Richtlinie Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter. Standardprüfung zur vergleichenden Bewertung von abreinigbaren Filtermedien. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2004.