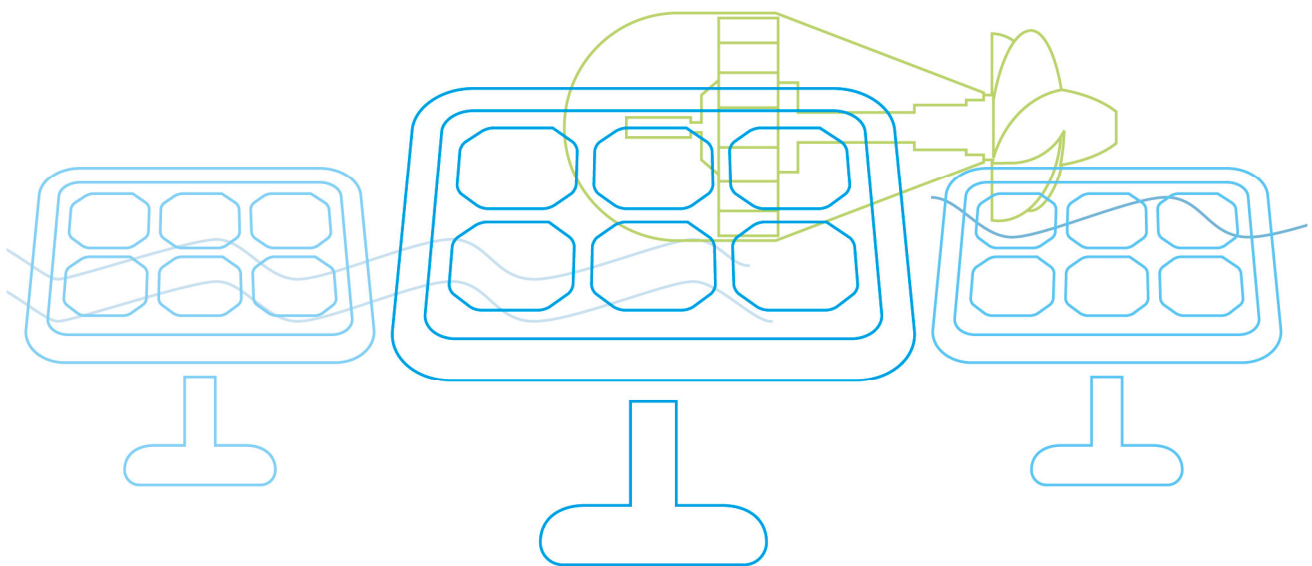




Evaluierung der Effizienz und Verfügbarkeit sowie Weiterentwicklung von E-Filtern für alte Biomasse-Kleinfeuerungen



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several sweeping, connected strokes.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, written in a cursive style that clearly reads 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Evaluierung der Effizienz und Verfügbarkeit sowie Weiterentwicklung von E-Filtern für alte Biomasse-Kleinfeuerungen

BM-PM-Filtertest

AutorInnen:

Prof. Univ.-Doz. DI Dr. Ingwald Obernberger

DI. Dr. Thomas Brunner

DI Dr. Friedrich Biedermann

1 Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Inhaltsverzeichnis | 4 |
| 2 | Einleitung..... | 5 |
| 2.1 | Ausgangssituation..... | 5 |
| 2.2 | Zielsetzungen | 5 |
| 2.3 | Einordnung in das Programm | 6 |
| 2.4 | Verwendete Methoden und Aufbau der Arbeit..... | 6 |
| 3 | Inhaltliche Darstellung | 7 |
| 4 | Ergebnisse und Schlussfolgerungen..... | 8 |
| 4.1 | AP1: Definition der Mess-, Auswertungs- und Bewertungsmethodik sowie Vorbereitung der Testläufe..... | 8 |
| 4.2 | AP2: Durchführung von Vortests mit den Filtern an einer modernen Pelletsfeuerung..... | 11 |
| 4.3 | AP3: Durchführung von Testläufen mit den Filtern an zwei alten Scheitholzesseln sowie an zwei Scheitholz-Kaminöfen samt Aus- und Bewertung | 12 |
| 4.4 | AP4: Gesamtevaluierung und Ausarbeitung von Empfehlungen für Hersteller von E-Filtern sowie für den Gesetzgeber und Förderstellen..... | 16 |
| 4.5 | AP5: Koordination, Ergebnisverbreitung und Berichtlegung | 20 |
| 5 | Ausblick und Empfehlungen | 20 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 23 |
| 7 | Kontaktaten | 24 |

2 Einleitung

2.1 Ausgangssituation

Erhöhte Feinstaubemissionen, die zu Problemen mit der Einhaltung der PM₁₀ Grenzwerte in der Umgebungsluft führen, stellen in vielen europäischen Regionen ein ernstzunehmendes Problem dar. Als eine der Hauptemissionsquellen wurde dabei der Hausbrand identifiziert, wobei in Österreich wie auch in vielen anderen europäischen Ländern wiederum ein Großteil der diesem Sektor zuordenbaren PM₁₀-Emissionen aus alten Scheitholzkesseln und Naturzugöfen stammen. Der wirtschaftlich wie auch emissionstechnisch kurzfristig effizienteste Weg zur Emissionsreduktion ist die Nachrüstung von Altanlagen mit E-Filtern (Emissionseinsparungspotential von mehr als 70% bezogen auf den Hausbrand in Österreich). E-Filter werden in großen Biomassefeuerungen bereits standardmäßig eingesetzt und wurden in den letzten Jahren auch für Kleinanlagen entwickelt. Ihr Einsatz in Altanlagen ist allerdings problematisch, da dort durch schlechte Ausbrandbedingungen hohe Russemissionen und Emissionen kondensierter organischer Verbindungen überwiegen, die in Bezug auf Filterdesign und speziell auf die Filterabreinigung besonders robuste Technologien erfordern.

2.2 Zielsetzungen

Aus diesen Gründen hatte es sich das Projekt zum Ziel gesetzt, 3 vielversprechende E-Filter, die für den Einsatz in Biomasse-Kleinfeuerungen entwickelt wurden, an Altanlagen und Kaminöfen zu testen und ihre prinzipielle Anwendbarkeit, die erzielbaren Feinstaubabscheideraten sowie mögliche Betriebsprobleme zu evaluieren. Diese Daten und Erkenntnisse sollten einerseits dazu dienen, E-Filter-Technologien für dieses Einsatzgebiet weiter zu entwickeln und zu optimieren und andererseits auch eine wichtige Entscheidungsgrundlage für den Gesetzgeber bezüglich der Entwicklung neuer Strategien zur Luftreinhaltung (z.B. Förderungen für die Nachrüstung von Altanlagen mit Filtern) zu liefern. Da die korrekte Vermessung und Bewertung von Filtern an Altanlagen und Naturzugöfen durch das Fehlen diesbezüglicher Standards und Normen besonders problematisch ist, sollte zu Beginn des Projektes eine entsprechende Mess-, Aus- und Bewertungsmethodik sowie darauf aufbauend ein geeigneter Teststandsaufbau entwickelt werden. Es wurden somit folgende Projektziele definiert:

- Entwicklung einer für die Beurteilung der Fein- und Gesamtstaubabscheideeffizienz von E-Filtern für Biomasse-Kleinfeuerungen, speziell für Altanlagen und Naturzugöfen, geeigneten Mess- und Bewertungsmethodik sowie eines darauf abgestimmten Teststandes.
- Durchführung von Testläufen mit 3 ausgewählten Filtertechnologien an alten Scheitholzkesseln sowie an Kaminöfen.
- Aus- und Bewertung der Testläufe unter besonderer Berücksichtigung der Abscheideeffizienz, der Verfügbarkeit und Fehleranfälligkeit der Filter.
- Ausarbeitung von Vorschlägen für die Weiterentwicklung und von Optimierungsmaßnahmen für E-Filter für Biomasse-Kleinfeuerungen (Schwerpunkt Altanlagen).

- Ausarbeitung von Empfehlungen für den Gesetzgeber bezüglich des breiten Einsatzes von E-Filtern als Maßnahme zur Reduktion der Feinstaubemissionen von alten Biomassekesseln und Naturzugöfen.

2.3 Einordnung in das Programm

Die Projektergebnisse sollten die Weiterentwicklung und Optimierung von E-Filter Technologien für Biomasse-Kleinfeuerungen, speziell für Altanlagen, unterstützen. Sie sollten aber auch für die Definition von Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität durch die Nachrüstung von alten Biomassekesseln sowie Naturzugöfen mit E-Filtern eine Informationsgrundlage bilden. Nicht zuletzt sollte das Projekt methodische Vorgaben bezüglich Messtechnik und Filterbewertung für den Test von E-Filtern an alten Biomasse-Kleinfeuerungen liefern. Die Arbeiten im Rahmen des Projektes sind somit klar dem Themenpunkt 3.7.3.3. *Fest Brennstoffe, Primäre und Sekundäre Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen* der 4. Ausschreibung der Neuen Energien 2020 zugeordnet.

2.4 Verwendete Methoden und Aufbau der Arbeit

Das Projekt wurde in enger Kooperation zwischen der BIOENERGY 2020+ GmbH (BE2020) und der BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH (BIOS) durchgeführt. BE2020 brachte dabei umfangreiches Grundlagenwissen bezüglich der Bildung, Charakterisierung und Messung von Feinstaubemissionen in Biomassefeuerungen und BIOS weitreichende Erfahrungen bezüglich Konzeption, Test und Bewertung von E-Filtern (nicht nur für Kleinanlagen) in das Projekt ein. Auf diesen bereits vorhandenen Kompetenzen der Partner bauten die Arbeiten auf.

Um die Zielsetzungen des Projektes zu erreichen wurde eine grundsätzliche Methodik entwickelt, die auf 3 Säulen aufbaut. Ein wesentlicher Aspekt war die Erarbeitung einer entsprechenden Mess-, Aus- und Bewertungsmethodik bezüglich Feinstaubemissionsminderungen durch E-Filter in Biomasse-Kleinfeuerungen sowie eines, den Anforderungen dieser Methodik entsprechenden Teststandes. Speziell zu diesem Punkt wurde von den beiden Projektpartnern BE2020 und BIOS erhebliches Wissen aus vorangegangenen Projekten eingebracht.

Den zweiten Schwerpunkt bildeten Testläufe mit den ausgewählten Filtern mit der neu entwickelten Methodik. Es wurden zuerst Testläufe an einer modernen Pelletsfeuerung durchgeführt, um die prinzipielle Funktion und Abscheideleistung der Filter unter sehr guten Ausbrandbedingungen zu untersuchen. Die im Zuge dieser Testläufe ermittelten Staubabscheideeffizienzen sollten auch als Benchmark für die folgenden Testläufe an Altanlagen dienen. Dann erfolgten Testläufe an je 2 alten Scheitholzesseln und 2 Kaminöfen. Diese Testläufe sowie deren Aus- und Bewertung bilden den Kern des Projektes.

Der dritte Schwerpunkt lag in einer umfassenden Aus- und Bewertung der Testläufe. Außerdem wurden aus den Ergebnissen Optimierungspotentiale für Filterhersteller abgeleitet und Empfehlungen für den Einsatz von E-Filtern in Biomasse-Kleinfeuerungen erarbeitet.

3 Inhaltliche Darstellung

Auf dem im Abschnitt 2.4 erläuterten methodischen Ansatz aufbauend wurde das Projekt in insgesamt 5 Arbeitspakete (AP) strukturiert, deren Inhalte im Folgenden kurz umrissen werden.

Ziel von **AP1, Definition der Mess-, Auswertungs- und Bewertungsmethodik sowie Vorbereitung der Testläufe**, war es, die Testläufe, die im Rahmen der AP2 und 3 durchgeführt wurden, vorzubereiten. Dazu wurde die Teststandanordnung im Detail definiert und es wurden die Methoden, die bezüglich der Messungen sowie der Datenaus- und Bewertung eingesetzt werden sollten, entwickelt. Des Weiteren wurde ein detaillierter Versuchsplan erstellt.

In **AP2, Durchführung von Vortests mit den Filtern an einer modernen Pelletsfeuerung**, wurde jeder Filter einem Vortest an einer modernen Pellefeuerung unterzogen. Die Tests fanden am neu errichteten Teststand statt und erfolgten nach der in AP1 erarbeiteten Methodik. Die Montage und Inbetriebnahme der Filter wurden von einem Fachmann (Techniker des Filterherstellers) durchgeführt. Ziel dieser Testläufe war es, die bereits bekannten Messdaten zu den einzelnen Filter, die an modernen Feuerungen erhoben wurden, zu bestätigen, und einen Ausgangspunkt für die Aus- und Bewertung der nachfolgenden Messungen an den alten Scheitholzkesseln sowie den Kaminöfen zu erhalten.

Im Zuge von **AP3, Durchführung von Testläufen mit den Filtern an zwei alten Scheitholzkesseln sowie an zwei Scheitholz-Kaminöfen samt Aus- und Bewertung**, wurden Testläufe mit 3 E-Filtern an jeweils zwei alten Stückholzkesseln und 2 Kaminöfen durchgeführt. Neben den Emissionsmessungen gemäß der in AP1 entwickelten Methodik wurden dabei zusätzlich, um die Qualität des eingesetzten Brennstoffes zu prüfen, stichprobenartige Analysen von Brennstoffmischproben durchgeführt. Außerdem wurden die Feinstaubemissionen vor und nach den Filtern für ausgewählte Testläufe analysiert, um genauere Einblicke in das Abscheideverhalten der Filter für unterschiedliche Komponenten (anorganische Stäube, organische Stäube, Ruß) zu erlangen. Erstauswertungen wurden zur Orientierung und Standortbestimmung immer parallel zu den Testläufen durchgeführt. Die Gesamtauswertung erfolgte am Ende der jeweiligen Testserie.

AP4, Gesamtevaluierung und Ausarbeitung von Empfehlungen für Hersteller von E-Filtern sowie für den Gesetzgeber und Förderstellen, teilte sich in 2 Schwerpunkte. Schwerpunkt 1 umfasste die Zusammenführung der Erfahrungen und Messdaten aus den einzelnen Testläufen und Schwerpunkt 2 beinhaltete die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen und allgemeinen Hinweisen für Filterhersteller sowie von relevanten Informationen für Gesetzgeber (Länder, Bund) und Förderstellen.

Im Zuge von **AP5, Koordination, Ergebnisverbreitung und Berichterlegung** wurden regelmäßige Abstimmungsbesprechungen der beiden Projektpartner zur effizienten Koordination der Arbeiten durchgeführt. Es wurde ständig Kontakt mit den Herstellern der getesteten Filter gehalten und Zwischenergebnisse sowie auftretende Probleme wurden mit ihnen diskutiert. Als wichtiger Schritt zur Ergebnisverbreitung wurde ein abschließender Workshop organisiert, in dem die Projektergebnisse öffentlichen Stellen, Förderstellen und der Industrie präsentiert wurden. Des Weiteren wurde das im Projekt erlangte Wissen im Zuge des *Fachgesprächs Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen*, März 2013, Straubing, D) mit internationalen Fachleuten auf dem Gebiet der Biomassefeuerungstechnik sowie der Staubabscheidetechnik diskutiert. Außerdem wurde ein Vortrag zum Projekt bei der

kommenden Mitteleuropäischen Biomassekonferenz (Jänner 2014, Graz) eingereicht. Zusätzlich umfasste AP5 auch die Kommunikation mit der FFG sowie die wissenschaftliche und finanzielle Berichterlegung (Zwischen- und Endbericht).

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 AP1: Definition der Mess-, Auswertungs- und Bewertungsmethodik sowie Vorbereitung der Testläufe

Auswertungs- und Bewertungsmethodik

Es bestehen derzeit national wie auch international keine Richtlinien und Standards bezüglich der Bestimmung der Abscheideeffizienz von Filtern für Biomasse-Kleinfeuerungen. Deshalb sind die diesbezüglichen Ergebnisse von AP1 nicht nur für dieses Projekt von hoher Relevanz, sondern sollen auch die laufenden und zukünftigen europäischen Entwicklungen auf diesem Gebiet beeinflussen.

In einem ersten Schritt wurde die prinzipiell einzusetzende Messtechnik festgelegt. Es wurden folgende Messverfahren zur Bestimmung der Partikelkonzentrationen vor und nach den Filtern eingesetzt:

- diskontinuierliche Bestimmung der Gesamtstaubemissionen: Gesamtstaubmessung nach VDI 2066
- diskontinuierliche Bestimmung der Feinstaubemissionen (Partikel $<1 \mu\text{m}$): Kaskadenimpaktoren (Bernertyp Kaskadenimpaktor - BLPI, Dekati Gravimetric Impactor - DGI)
- kontinuierliche Bestimmung der Korngrößenverteilung und Anzahl der Feinstaubemissionen: Elektrischer Impaktor (Dekati ELPI)

Zur Beurteilung des Filterbetriebes wurden folgende kontinuierlichen Messungen definiert:

- Rauchgastemperaturen unmittelbar vor und nach dem Filter
- Filterspannung bzw. Filterstrom
- Druckverlust über den Filter

Zur Bewertung des Feuerungsbetriebes wurden folgende kontinuierliche Messungen durchgeführt:

- Bestimmung der Rauchgaszusammensetzung: O_2 (paramagnetisch), CO (nicht dispersives infrarot Verfahren - NDIR) und org.C (FID - Flammenionisationsdetektor)
- Kaminzug (Druckmessung am Kessel-/Ofenaustritt)
- Leistung (bei Kesseln)
- Rauchgastemperatur am Kessel-/Ofenaustritt

Besonders relevant bei der Bestimmung der Partikelkonzentrationen vor und nach dem Filter ist die Berücksichtigung der temperaturabhängigen Kondensation von organischen Aerosolbildnern in den Rauchgaskanälen. In Abbildung 1 ist das Verhalten von Feinstaubbildnern nach Kessel-/Ofenaustritt in Abhängigkeit der Rauchgastemperatur schematisch dargestellt. Feinstaubemissionen aus anorganischen Salzen und Schwermetallen (KCl , K_2SO_4 , K_2CO_3 , ZnO etc.) sowie Russ werden von der Abkühlung des Rauchgases in den Rauchgasleitungen nicht beeinflusst. Kohlenwasserstoffverbindungen hingegen lassen sich in 3 Gruppen mit unterschiedlichem Verhalten bei Abkühlung kategorisieren. Methan und andere nicht kondensierbare Verbindungen tragen nicht zur Feinstaubbildung bei.

Kondensierbare Kohlenwasserstoffverbindungen (KOK) hingegen werden mit sinkender Rauchgastemperatur verstärkt von der Gasphase in die feste Phase übergeführt und bilden dabei so genannte primäre organische Aerosole (POA). Diese Partikelbildung tritt in den Rauchgaskanälen und im Kamin auf, kann aber auch im Filter selbst passieren (wenn genügend hohe Temperaturgradienten in Strömungsrichtung vorhanden sind), was dann zur Folge hat, dass Partikel, die erst im Bereich nach der Sprühelektrode gebildet, und somit nicht aufgeladen werden, prinzipiell nicht abgeschieden werden können. Auch nach Filteraustritt können derartige Kondensationseffekte zu erheblichen Partikelbildungen führen, insbesondere dann, wenn die Betriebstemperaturen des Filters vergleichsweise hoch sind. Die dritte Gruppe von Kohlenwasserstoffverbindungen sind Komponenten, die erst nach Kaminaustritt in der Atmosphäre durch Reaktionen so genannte sekundäre organische Aerosole (SOA) bilden. Diese Partikel können im Rahmen von Emissionsmessungen nicht erfasst werden [1, 2, 3, 4, 5].

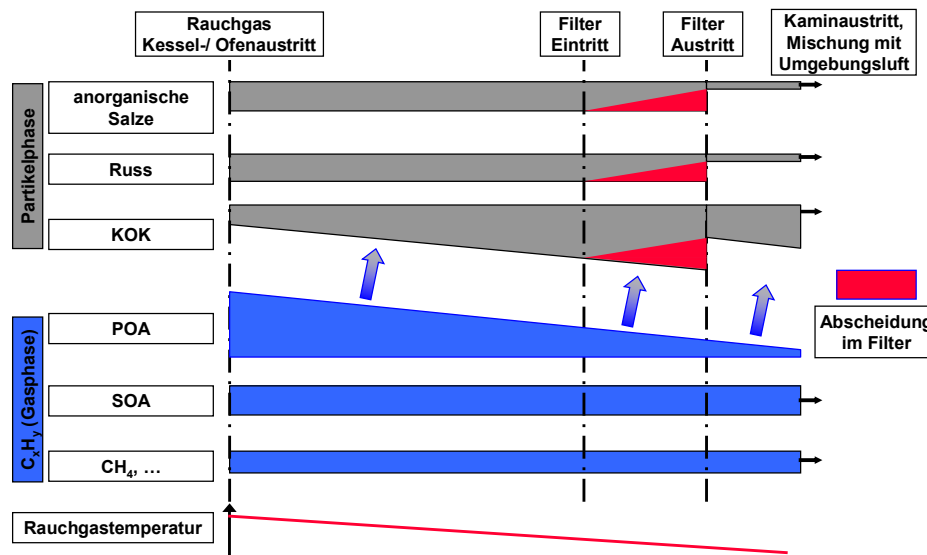


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Verhaltens von Feinstaubbildnern und anderen Rauchgaskomponenten im Rauchgaskanal nach Kessel-/Ofenaustritt

Erläuterungen: KOK ... kondensierte organische Kohlenwasserstoffverbindungen; POA ... primäre organische Aerosolbildner; SOA ... organische Sekundäraerosolbildner

Speziell bei instationären Betriebszuständen sowie bei schlechtem Ausbrand sind die Konzentrationen an Ruß und speziell an KOKs am Kessel-/Ofenaustritt erheblichen Schwankungen unterworfen, was die Messaufgabe zusätzlich erschwert. Wenn die genannten Effekte nicht berücksichtigt werden, können sie zu einer falschen Bewertung eines Filters führen. Um dies zu vermeiden, wurde folgende grundsätzliche Bewertungsstrategie erarbeitet.

- Staubemissionsmessungen im Rauchgas vor und nach dem Filter sollen nach Möglichkeit parallel durchgeführt werden.
- Die Temperatur am Filtereintritt muss der Temperatur entsprechen, die auch in der realen Anwendung erwartet wird. Die großen Unterschiede, die sich hier bei Filtermontage am Kaminaustritt und Filtermontage am Ofen-/Kesselaustritt bzw. durch die Anwendung verschiedener Feuerungstechnologien ergeben, müssen dabei berücksichtigt werden.

- Wenn kein bezüglich Kondensation von KOKs relevanter Temperaturverlust über den Filter auftritt (<20°C), sollen Impaktormessungen vor dem Filter im unverdünnten Rauchgas stattfinden. Treten signifikante Temperaturverluste (>20°C) über den Filter auf, so sollen Impaktormessungen vor dem Filter im verdünnten Rauchgas stattfinden, wobei so weit verdünnt wird, dass sich die Filteraustritts-temperatur einstellt. Dazu sollen so genannte „porous tube diluter“ eingesetzt werden. Die Abscheidungsraten des Filters werden aus den Messungen vor dem Filter und den unverdünnten Messungen nach Filteraustritt berechnet.
- Abscheideeffizienz des Filters:
$$\left(1 - \frac{\text{Partikelkonzentration am Filtereintritt [mg/Nm}^3]}{\text{Partikelkonzentration am Filteraustritt [mg/Nm}^3]} \right) * 100 \quad [\%]$$
- Diese Berechnung der Abscheideeffizienz sollte bei instationärem Betrieb ausschließlich auf Basis der parallelen gravimetrischen Messungen (Kaskadenimpaktor-/ Gesamtstaubmessung) erfolgen, da sich das ELPI Signal bei stark wechselnden Partikeleigenschaften, wie sie im instationären Betrieb vorliegen, nicht mit ausreichender Genauigkeit vom Anzahl- auf ein Massensignal umrechnen lässt.
- Während der Testläufe in AP3 sollten die Messungen prinzipiell über typische Tageslastzyklen für Kessel bzw. Öfen inklusive Anfahr- und Abfahrvorgängen bzw. Anzündbatches (bei Kaminöfen) erfolgen, um für den Feldbetrieb der Anlagen repräsentative Ergebnisse zu erzielen.

Teststand

Es wurde ein den Anforderungen der oben erläuterten Bewertungsstrategie entsprechender Teststand konzipiert und errichtet (Abbildung 2).

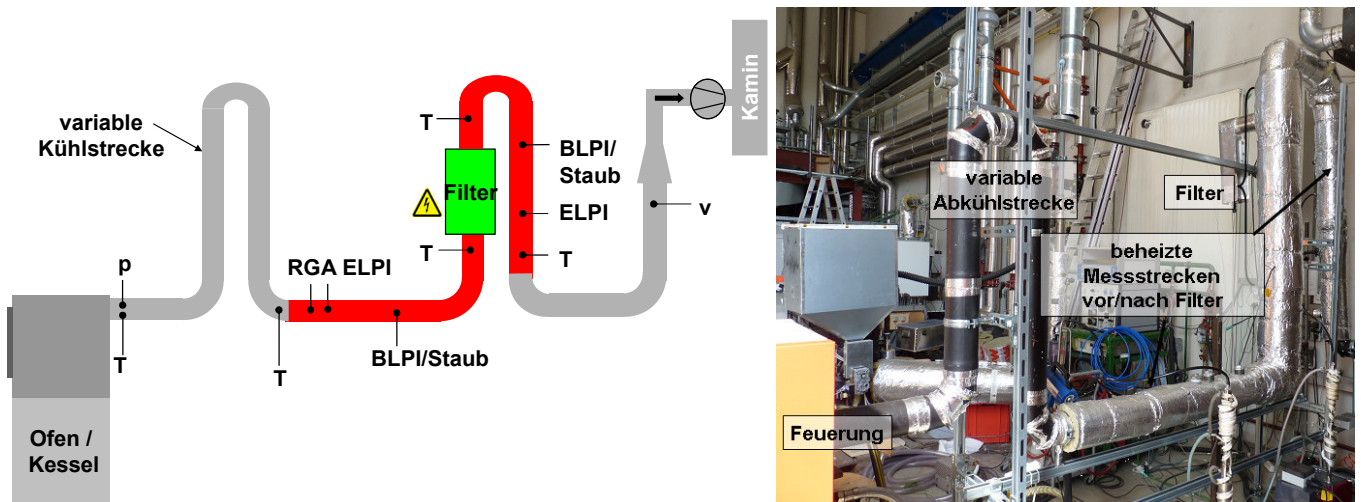


Abbildung 2: Schematische Darstellung und Foto des Teststandes

Erläuterungen: rot: beheizte Messstrecken; T ... Temperaturmessungen; p ... Unterdruckmessung (Kaminzug); v ... Geschwindigkeitsmessung; RGA ... Rauchgasanalyse (O₂, CO, org.C); ELPI ... elektrischer Niederdruck-Kaskadenimpaktor (zur on-line Bestimmung der Feinstaubemissionen); BLPI ... Berner-Typ Niederdruck-Kaskadenimpaktor (zur diskontinuierlichen gravimetrischen Bestimmung der Feinstaubemissionen); Staub ... diskontinuierliche Gesamtstaubmessung nach VDI 2066

Der Teststand besteht aus einer Kühlstrecke, an die die jeweilige Feuerung angeschlossen wird. Sinn dieser Kühlstrecke ist es, das Rauchgas vor Filtereintritt auf die Temperatur abzukühlen, die auch bei einer Realanwendung am Filtereintritt zu erwarten ist. Um verschiedene Szenarien nachstellen zu kön-

nen, ist die Länge der Kühlstrecke durch ein U-förmiges Zwischenstück leicht verlänger- und verkürzbar. Zwischen der Kühlstrecke und dem Filtereintritt befindet sich eine beheizte isotherm gehaltene Messstrecke, in der alle Messungen und Probenahmen vor dem Filter durchgeführt werden. Ihre Länge resultiert aus den Anforderungen bezüglich notwendiger Einlaufstrecken zur Strömungsberuhigung vor den einzelnen Messpunkten. Die Begleitheizung sorgt dafür, dass keine Partikelbildung durch Abkühlung eintritt und dass vor allem auch keine nennenswerte Abscheidung von Dämpfen oder Partikeln an den Wänden durch direkte Kondensation oder Thermophorese auftritt. Nach dem Filter befindet sich eine weitere beheizte Messstrecke, in der das Rauchgas auf der selben Temperatur wie am Filteraustritt gehalten wird. Durch diese Anordnung ist es möglich, genügend lange Messstrecken zur Durchführung repräsentativer Staubgehaltsmessungen zur Verfügung zu haben und unerwünschte Partikelverluste in den Rohrleitungen zu vermeiden. Zur Auslegung der einzelnen Rohrlängen, Abkühlstrecken und Beheizungen wurde ein eigens für diesen Zweck entwickeltes MS-Excel-Auslegungstool verwendet.

4.2 AP2: Durchführung von Vortests mit den Filtern an einer modernen Pelletsfeuerung

Die Vortests mit den 3 untersuchten Filtern wurden immer vor Beginn der Messkampagnen in AP3 durchgeführt. Sie wurden jeweils in Kombination mit einem Pelletkessel Typ Elektrofilter 2 BioWIN 210 durchgeführt. Dieser Pelletkessel entspricht dem derzeitigen Stand der Technik und zeichnet sich durch ein stabiles Betriebsverhalten und vergleichsweise geringe Gesamtstaub- und Feinstaubemissionen aus. Es wurden optimale Ausbrandbedingungen (CO Emissionen $<100 \text{ mg/Nm}^3$ bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O_2) eingestellt. Als Brennstoff wurden Weichholzpellets gemäß ÖNORM M7135 bzw. EN 14961-2 verwendet. Die Filtermontage und die Inbetriebnahme erfolgten im Beisein und unter Anweisung des jeweiligen Filterherstellers.

Der *Elektrofilter 1* ist ein typischer Röhrenelektrofilter, der direkt am Kaminaustritt montiert wird. Sein Einsatzbereich wird mit Biomassefeuerungen mit einer Kesselnennleistung bis 40 kW angegeben. Der Filter verfügt über eine automatische Regelung für den An- und Abschaltvorgang über die Abgas-temperatur im Kamin hat allerdings keine automatische Abreinigung der Sprüh- und der Niederschlags-elektrode (händische Reinigung durch den Kaminkehrer erforderlich). Mit dem *Elektrofilter 1* konnten durchschnittliche Abscheideleistungen für Feinstaub von rund 92% ($\pm 7,9$) und für Gesamtstaub von 94% ($\pm 6,0$) erzielt werden. Es traten im Zuge des 3-wöchigen Testbetriebs keine Probleme mit dem Filter auf.

Beim *Elektrofilter 2* handelt es sich ebenfalls um einen Röhrenelektrofilter bei dem eine Elektrode mit Sägezahnprofil eingesetzt wird. Er wird im Gegensatz zum *Elektrofilter 1* direkt am Kesselaustritt montiert. Der Einsatzbereich des getesteten Modells wird mit Pelletskesseln mit einer Nennleistung bis 26 kW angegeben. Der Filter verfügt über eine Abreinigung mit einer Sprühdüse. Am Pelletkessel wurde alle 4 Stunden mit rund 0,5 l Wasser abgereinigt. Das Wasser wird in der Aschelade des Filters gesammelt, wird zwischen den Abreinigungszyklen vollständig verdunstet und mit dem Rauchgas als Wasserdampf ausgetragen. Der Filter ist somit abwasserfrei. Im Zuge der Vortests konnten mit *Elektrofilter 2* Abscheideleistungen von durchschnittlichen 89% ($\pm 4,0$) für Feinstaub und 88% ($\pm 6,0$) für den Gesamtstaub erzielt werden. Der Filter war bezüglich der Filterspannung über den gesamten Versuchszeitraum stabil.

Elektrofilter 3 ist ebenfalls ein Röhrenelektrofilter, der am Kaminaustritt montiert wird. Der Einsatzbereich des getesteten Modells wird mit Biomassefeuerungen mit einer Kesselnennleistung bis 40 kW angegeben. Der Filter verfügt über eine automatische Regelung für den An- und Abschaltvorgang über die Abgastemperatur im Kamin, einen Spülluftventilator für den Isolator sowie eine automatische Abreinigung für das Abscheiderohr (mit Vibrationsmechanismus, Abreinigung nach jedem Abschaltvorgang bzw. nach 48 Stunden Betrieb). Während der Vortests betragen die durchschnittlichen Abscheideleistungen für Feinstaub rund 79% ($\pm 1,3$) und für Gesamtstaub rund 76% ($\pm 5,9$). Der Filter war bezüglich der Filterspannung über den gesamten Versuchszeitraum stabil.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die 3 Filter bei Betrieb mit dem modernen Pelletskessel unter guten Ausbrandbedingungen durchwegs einen stabilen Betrieb und zufriedenstellende Abscheideraten zeigten und somit die bislang veröffentlichten bzw. zu diesen Produkten bekannten Messdaten bestätigt werden konnten. Die drei Filter wurden daher für Tests in AP3 freigegeben.

4.3 AP3: Durchführung von Testläufen mit den Filtern an zwei alten Scheitholzkesseln sowie an zwei Scheitholz-Kaminöfen samt Aus- und Bewertung

Es wurden 4 unterschiedliche Feuerungen für die Testläufe gewählt. Es handelte sich um zwei Scheitholzfeuerungen älteren Baujahrs, die nicht dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, und um zwei Kaminöfen, wobei ein Kaminofen den hochpreisigen Qualitätsprodukten zuzuordnen ist und der zweite ein kostengünstiges „Baumarktprodukt“ ist. Die Scheitholzkessel weisen Kesselnennleistungen von 22 kW bzw. 25 kW auf. Die Nennleistungen der beiden Kaminöfen lagen bei 8 bzw. 6,5 kW. Im Folgenden werden die Scheitholzkessel als SHK 1 und SHK 2 und die Kaminöfen als KO 1 und KO 2 referenziert.

Die Feuerungen wurden generell mit handelsüblichem Scheitholz (in der Regel Buchenscheitholz) betrieben. Es erfolgten regelmäßige Analysen des eingesetzten Brennstoffes hinsichtlich Wassergehalt, Aschegehalt, C, H, N sowie relevanter Aschenbildner. Dabei konnten keine Abweichungen von den bei BIOS und BE2020 verfügbaren Datenbankwerten festgestellt werden, weshalb die eingesetzten Brennstoffe prinzipiell als repräsentativ für Scheitholz eingestuft wurden.

Es wurde beim Betrieb der Feuerungen kein besonderer Wert auf optimierte Verbrennungsbedingungen gelegt, vielmehr wurde versucht, die Feuerungen so wie es im Feld üblich ist zu betreiben. Daraus resultierten in der Regel Emissionen (gasförmigen wie auch Partikelemissionen), die ein Vielfaches der Emissionen des Standes der Technik betragen. Dieser Betrieb entsprach der Intention des Projektes, die Filter unter Einsatzbedingungen, wie sie auch im Feld an Altanlagen vorherrschen, zu testen und zu evaluieren. Die im Folgenden angeführten Emissionen beziehen sich generell auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O₂.

Elektrofilter 1

Der Filter wurde an allen 4 Feuerungen über einen Zeitraum von insgesamt 10 Wochen getestet. Am *SHK1* wurden dabei 2 bis 3 Füllraumfüllungen pro Tag, am *SHK2* 2 Füllraumfüllungen pro Tag und am *KO1* und *KO2* jeweils ein Anheizbatch und 4 bis 5 Folgebatches ein- bis zweimal pro Tag gefahren.

Während bei *SHK1* neben Phasen mit schlechtem Ausbrand noch Phasen mit akzeptablen Ausbrandbedingungen auftreten (CO-Emissionen unter 100 mg/Nm³ während der Hauptbrennphasen) weist *SHK2* erwartungsgemäß über den gesamten Abbrand sehr hohe CO-Emissionen (>5.000 mg/Nm³) und org.C-Emissionen auf. Dementsprechend liegen die Fein- und Gesamtstaubemissionen durch die verstärkte Bildung von organischen Aerosolen bei *SHK2* auch deutlich höher. Bei den beiden Kaminöfen lässt sich an Hand der O₂- und CO-Messdaten sehr gut der chargenweise Betrieb erkennen, wobei O₂- und CO-Spitzen jeweils zu Beginn und am Ende jedes Batches auftreten (mit Ausnahme des Anheizbatches, der durchwegs höhere CO-Emissionen aufweist). Parallel dazu zeigen auch die Partikelemissionen zu Beginn und am Ende jedes Batches erwartungsgemäß die höchsten Werte. Zusammengefasst kann angemerkt werden, dass die Emissionsverläufe den Erwartungen und Erfahrungen aus vorangegangenen Testläufen mit ähnlichen Kesseln und Öfen bzw. Feldtests an Altanlagen entsprechen und somit die angestrebten Randbedingungen für den Testläufe vorlagen.

Tabelle 1 enthält zusammenfassend die Mittelwerte sowie die Minima und Maxima zu den Partikelemissionen und den Abscheideraten, die im Rahmen der Testläufe mit dem *Elektrofilter 1* erzielt werden konnten.

Tabelle 1: Ergebnisse der Testläufe mit dem *Elektrofilter 1* - Zusammenfassung

Erläuterungen: Datendarstellung: Mittelwert (Minimum – Maximum)

| | Feinstaub | | | Gesamtstaub | | |
|------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % |
| SHK1 | 17 (9 – 44) | 3 (0,5 - 9) | 85 (68 - 95) | 30 (12 - 70) | 6 (1,1 - 11) | 80 (61 - 91) |
| SHK2 | 550 (102 – 1.133) | 171 (54 - 331) | 67 (41 - 82) | 656 (290 – 1.399) | 291 (118 - 757) | 55 (24 - 78) |
| KO1 | 48 (34 - 71) | 6 (0,3 - 16) | 93 (72 - 99) | 89 (53 - 131) | 35 (5 - 75) | 68 (47 - 91) |
| KO2 | 44 (16 - 64) | 7 (1 - 15) | 85 (70 - 95) | 52 (38 - 81) | 21 (8 - 28) | 57 (40 - 87) |

Beim Betrieb mit *SHK1* war der Elektrofilter über die gesamte Betriebszeit (4 Wochen) stabil (Spannung 30 kV). Es traten praktisch keine Spannungseinbrüche (Überschläge) auf. Die erste Messkampagne erfolgte nach einer manuellen Filterreinigung und die zweite Messkampagne fand 2 Wochen nach der Filterreinigung statt. Die Abscheideleistungen waren in beiden Fällen auf einem sehr hohen Niveau.

Der *SHK2* stellt bezüglich der Staubbiladung des Rauchgases aber auch bezüglich der auftretenden Emissionen an KOKs ungleich höhere Anforderungen an einen E-Filter. Trotzdem war der Betrieb des *Elektrofilter 1* auch mit *SHK2* relativ stabil. Es kam zwar zu Spannungseinbrüchen, jedoch traten nur wenige Überschläge auf. Die maximale Hochspannung von 30 kV konnte nicht mehr gehalten werden und die Spannung lag somit zwischen 22 und 28 kV. Daraus resultierten auch die im Vergleich zu *SHK1* um ca. 18%-Punkte (Feinstaub) bzw. ca. 25%-Punkte (Gesamtstaub) niedrigeren Abscheideleistungen.

Beim *KO1* war *Elektrofilter 1* im Betrieb relativ stabil. Es kam zwar zu Spannungseinbrüchen, es traten jedoch nur wenige Überschläge auf. Durchschnittlich lag die Spannung zwischen 25 und 30 kV. Die Abscheideleistung für Feinstaub ist grundsätzlich sehr gut, jedoch wird ein Teil des abgeschiedenen und

agglomerierten Staubes wieder von den Abscheideflächen aufgewirbelt mit dem Rauchgas ausgetragen. Dadurch liegen die Gesamtstaubabscheideeffizienzen deutlich niedriger als die für Feinstaub. Laut geltender Gesetzeslage müssen die Gesamtstaubemissionen zur Bewertung herangezogen werden.

Beim KO2 zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch hier kam es immer wieder zu Spannungseinbrüchen, es traten jedoch nur wenige Überschläge auf. Durchschnittlich lag die Spannung zwischen 23 und 28 kV. Die Abscheideleistung für Feinstaub liegt zwar um ca. 8%-Punkte unter der von KO1, es zeigt sich allerdings auch hier, dass Wiederaufwirbelung von bereits abgeschiedenen, agglomerierten Partikeln zu erhöhten Gesamtstaubemissionen und somit zu einer deutlich schlechteren Abscheideeffizienz für den Gesamtstaub führen.

Elektrofilter 2

Der Elektrofilter 2 wurde 9 Wochen lang getestet. Am SHK1 wurden dabei 2 Füllraumfüllungen pro Tag, und am KO1 und KO2 jeweils ein Anheizbatch und 4 bis 6 Folgebatches ein- bis zweimal pro Tag gefahren. Die Testläufe am SHK1 zeigten, dass der Filter für einen Einsatz bei besonders schlechten Ausbrandbedingungen, wie sie bei SHK2 nach den Erfahrungen aus den Testläufen mit dem Elektrofilter 1 auftreten, nicht einsetzbar ist. Daher, wurde auf einen Einsatz des Elektrofilter 2 in Kombination mit dem SHK2 verzichtet.

Die Betriebsdaten der Feuerungen waren prinzipiell gut mit den Trends, die bereits für die Testläufe mit dem Elektrofilter 1 am SHK1, KO1 und KO2 aufgezeichnet wurden, vergleichbar. Es konnten somit wieder die angestrebten Randbedingungen für den Filtertest eingestellt werden. Tabelle 2 enthält zusammenfassend die Mittelwerte sowie die Minima und Maxima bzw. Standardabweichungen zu den Partikelemissionen und den Abscheideraten.

Tabelle 2: Ergebnisse der Testläufe mit dem Elektrofilter 2 – Zusammenfassung

Erläuterungen: Datendarstellung: Mittelwert (Minimum – Maximum bzw. Standardabweichung)

| | Feinstaub | | | Gesamtstaub | | |
|------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % |
| SHK1 | 62 (2,5 - 603) | 52 (1,3 - 480) | 46 (+/- 16) | 106 (21 - 450) | 57 (4 - 410) | 47 (+/- 14) |
| KO1 | 91 (5 - 250) | 64 (2 - 172) | 47 (+/- 18) | 113 (55 - 278) | 95 (34 - 244) | 33 (+/- 7) |
| KO2 | 52 (9 - 126) | 22 (4 - 58) | 57 (+/- 23) | 106 (43 - 275) | 73 (27 - 181) | 32 (+/- 16) |

Mit dem SHK1 konnte zwar ein größtenteils stabiler Filterbetrieb erreicht werden, es traten jedoch zeitweise Spannungseinbrüche auf und außerdem wurden vereinzelt Spannungsüberschläge beobachtet. Die Abscheideleistungen lagen mit im Mittel 46% (Feinstaub) und 47% (Gesamtstaub) auf einem niedrigen Niveau. Der suboptimale Betrieb und die vergleichsweise geringe Abscheideeffizienz führten letztendlich zum angeführten Entschluss, den Elektrofilter 2 nicht am SHK2 zu testen, da für diese Feuerung massive Probleme mit Spannungsüberschlägen sowie noch geringere Abscheideleistungen zu erwarten gewesen wären.

Auch in Kombination mit dem *KO1* war der Betrieb des E-Filters instabil. Es traten immer wieder Spannungseinbrüche und vereinzelt Überschläge auf. Die Abscheideleistung lag auch hier mit im Durchschnitt 47% (Feinstaub) auf einem niedrigen Niveau. Die noch niedrigere Abscheideleistung für den Gesamtstaub von 33% weist auf die Aufwirbelung von agglomerierten Partikeln aus dem Filter (wie schon beim *Elektrofilter 1* beobachtet) hin. Die selben Beobachtungen wurden für den *KO2* gemacht. Auch hier traten Spannungseinbrüche und vereinzelt Überschläge auf. Die Feinstaubabscheideeffizienz lag mit 57% zwar höher als beim *KO1*, die deutlich niedrigere Abscheideleistung für den Gesamtstaub weist aber ebenfalls auf Wiederaufwirbelungen bereits abgeschiedener Partikel hin.

Insgesamt war der Betrieb des *Elektrofilter 2* bei allen drei Feuerungen von instabilen Betriebsphasen sowie wenig zufriedenstellenden Abscheideleistungen für Feinstaub, vor allem aber auch für den Gesamtstaub, gekennzeichnet.

Elektrofilter 3

Der *Elektrofilter 3* wurde an allen 4 Feuerungen über einen Zeitraum von 12 Wochen getestet. Am *SHK1* und *SHK2* wurden dabei 2 Füllraumfüllungen pro Tag und am *KO1* und *KO2* jeweils ein Anheizbatch und 3 bis 5 Folgebatches ein- bis zweimal pro Tag gefahren.

Die Betriebsdatenverläufe der Feuerungen zeigten im Wesentlichen die selben Trends wie schon bei den Testläufen mit den beiden anderen E-Filtern, weshalb auch für die Testläufe mit *Elektrofilter 3* gesagt werden kann, dass für dieses Projekt repräsentative Bedingungen vorlagen. Tabelle 2 enthält die Mittelwerte sowie Minima und Maxima zu den Partikelemissionen und den Abscheideraten, die im Zuge der Testläufe ermittelt wurden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Testläufe mit dem *Elektrofilter 3* – Zusammenfassung

Erläuterungen: Datendarstellung: Mittelwert (Minimum – Maximum)

| | Feinstaub | | | Gesamtstaub | | |
|------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % | vor E-Filter mg/Nm ³ | nach E-Filter mg/Nm ³ | Abscheidung % |
| SHK1 | 35 (6 - 137) | 11 (1 - 33) | 70 (42 - 95) | 67 (7 - 334) | 13 (1 - 45) | 76 (48 - 95) |
| SHK2 | 120 (5 - 362) | 50 (2 - 174) | 59 (29 - 77) | 142 (31 - 528) | 87 (16 - 399) | 44 (24 - 73) |
| KO1 | 44 (10 - 161) | 14 (3 - 76) | 69 (43 - 89) | 73 (36 - 189) | 62 (17 - 149) | 13 (-92 - 60) |
| KO2 | 110 (46 - 374) | 50 (10 - 191) | 56 (20 - 88) | 125 (86 - 157) | 88 (39 - 154) | 30 (-26 - 72) |

Bei Betrieb mit dem *SHK1* war der *Elektrofilter 3* über die gesamte Betriebszeit stabil. Die Filterspannung lag bei 24kV und es traten nur kurze Spannungseinbrüche (Überschläge) auf (vor allem in den Anheizphasen). Die Abscheideleistung war mit durchschnittlich 70% für Feinstaub und durchschnittlich 76% für Gesamtstaub auf einem akzeptablen bis guten Niveau.

Bei *SHK2* lief der Filter zwar anfänglich stabil, nach rund 5 Tagen Betrieb traten jedoch trotz der automatischen Abreinigung, die 2-mal am Tag aktiviert wurde, Spannungsüberschläge auf und die Hochspannung brach auf 0 kV ein. Der E-Filter musste daraufhin manuell gereinigt werden, wobei sich

zeigte, dass sich am Isolator und auf der Elektrode eine mehrere Millimeter dicke Teer- und Rußschicht gebildet hatte. Die Feinstaubabscheideeffizienz variierte stark zwischen 29 und 77%. Die geringere Abscheideleistung für Gesamtstaub weist darauf hin, dass es auch hier zeitweise zu einer Wiederaufwirbelung bereits abgeschiedener agglomerierter Partikel aus dem Filter kam.

Sowohl bei Betrieb mit *KO1* als auch mit *KO2* war der *Elektrofilter 3* über die gesamte jeweils ca. 3-wöchige Testphase stabil. Die Feinstaubabscheidung war bei *KO1* mit durchschnittlich 69% und bei *KO2* mit lediglich 56% deutlich unter dem Niveau, das mit dem *Elektrofilter 1* erreicht werden konnte. Speziell die Abscheideleistung bei *KO2* ist als unbefriedigend zu bezeichnen. Auffallend ist, dass sich die Wiederaufwirbelung von bereits abgeschiedenen Feinstaubpartikeln beim *Elektrofilter 3* besonders negativ auf die Gesamtstaubemissionen auswirkt. Hier kam es sogar zu negativen Abscheideergebnissen, das heißt, dass im Reingas höhere Gesamtstaubgehalte als im Rohgas gemessen wurden.

4.4 AP4: Gesamtevaluierung und Ausarbeitung von Empfehlungen für Hersteller von E-Filtern sowie für den Gesetzgeber und Förderstellen

Die Hauptzielsetzung von AP4 war es, die in AP3 gesammelten Daten einer umfassenden Bewertung zu unterziehen und daraus Schlussfolgerungen bezüglich der Stärken und Schwächen der einzelnen E-Filter zu erarbeiten sowie Empfehlungen für deren Weiterentwicklung und Einsatz abzuleiten.

Dem *Elektrofilter 1* kann grundsätzlich ein positives Zeugnis ausgestellt werden, wenngleich noch Optimierungspotentiale zu orten sind. Mit dem modernen *Pelletsessel* war der Filter drei Wochen und mit dem *SHK1* 4 Wochen stabil in Betrieb. Bei *SHK2*, der speziell wegen seiner hohen Emissionen an org.C sowie KOKs extreme Anforderungen an E-Filter stellt, konnte zwar immer noch ein stabiler Betrieb erzielt werden, die Filterspannung fiel jedoch von ca. 30 kV auf 22 bis 28 kV ab. Bei den beiden Kaminöfen wurde ebenfalls ein stabiler Betrieb beobachtet, es kam aber zu einzelnen Spannungseinbrüchen. Die durchschnittliche Filterspannung lag schlussendlich zwischen 22 und 30 kV. Es kann der Schluss gezogen werden, dass der Filter mit allen getesteten Feuerungen betrieben werden konnte. Ein automatisches Abreinigungssystem könnte speziell bei Feuerungen mit hohen Partikelemissionen wie *KO1* und *KO2* sowie *SHK2* zu einer Reduktion der Spannungsüberschläge und zu im Durchschnitt höheren Filterspannungen führen, was wiederum positive Auswirkungen auf die Abscheideeffizienz hat.

In Abbildung 3 sind die mit *Elektrofilter 1* erzielten Abscheidegrade für Feinstaub und Gesamtstaub dargestellt. Für die moderne *Pelletsfeuerung* konnten erwartungsgemäß sehr hohe Abscheideleistungen mit durchschnittlich rund 92% für Feinstaub und 94% für Gesamtstaub erzielt werden. Auch für den *SHK1* lagen die Abscheideleistungen mit durchschnittlich rund 85% für Feinstaub und 80% für Gesamtstaub auf einem hohen Niveau. Nicht zuletzt auf Grund der niedrigeren Filterspannung konnten für den *SHK2* lediglich rund 67% Abscheidung für Feinstaub und 55% Abscheidung für Gesamtstaub erzielt werden, was aber immer noch die besten Ergebnisse verglichen mit den anderen getesteten Filtern sind. Auch bei den *Kaminöfen* konnten für Feinstaub mit durchschnittlich rund 85 und 93% respektable Abscheideleistungen erzielt werden. Es wurde allerdings festgestellt, dass Wiederaufwirbelungen von bereits abgeschiedenen Rußpartikeln von den Filteroberflächen zu erhöhten Gesamtstaubemissionen führten und somit die Abscheideeffizienzen für den Gesamtstaub mit 57 und 68% deutlich niedriger lagen. Eine automatische Abreinigung der Sprühelektrode und der Abscheideelektrode, die

während des Feuerungsstillstandes aktiviert wird, könnte hier entsprechende Abhilfe schaffen und den Filter speziell beim Einsatz in Feuerungen mit hohen Partikelemissionen robuster und stabiler machen.

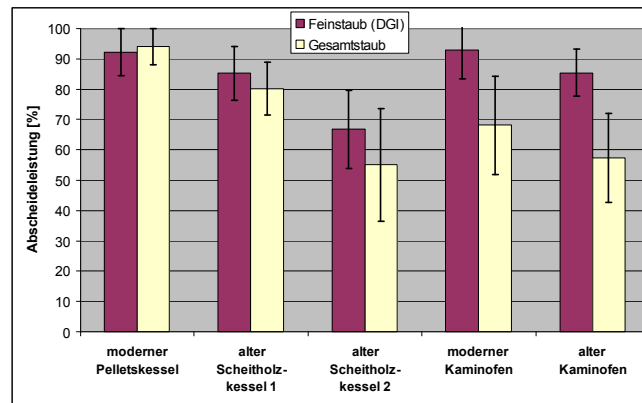


Abbildung 3: Zusammenfassung der mit dem *Elektrofilter 1* erzielten Abscheidegrade für Feinstaub und Gesamtstaub

Abschließend kann dem *Elektrofilter 1* somit bescheinigt werden, dass er für den Einsatz mit modernen Pellet-, Hackgut- und Scheitholzkesseln (niedrige Teer- und Rußbelastungen) sehr gut und für den Einsatz mit alten Scheitholzkesseln ebenfalls geeignet zu sein scheint. Sollte das Problem mit der Wiederaufwirbelung von bereits abgelagerten Rußpartikeln unter Kontrolle gebracht werden, so lässt sich der Filter auch sehr gut zur Emissionsminderung bei Kaminöfen einsetzen. Es sei allerdings angemerkt, dass die in diesem Bericht angeführten Erfahrungen einen Betriebszeitraum von ca. 2 bis 3 Monaten abdecken. Ob der Filter über eine gesamte Heizperiode seine Performance halten kann, kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

Der *Elektrofilter 2* wurde für den Einsatz mit modernen Pelletkesseln entwickelt und ist für diesen Feuerungstyp zuverlässig und bezüglich der Abscheideleistung effizient (siehe Abbildung 4). Erfahrungen im Langzeitbetrieb innerhalb eines anderen Projektes haben gezeigt, dass der Elektrofilter mit einem modernen Pelletkessel über eine gesamte Heizperiode ohne händische Abreinigung betrieben werden kann. Das implementierte Abreinigungssystem scheint somit auch im Dauerbetrieb über Monate gut und effizient zu funktionieren. Die Versuche mit *SHK1* haben aber gezeigt, dass der Filter für einen Einsatz bei schlechten Ausbrandbedingungen derzeit als nicht geeignet erscheint. Der Filter läuft zwar mit akzeptabler Stabilität, die Abscheideeffizienz liegt aber mit knapp unter 50% niedrig. Für den Einsatz mit *Kaminöfen* ist der *Elektrofilter 2* derzeit nicht geeignet. Die durchschnittlich gemessenen Abscheideleistungen für Gesamtstaub lagen für beide untersuchten Kaminöfen mit ca. 33 % sehr niedrig. Eine Wiederablösung von abgeschiedenen und agglomerierten Partikeln aus dem Elektrofilter ist wahrscheinlich (die Abscheideleistung für Gesamtstaub ist geringer als die für Feinstaub). Wesentlich ist aber, dass die Versuche kein stabiles Betriebsverhalten zeigten. Überschlüge und Spannungseinbrüche sowie vorübergehende Ausfälle der Filterspannung begleiteten bei beiden Kaminöfen den Betrieb. Eine Nachrüstung von Kaminöfen wäre außerdem schwer möglich, da der Filter für eine direkte Kopplung an den Ofen/Kessel konzipiert wurde. Lediglich eine direkte Integration des Filterkonzepts in Kaminöfen (Integration direkt nach Rauchgasaustritt) wäre grundsätzlich denkbar. Zusammenfassend muss somit

gesagt werden, dass sich der *Elektrofilter 2* zwar für die Nachrüstung von automatisch beschickten Feuerungen eignet, ein Einsatz in alten Scheitholzkesseln und Naturzugöfen derzeit allerdings nicht empfohlen werden kann.

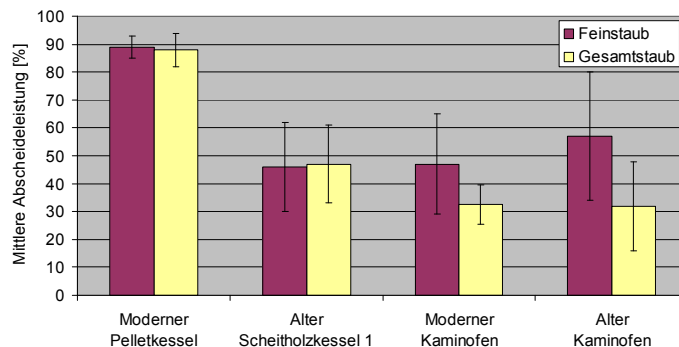


Abbildung 4: Zusammenfassung der mit dem *Elektrofilter 2* erzielten Abscheidegrade für Feinstaub und Gesamtstaub

Beim *Elektrofilter 3* lag die Abscheideleistung mit durchschnittlich rund 79% für Feinstaub und 76% für Gesamtstaub bei Betrieb mit dem *Pelletkessel* auf einem guten Niveau (siehe Abbildung 5). Auch bei SHK1 konnten mit Abscheideleistungen von durchschnittlich rund 70% für Feinstaub und 76% für Gesamtstaub durchaus akzeptable Werte erzielt werden. Beim Betrieb mit *SHK2* kam es allerdings zu einem signifikanten Einbruch der Abscheideleistungen auf durchschnittlich rund 59% für Feinstaub und 44% für Gesamtstaub. Der E-Filter war bereits nach rund 30 Betriebsstunden nicht mehr stabil und eine manuelle Reinigung musste durchgeführt werden. Es muss geschlussfolgert werden, dass der E-Filter derzeit für Anlagen mit hohen Teer- und Rußbelastungen nicht geeignet zu sein scheint. Da der Filter grundsätzlich ähnlich wie der *Elektrofilter 1* aufgebaut ist, aber zusätzlich über eine automatische Abreinigung verfügt, dürfte der Grund für die, im Vergleich zum *Elektrofilter 1* schlechtere Performance mit *SHK2* darin liegen, dass der Isolator direkt dem Rauchgas ausgesetzt, und somit anfälliger bezüglich Ablagerungen von Teeren und Russbelägen ist, was zu Problemen mit Überschlügen führt.

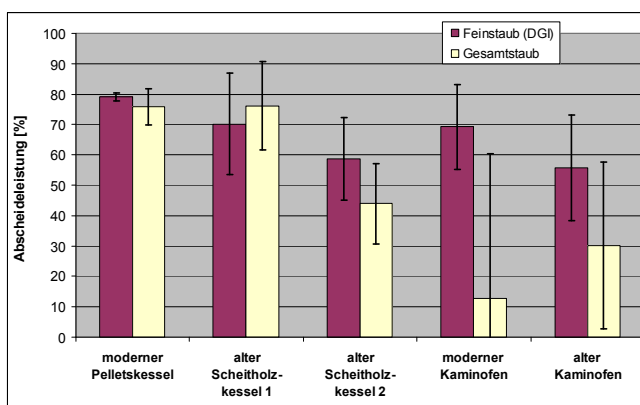


Abbildung 5: Zusammenfassung der mit dem *Elektrofilter 3* erzielten Abscheidegrade für Feinstaub und Gesamtstaub

Bei Betrieb mit den beiden Kaminöfen war *Elektrofilter 3* zwar über die gesamte Testphase stabil und zeigte akzeptable Feinstaubabscheideraten, die Gesamtstaub-Abscheideleistung lag mit durchschnittlich

13 und 30% aber sehr niedrig und war bei Einzelmessungen zum Teil sogar negativ. Dies ist wahrscheinlich auf die bereits mehrmals angesprochene Wiederablösung von abgeschiedenen, agglomerierten Stäuben zurückzuführen (hohe Russanteile bereiten in diesem Zusammenhang Probleme). Aus diesem Grund ist ein Einsatz an Kaminöfen derzeit nicht zu empfehlen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den untersuchten Produkten die Abscheideeffizienz generell mit schlechter werdendem Ausbrand abnahm. *Elektrofilter 2* und *Elektrofilter 3* zeigten außerdem bei schlechter werdendem Ausbrand zunehmende Probleme mit der Stabilität der Filterspannung. Speziell hier müssen in Zukunft noch erhebliche Verbesserungen implementiert werden, die sich auf einen besseren Schutz des Isolators vor Kondensation von KOKs sowie auf verbesserte Abreinigungssysteme konzentrieren sollten.

Besonders auffällig war bei allen drei E-Filtern das Problem, dass die Wiederablösung bereits abgeschiedener Partikel beim Betrieb mit Kaminöfen in der Regel zu deutlich schlechteren Abscheideraten für Grobstaub als für Feinstaub führte. Im Zuge von AP3 wurde Staubproben, die vor und nach den E-Filtern gezogen wurden, chemischen Analysen unterzogen. In Abbildung 6 sind die mittleren Zusammensetzungen der Partikel vor Filtereintritt zusammengefasst. Es lässt sich deutlich erkennen, dass mit schlechter werdendem Ausbrand, wie erwartet, vom SHK1 zu den anderen Feuerungen hin der Anteil an anorganischen Partikeln abnimmt. Des Weiteren ist klar ersichtlich, dass die Emissionen des SHK2 von KOKs dominiert werden, während bei den Kaminöfen eindeutig Rußpartikel dominieren. Ruß bildet aufgrund seiner sehr guten elektrischen Leitfähigkeit sehr lockere Beläge auf den Filteroberflächen, die sich wieder leicht ablösen lassen und somit zum angesprochenen Problem mit der im Vergleich zur Feinstaubabscheidung deutlich verminderten Gesamtstaubabscheidung führen [6].

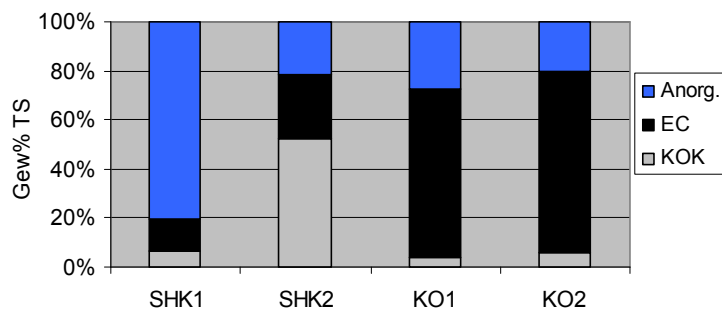


Abbildung 6: Chemische Zusammensetzungen der Staubemissionen nach Kessel bzw. Ofen

Erläuterungen: EC ... elementarer Kohlenstoff (Ruß); KOK ... organische Kohlenstoffverbindungen; Anorg. ... anorganischer Anteil

Die Ergebnisse der Testläufe wurden mit den drei Filterherstellern diskutiert und es wurden vom Projektteam den Filterherstellern auch Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen. Die Ergebnisse, Hinweise für Filterhersteller aber auch relevante Informationen für Gesetzgeber und Förderstellen wurden in Präsentationen zusammengefasst und im Rahmen des Abschlussworkshops am 26.04.2013 öffentlich zugänglich gemacht.

4.5 AP5: Koordination, Ergebnisverbreitung und Berichterlegung

Regelmäßige Abstimmungsbesprechungen der beiden Projektpartner bildeten die Basis für die effiziente Abarbeitung des, speziell bezüglich des umgesetzten Messprogramms, ambitionierten Arbeitsplanes. Extern wurde in erster Linie mit den Filterherstellern, deren Produkte im Projekt getestet wurden, intensiv kommuniziert. Auftretende Probleme sowie Beobachtungen und Erfahrungen aus den Testläufen wurden mit den Herstellern besprochen und somit auch ein entsprechender Know-how und Informationsfluss in Richtung der Industrie realisiert.

Ein wesentliches Highlight des Projektes war der abschließende Projektworkshop, der am 26.04.2013 in Graz abgehalten wurde. Die Projektergebnisse konnten dabei mehr als 30 Teilnehmern aus 4 Nationen (Österreich, Deutschland, Schweiz, Slowenien) präsentiert werden. Das Publikum umfasste Vertreter von Filterherstellern, Biomasse-Kleinfeuerungsherstellern, Forschungsorganisationen aber auch der Legislative (Stadt, Länder). Als weitere Ergebnisverbreitungsaktivitäten sind die Teilnahme am Fachgespräch *Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen* (März 2013, Straubing, D) sowie die Einreichung eines Beitrages bei der kommenden Mitteleuropäischen Biomassekonferenz (Graz, Jänner 2014) zu nennen.

5 Ausblick und Empfehlungen

In Zukunft sollen in Europa deutlich niedrigere Emissionsgrenzwerte für Gesamtstaubemissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungen eingeführt werden. So schreibt die zweite Stufe der 1. BImSchV in Deutschland, die mit 2015 in Kraft treten soll, beispielsweise für Pelletkessel einen Grenzwert von 20 mg/Nm³ und für Scheitholzkaminöfen einen Grenzwert von 40 mg/Nm³ (jeweils bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol% O₂) vor. Die selben Grenzwerte sollen auch europaweit über die „codesign requirements for solid fuel boilers“ und die „codesign requirements for local space heaters“ eingeführt werden. Angesichts dieser sinkenden Grenzwerte hat in der jüngeren Vergangenheit ein steigendes Interesse an der Entwicklung und dem Einsatz von Elektrofiltern in Biomasse-Kleinfeuerungen eingesetzt. Die diesbezüglichen Filterentwicklungen fanden somit vorwiegend mit der Zielsetzung statt, mit Feuerungen, die schon vergleichsweise niedrige Emissionen aufweisen, durch Einsatz von Filtern die neuen verschärften Emissionsgrenzwerte gesichert einhalten zu können. Basis für die Entwicklungen waren somit zumeist Pellet- und Hackgutfeuerungen bzw. moderne Kaminöfen.

Betrachtet man jedoch die seit Jahren heftig diskutierten Probleme mit zu häufigen Überschreitungen der PM₁₀-Grenzwerten in der Umgebungsluft und analysiert die Feinstaubemissionsquellen, so wird offensichtlich, dass vor allem alte, feuerungstechnisch nicht ausgereifte Scheitholzkessel und Kaminöfen den überwiegenden Beitrag zu den Staubemissionen des Hausbrandes liefern. Um die Immissions-situation signifikant zu verbessern, müssen somit in erster Linie diese Emissionen reduziert werden. Kurzfristig ist dies nicht durch Substitution von Altanlagen durch Neuanlagen zu erreichen, da diese Maßnahme aus politischen, sozialen und wirtschaftlichen Gründen nicht entsprechend effizient und rasch umgesetzt werden kann. Einen möglichen Lösungsweg bildet die flächendeckende Nachrüstung von Altanlagen mit Partikelfiltern. Daher war es die Zielsetzung des Projektes, vielversprechende

Filtertechnologien für Biomasse-Kleinfeuerungen bezüglich ihrer Eignung für einen Einsatz in derartigen Feuerungen zu testen.

Wie bereits erwähnt, wurden die ausgewählten Filter für den Einsatz in Pellet- oder Hackgutfeuerungen entwickelt. Diese Feuerungen weisen einen sehr hohen technischen Standard auf, was sich vor allem in einem sehr guten Ausbrand (sehr niedrige CO und org.C-Emissionen) widerspiegelt. Daraus resultiert, dass die emittierten Stäube hauptsächlich aus anorganischen Verbindungen bestehen (Alkalimetallsalze und zu geringen Anteilen Schwermetalloxide). Wie auch in diesem Projekt gezeigt wurde, besteht bei alten Scheitholzkesseln hingegen das Problem, dass durch den unzureichenden Ausbrand sehr hohe CO und org.C-Emissionen auftreten. Dadurch enthält das Rauchgas einerseits eine erhöhte Fracht an organischen Aerosolen aber auch an kondensierbaren organischen Komponenten, die auf Filterflächen auskondensieren können. Anders ist die Situation bei Kaminöfen. Durch den chargenweisen Betrieb und den üblichen geometrischen Aufbau von Kaminöfen dominieren hier Rußpartikel die Feinstaubemissionen. Anorganische Partikel, organische Aerosole und Russpartikel weisen bezüglich ihres Verhaltens in E-Filtern unterschiedliche Eigenschaften auf, was auch die Untersuchungen im Rahmen des Projektes deutlich zeigten.

Eine grundsätzliche Erkenntnis des Projektes war, dass alle drei untersuchten Filter sehr gut für den Einsatz in Kombination mit modernen Pelletsfeuerungen und damit auch in Kombination mit modernen Hackgutfeuerungen geeignet sind und für derartige Applikationen hohe Feinstaub- und Gesamtstaubabscheidegrade von mehr als 75% erreicht werden können.

Die hohen Konzentrationen an kondensierbaren organischen Komponenten und an organischen Partikeln im Rauchgas alter Scheitholzkessel (speziell beim älteren untersuchten Modell) stellten für alle drei untersuchten Filter eine besondere Herausforderung dar. Am besten kam damit der *Elektrofilter 1* zu Rande, wenngleich auch bei diesem Filter eine reduzierte Filterspannung und einzelne Überschläge zu einer verminderten Abscheideleistung von durchschnittlich 55% für den Gesamtstaub führten. Der *Elektrofilter 3* zeigte bereits nach einer Woche so starke Verschmutzungen an den Elektroden und am Isolator, dass für einen weiteren Betrieb eine manuelle Abreinigung notwendig wurde. Die Gesamtstaubabscheideeffizienz sank auf 44%. Dem Filterhersteller wurden auf Basis der Projektergebnisse Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen, die hauptsächlich die Konfiguration des Isolators, die Hochspannungseinheit und das automatische Abreinigungssystem betreffen. Diese Maßnahmen befinden sich nach Wissensstand des Projektkonsortiums derzeit in Umsetzung. Der *Elektrofilter 2* zeigte sich für den Einsatz an alten Scheitholzkesseln als ungeeignet, da Spannungsüberschläge und Spannungseinbrüche zu vergleichsweise niedrigen Abscheideraten führten.

Der Einsatz der Filter an Kaminöfen (stark rußhaltige Emissionen) stellte die Filter vor ein weiteres Problem. Der *Elektrofilter 1* zeigte sehr gute Abscheideeffizienzen für Feinstaubpartikel (>70%). Der *Elektrofilter 3* hingegen zeigte stark schwankende Feinstaubabscheideeffizienzen zwischen 20 und 89% wobei die Mittelwerte mit 69% und 56% (Kaminöfen 1 und 2) zwar vergleichsweise niedrig aber in einem akzeptablen Bereich waren. Bei beiden Filtern traten jedoch Probleme mit Wiederaufwirbelungen von Rußpartikeln auf. Rußpartikel bilden auf Grund ihrer guten Leitfähigkeit sehr lockere Beläge an den Filteroberflächen. Agglomerate von abgeschiedenen Aerosolen lösen sich immer wieder von den Oberflächen ab und werden mit dem Rauchgas ausgetragen. Es kommt somit zu einer deutlichen

Reduktion der Abscheideeffizienz für den Gesamtstaub, der nach wie vor der gesetzlich geregelte Parameter ist. Dieses Problem, das die Eignung der Filter für den Feldeinsatz in Frage stellt, wurde mit den Filterherstellern diskutiert. Mehrere konstruktive Gegenmaßnahmen befinden sich derzeit in Umsetzung.

Wie das Projekt gezeigt hat, ist am Gebiet der (Fein)Staubabscheider für Biomasse-Kleinfeuerungen, obwohl bereits Produkte am Markt angeboten werden, immer noch Bedarf an F+E-Arbeiten gegeben. Dies betrifft vor allem die Optimierung und Adaptierung der Konzepte für einen Einsatz in Altanlagen. Hier gilt es speziell Probleme mit der Filterstabilität bei Betrieb mit Rauchgasströmen mit hohen org.C-Beladungen sowie Probleme mit dem Austrag bereits abgeschiedener Rußpartikel bei Kaminöfen zu lösen.

Neben den diesbezüglichen F+E-Arbeiten sollte besonderes Augenmerk auf die Durchführung von Langzeittests an Feldanlagen samt der notwendigen Begleitforschung gelegt werden. Am Teststand haben die untersuchten Filter prinzipiell gezeigt, dass sie über mehrere Wochen betrieben werden können. Es muss aber noch nachgewiesen werden, dass die Standfestigkeit der Elektronik und der mechanischen Bauteile über eine gesamte Heizsaison und darüber hinaus gegeben ist. Deshalb wären Langzeittests, während dieser einerseits in gewissen Abständen die Abscheideeffizienz überprüft wird und andererseits über einen ausreichend langen Zeitraum (eine Heizsaison) die Filterstabilität, Ausfallsicherheit und Filterverfügbarkeit an Hand von Betriebsdatenaufzeichnungen und Betriebsdatenauswertungen geprüft werden, von besonderer Relevanz.

Ein wesentlicher Aspekt, der auch in diesem Projekt bearbeitet wurde, ist die Messtechnik und Prüfmethodik zur Bewertung der Abscheideeffizienz von Elektrofiltern. Hier besteht dringender Forschungsbedarf bezüglich zweier Aspekte, nämlich der Staubmessung selbst und der Filterprüfmethodik. Bezüglich der Entwicklung einer neuen europäischen Staubemissionsmessmethode für Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen ist derzeit ein europäisches Verbundprojekt, das Projekt EN-PME-Test im Gange. Ziel des Projektes, an dem auch der Projektpartner BE2020 beteiligt ist, ist es, eine gemeinsame europäische Staubmessmethode zu entwickeln, die auch bei Feuerungen mit hohen Anteilen an organischen Aerosol- und Rußemissionen korrekte und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Wesentliche Elemente der in diesem Projekt angewendeten Methodik, wie die Berücksichtigung der Probenahmetemperatur und des Temperaturverlaufes über die Probenahmestrecke, wurden von BE2020 in die Methodenentwicklung im Zuge von EN-PME-Test bislang mit eingebracht. Die im Rahmen von EN-PME-Test entwickelte Methode soll auch bzgl. ihrer Einsetzbarkeit für die Bewertung von Staubabscheidern getestet und evaluiert werden. Hinsichtlich der Entwicklung einer Prüfmethode für die Abscheideeffizienz von E-Filtern in Biomasse-Kleinfeuerungen sind derzeit erste Arbeiten in Deutschland im Gange. Hier besteht noch dringender Begleitforschungsbedarf, da im neu zu entwickelnden Prüfverfahren eine große Bandbreite möglicher Betriebsfälle an Alt- und Neuanlagen realistisch an einem Prüfstand abgebildet werden muss. Diese Arbeiten sind besonders wichtig, da sie in Zukunft eine gute Vergleichbarkeit einzelner Filter auf Basis standardisierter Tests mit realem Hintergrund sicherstellen sollen.

6 Literaturverzeichnis

1. OBERNBERGER I. (ed), BRUNNER T., (ed), 2005: Aerosols in Biomass Combustion – Formation, Characterisation, Behaviour, Analysis, Emissions, Health Effects, book series "Thermal Biomass Utilization", Volume 6, ISBN 3-9501980-2-4, published from BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz, Austria
2. GAEGAUF C.K., SCHMID M.R., GÜNTERT P.: Elemental and organic carbon in flue gas particles of various wood combustion systems. In Proceedings 8th International Conference on Energy for a Clean Environment, Lisbon; 2005
3. HARTMANN H., ELLNER-SCHUBERTH F., TUROWSKI P., LENZ V., GERTH J.: Quantification and Characterisation of Particle Emissions from Residential Wood Stoves and Boilers. In: Proceedings 16th European Biomass Conference & Exhibition - from Research to Industry and Markets, Conference in Valencia, Spain, 2-6 June 2008. ETA-Florence Renewable Energies, Italy; 2006: 1451-1457
4. JOHANSSON L.S., LECKNER B., GUSTAVSSON L., COOPER D., TULLIN C., POTTER A.: Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. Atmospheric Environment 2004, 38:4183-4195
5. JOHANSSON L.S., LECKNER B., GUSTAVSSON L., COOPER D., POTTER A., TULLIN C., NERNTSEN M.: Particle emissions from residential biofuel boilers and stoves – old and modern techniques. In Proceedings of the International Seminar "Aerosols in Biomass Combustion", March 2005, Graz, Austria, book series "Thermal Biomass Utilization", Volume 6, ISBN 3-9501980-2-4, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH, Graz, Austria (ed.); 2005: 145-150
6. NUSSBAUMER T., LAUBER A., 2010: Formation mechanisms and physical properties of particles from wood combustion for design and operation of electrostatic filter. In: Proc. of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, May 2010, Lyon, France, ISBN 978-88-89407-56-5, pp. 1219-1227, ETA-Florence Renewable Energies (Ed.), Lyon, France

IMPRESSUM

Verfasser

Bioenergy 2020+ GmbH
Inffeldgasse 21b, 8010 Graz
Tel.: ++43 (0) 316 873 9201
Fax.: ++43 (0) 316 873 9202
E-Mail: office@bioenergy2020.eu
Web: www.bioenergy2020.eu

Projektpartner

BIOS Bioenergiesysteme GmbH
Inffeldgasse 21b, 8010 Graz
Tel.: ++43 (0) 316 481 300
Fax.: ++43 (0) 316 481 300 4
E-Mail: office@bios-bioenergy.at
www.bios-bioenergy.at

AutorInnen

Ingwald Obernberger (Projektleiter)
Thomas Brunner
Friedrich Biedermann

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH