



Berichte aus dem TFZ

Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen



Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen



Untersuchung der Praxis- tauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinf Feuerungsanlagen

Endbericht zum Projektteil des TFZ

Heike Oehler
Peter Turowski
Dr. Hans Hartmann

Berichte aus dem TFZ 38

Straubing, März 2014

Titel: Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinf Feuerungsanlagen

Autoren: Dipl.-Ing. Heike Oehler
Dipl.-Ing. agr. Peter Turowski
Dr. Hans Hartmann

Weitere Mitarbeiter: Stephan Winter
Benedikt Haas
Jens Enke
Tina Nürnberger
Ferdinand Lex

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie im Rahmen des Förderprogramms BayTP gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2015
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

ISSN: 1614-1008

Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing

E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de

Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: H. Oehler

Erscheinungsjahr: 2015

Gestaltung: H. Oehler

Fotonachweis: Spanner Re² (1), H. Oehler
Titelbild: Elektrodenhalterung eines Rohr-Elektrofilters mit Staubablagerungen

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis.....	9
1 Einführung und Zielstellung.....	11
2 Methodisches Vorgehen.....	13
2.1 Aufbau des Versuchsstandes	13
2.1.1.1 Messungen im Feld	15
2.1.1.2 Messungen am Prüfstand.....	17
2.2 Versuchsdurchführung.....	19
2.2.1 Versuchsablauf.....	19
2.2.1.1 Messungen im Feld	19
2.2.1.2 Messungen am Prüfstand.....	19
2.2.2 Versuchsplan	20
2.2.2.1 Messungen im Feld	20
2.2.2.2 Messungen am Prüfstand.....	21
2.2.3 Versuchsbrennstoffe.....	23
2.2.4 Versuchsauswertung	24
3 Ergebnisse	25
3.1 Ergebnisse der Feldmessungen	25
3.1.1 Messung der Abgastemperatur	25
3.1.2 Messung der Abgasgeschwindigkeit	26
3.1.3 Messung der Staubbeladung.....	27
3.1.4 Messung der gasförmigen Abgasemissionen	28
3.1.5 Betriebsverhalten des Staubabscheiders	29
3.2 Ergebnisse der Messungen am Prüfstand.....	31
3.2.1 Messung der Abgastemperatur	31
3.2.2 Messung der Abgasgeschwindigkeit	32
3.2.3 Messung der Staubbeladung.....	33
3.2.4 Messung der gasförmigen Abgasemissionen	38
3.2.5 Betriebsverhalten des Staubabscheiders	39
Zusammenfassung	42
Quellenverzeichnis	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizzierter Aufbau des Spanner-Elektroabscheiders SFF 100	14
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen während der Feldmessungen (alle Angaben in mm).....	16
Abbildung 3:	Abbildungen des Versuchsaufbaus während der Feldmessungen (links: Rohgasmessung; rechts: Roh- und Reingasmessung vor und nach dem Abscheider).....	16
Abbildung 4:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen für die Vergleichsmessungen am TFZ-Prüfstand (alle Angaben in mm)	18
Abbildung 5:	Abbildung des Versuchsaufbaus für die Vergleichsmessungen am TFZ-Prüfstand.....	18
Abbildung 6:	Ergebnisse der Temperaturmessung während der Feldmessungen	26
Abbildung 7:	Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung während der Feldmessungen	27
Abbildung 8:	Ergebnisse der Staubmessungen während der Feldmessungen.....	28
Abbildung 9:	Ergebnisse der erfassten gasförmigen Abgaskomponenten während der Feldmessungen	29
Abbildung 10:	Betriebsverhalten des Elektroabscheiders während einer Feldmessung (M1–M3: je 30-minütige Einzelmessungen während des Messtages)	30
Abbildung 11:	Vergleich zwischen unbeladenen Hochspannungs- und Abscheideelektroden (ganz links und links) und mit Staubfracht beladenen ungereinigten Hochspannungs- und Abscheideelektroden (rechts und ganz rechts)	30
Abbildung 12:	Ergebnisse der Temperaturmessung während der Messungen im Prüfstand	32
Abbildung 13:	Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung während der Messungen im Prüfstand.....	33
Abbildung 14:	Gesamtstaub und Abscheidegrade während der Messungen im Prüfstand	34
Abbildung 15:	Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Messpositionen "Rohgas", "Reingas 1" sowie "Reingas 2" während der Messungen im Prüfstand	35
Abbildung 16:	Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Kaltstart und Kessel-Regelbetrieb während der Messungen im Prüfstand	36
Abbildung 17:	Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Regelbetrieb und Abscheider außer Betrieb während der Messungen im Prüfstand	37

Abbildung 18: Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Regelbetrieb und Kessel-Ausbrand während der Messungen im Prüfstand 38

Abbildung 19: Ergebnisse der erfassten gasförmigen Abgaskomponenten während der Messungen im Prüfstand 39

Abbildung 20: Betriebsverhalten des Elektroabscheiders während der Messungen im Prüfstand (M1–M10: Messdauer eines Messtages mit je 6 durchgeführten Einzelmessungen) 40

Abbildung 21: Vergleich zwischen unbeladenen Hochspannungs- und Abscheideelektroden (links: Blick von unten auf Abscheideelektroden; Mitte: Blick in den Einströmbereich des Abgases und auf Isolator; rechts: Blick in Abscheideelektroden von unten) 41

Abbildung 22: Vergleich zwischen mit Staubfracht beladenen ungereinigten Hochspannungs- und Abscheideelektroden (oben links: Blick in Abscheideelektroden von unten; oben Mitte: Blick in den Einströmbereich des Abgases und auf Isolator; oben rechts und unten: Blick auf Abscheideelektroden von oben)..... 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Varierte Versuchsparameter während der Feldmessungen	21
Tabelle 2:	Varierte Versuchsparameter während der Messungen am Prüfstand.....	22
Tabelle 3:	Übersicht über die eingesetzten Versuchs Brennstoffe (TM ... Trockenmasse)	23
Tabelle 4:	Vergleichende Übersicht über die erzielten Mittelwerte aus den Messwerten am Feldstandort und am Prüfstand, unterschieden zwischen Nenn- und Teillast (Bm ³ ... Betriebskubikmeter)	43

1 Einführung und Zielstellung

Bedingt durch die gesundheitlich problematischen Auswirkungen hoher partikulärer Emissionen aus der Verbrennung biogener Festbrennstoffe wurden in den letzten Jahren strengere Emissionsgrenzwerte erlassen. Diese Werte sind in der 2010 novellierten Fassung der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1.BImSchV) [1] festgelegt. Für Staubemissionen beträgt der Grenzwert für mit Holzhackschnitzeln betriebene Kesselanlagen bei Errichtung der Anlage bis zum 31.12.2014 $0,1 \text{ g/Nm}^3$ und bei Errichtung ab dem 01.01.2015 $0,02 \text{ g/Nm}^3$. Für jede Kesselanlage muss die Einhaltung der Grenzwerte sichergestellt werden. Dies geschieht sowohl vor der Zulassung der Feuerungsanlage zum Vertrieb während einer Typenprüfung im Labor als auch im zweijährigen Rhythmus durch den Kaminkehrer im laufenden Anlagenbetrieb. Gegenwärtig herrscht jedoch eine große Unsicherheit, ob die festgelegten Grenzwerte auch im Praxisbetrieb zuverlässig eingehalten werden können. Daher wird der Einsatz einer der Feuerung nachgeschalteten Einrichtung zur Abgasreinigung von vielen Anlagenherstellern als eine vielversprechende Option betrachtet, die Staubemissionen zuverlässig und langfristig unter den Grenzwert zu reduzieren.

Es hat sich allerdings gezeigt, dass eine große Diskrepanz besteht zwischen den optimal angepassten Messeinrichtungen und -aufbauten im Prüfstand und den gegebenen Bedingungen im Praxiseinsatz. Für die Bewertung der Effizienz und des Betriebsverhaltens von Staubabscheidern sind daher vergleichende Untersuchungen in realitätsnahen Feld- und in Prüfstandsmessungen notwendig.

2 Methodisches Vorgehen

Die im Rahmen des Projektes vom TFZ durchgeführten Feldmessungen fanden verteilt über mehrere Wochen am Standort des Anlagenherstellers HDG Bavaria GmbH statt. Dabei wurden das Betriebsverhalten sowie die erreichbare Abscheideeffizienz eines elektrostatischen Abscheiders der Firma Spanner Re² GmbH im Praxiseinsatz an einem automatisch beschickten Hackschnitzelkessel mit einer Leistung von 100 kW getestet.

Zur Bewertung des Abscheiderverhaltens unter Labor- bzw. unter anspruchsvollen Betriebsbedingungen wurden außerdem Messungen im Feuerungsprüfstand des TFZ durchgeführt. Diese Referenzmessungen fanden an einem baugleichen Hackschnitzelkessel mit 100 kW Nennleistung statt und umfassten insbesondere die Einflüsse verschiedener Laststufen sowie Brennstoffarten und -qualitäten. Betrachtet wurden auch hierbei neben der Abscheideleistung verschiedene Aspekte des Betriebsverhaltens, wie beispielsweise Reinigungs- und Wartungsaufwand und -häufigkeit, Energiebedarf, Langzeitverhalten sowie Anfälligkeit gegenüber Störungen. Weiterhin sollten Erfahrungen in Umgang und Bedienung der Technologie gesammelt werden.

2.1 Aufbau des Versuchsstandes

Sowohl während der Feld- als auch während der Prüfstandsmessungen wurde als Abgasquelle mit möglichst gleichmäßiger Staubbeladung der Kessel HDG Compact 100 der Firma HDG Bavaria GmbH verwendet, ein automatisch beschickter Hackschnitzelkessel mit Unterschubrost und einer Nennwärmeleistung von 100 kW.

In dem elektrostatischen Staubabscheider SFF 100 der Firma Spanner Re² GmbH wurde das staubbeladene Abgas über eine Umlenkung in die Abscheidekammer geleitet und durch 12 als geerdete Niederschlagselektroden fungierende Rohre (Länge: 1000 mm, Durchmesser: 100 mm) geführt. Durch Leitbleche am Gaseintritt wurde eine homogene Anströmung realisiert. Als Sprühelektroden wirkten 12 zentral durch die Abscheideelektroden geführten Drähte (Länge: 1220 mm, Edelstahl). Eine Ummantelung des Abscheiders mit Steinwolle bzw. mit Dichtmaterial diente der thermischen Isolierung. Aufbau und Konfiguration des verwendeten Abscheiders sind in Abbildung 1 dargestellt.

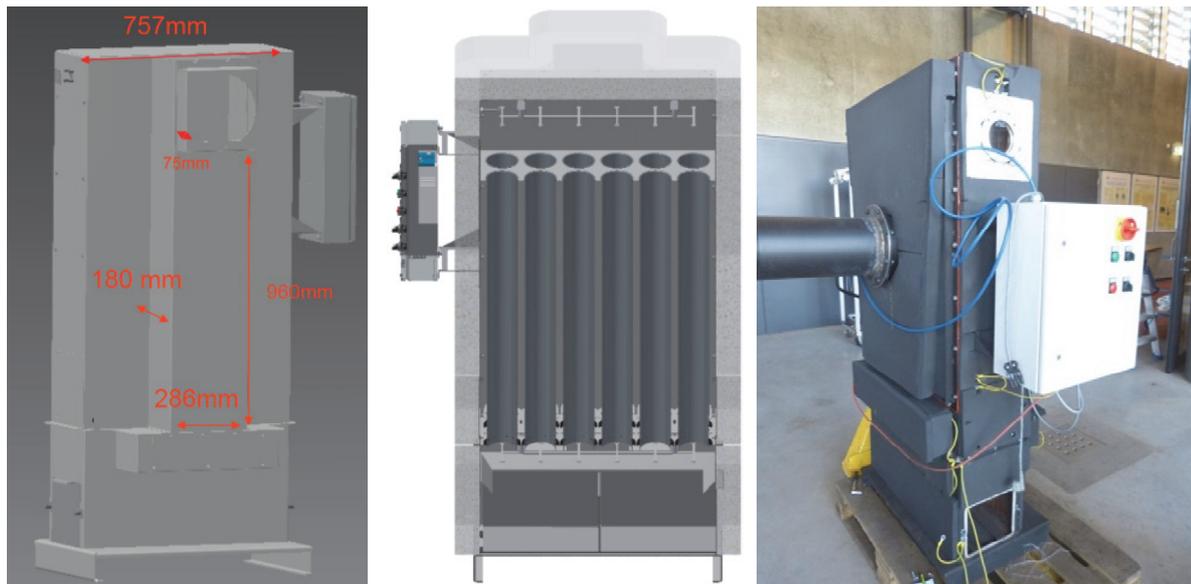


Abbildung 1: Skizzierter Aufbau des Spanner-Elektroabscheiders SFF 100

Die ursprüngliche Konfiguration des Schaltkastens umfasste zwei 120 W-Netzteile, welche im Laufe der Messkampagnen ersetzt wurden durch ein 400 W-Netzteil. Die anliegende Spannung betrug während aller Messungen ca. 16 kV. Aus Untersuchungen zu Beginn der Feldversuche ergab sich, dass dieser der maximal mögliche Wert war, bei dem ein stabiler Betrieb ohne häufig auftretende Spannungsüberschläge gewährleistet werden konnte.

Der Betriebszustand des Abscheiders wurde sowohl während der Feld- als auch der Prüfstandsmessungen im 60-Sekunden-Intervall mit einem Datenlogger Almemo 5690-2M09 des Herstellers Ahlborn aufgezeichnet. Dokumentiert wurden dabei die vom Netzteil des Abscheiders aufgegebene Spannung, die aktuelle Stromstärke sowie die verbrauchte elektrische Leistung.

Die Messungen wurden nach standardisierten Verfahren, dokumentiert in den jeweiligen DIN-Normen und VDI-Richtlinien, durchgeführt. Die Aufzeichnung aller Werte fand im 60-Sekundentakt statt. Jede Messung umfasste die kontinuierlich über den gesamten Zeitraum durchgeführte Analyse wichtiger Abgaskomponenten, die Erfassung der Umgebungs- und der Abgastemperaturen mittels Typ K-Thermoelementen im Rohgas vor sowie im Reingas nach dem Abscheider sowie die Messung der Abgasgeschwindigkeit. Diskontinuierlich erfolgte die gravimetrische Bestimmung der Staubgehalte parallel in Roh- und Reingas. Die Staubmessung wurde dabei entsprechend den Vorgaben der VDI 2066-1 [2] durchgeführt und beinhaltete das Erfassen des Hauptvolumenstromes, die isokinetische Entnahme und Bestimmung eines Teilvolumenstromes sowie die Wägung der aufgefangenen Staubmasse. Pro Messung erfolgten mindestens 3 Versuche über je 30 min Dauer.

2.1.1.1 Messungen im Feld

Die Herausforderung bei den Feldmessungen an bestehenden Anlagen und in installierten Abgasführungen besteht darin, die notwendigen Messstellen optimal an die lokalen Gegebenheiten anzupassen, da die geeigneten Messplätze womöglich nicht zur Verfügung stehen und eine bauliche Anpassung nicht realisierbar ist. Daher lassen sich bei der Anpassung der Messstrecke im Nachhinein eventuell verschiedene Einschränkungen bezüglich der geforderten Ein- und Auslaufstrecken in der Messstellenanordnung nicht vermeiden. Dies kann dazu führen, dass sich kein stabiles Strömungsprofil ausbilden kann, wodurch lokale Schwankungen der Abgasgeschwindigkeit oder Konzentrationsgradienten von Messkomponenten auftreten können. Größere Unsicherheiten und höhere Abweichungen in den Messergebnissen müssen daher in Betracht gezogen werden.

So wird für die Bestimmung der gravimetrischen Staubmenge in der entsprechenden Norm VDI 2066-1 [2] ein gerader Messabschnitt gefordert mit einer Einlaufstrecke von 5 hydraulischen Durchmessern (5D) und einer Auslaufstrecke hinter dem Messquerschnitt von 2D bei einem Abstand von mindestens 5D bis zum Ende des Abgaskanals. Bevorzugt sollten die Messstellen im vertikalen Abgasstrang angeordnet sein. Während der Messungen im Feld war es jedoch, bedingt durch die vorhandenen Aufbauten, nicht möglich, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Abgas-Messstrecke an dem Feldstandort bestand aus einem unisolierten Schwarzeisenrohr mit einem Nenndurchmesser von 225 mm. Während der Feldmessungen wurde im horizontalen Abgasweg ein Teilstrom des Abgases entnommen und den Gasanalysatoren (vgl. Abbildung 2: „Gasanalyse“) zugeführt. Diese umfassten ein Flammenionisationsdetektor (FID) zur Messung der flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffe (Gesamt-C) sowie ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) zur Bestimmung der Gehalte von Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Stickoxiden (NO, NO₂, N₂O etc. angegeben als NO_x), Wasserdampf (H₂O), Methan (CH₄), Salzsäure (HCl) und Schwefeldioxid (SO₂). Die Erfassung von Wasserdampf und Kohlendioxid erfolgte als prozentualer Wert (in %), die weiteren Komponenten wurden erfasst als relative Konzentration (in ppm). Der Anteil an Sauerstoff (O₂) wurde über den CO₂-Gehalt berechnet.

Der Gas-Messposition nachgeschaltet erfolgte die isokinetische Staubprobenahme in einem ansteigenden Bereich des Abgasstranges. Anschließend wurde das Abgas durch den Elektroabscheider geleitet. Im horizontalen Abgasstrang nach dem Abscheider befand sich die Reingas-Staubprobenahme (ebenfalls mit isokinetischer Absaugung). Verdeutlicht ist der beschriebene Aufbau in der Skizze in Abbildung 3.

Bedingt durch die begrenzten Gegebenheiten war die Implementierung einer weiteren Messstelle zur kontinuierlichen Erfassung der Abgasgeschwindigkeit nicht möglich. Daher wurden die Geschwindigkeiten im Roh- und Reingas einmalig vor Versuchsbeginn über einen Zeitraum von ca. 5 min an der Staubmessstelle gemessen, sobald sich der Kessel in einem stabilen Betriebszustand befand. Die so erfassten Werte wurden während der Messung anschließend konstant gehalten. Über einen Wärmemengenzähler

konnte die gelieferte Wärmemenge des Kessels während den einzelnen Messungen erfasst werden.

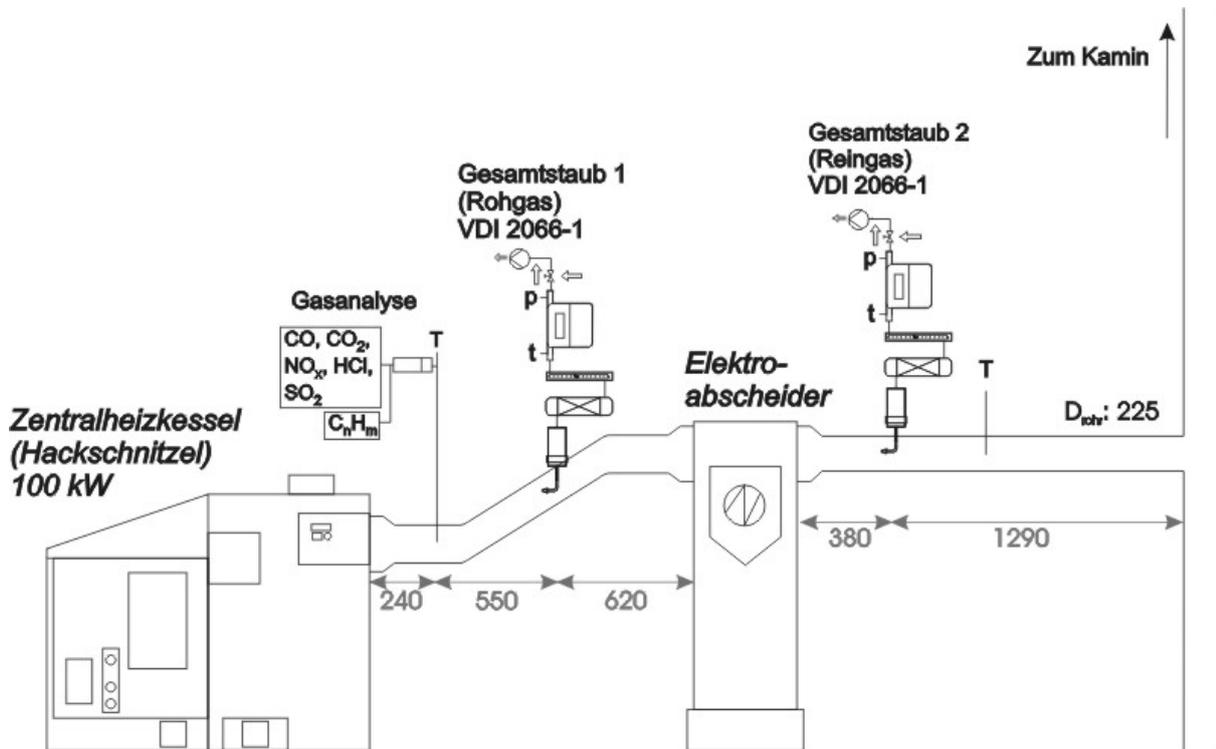


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen während der Feldmessungen (alle Angaben in mm)



Abbildung 3: Abbildungen des Versuchsaufbaus während der Feldmessungen (links: Rohgasmessung; rechts: Roh- und Reingasmessung vor und nach dem Abscheider)

2.1.1.2 Messungen am Prüfstand

Bei der Messstrecke im Prüfstand handelt es sich um eine Neuerrichtung, bei deren Planung bereits die notwendigen Anforderungen für einen normgerechten Aufbau beachtet werden konnten. Eingesetzt wurde ein aus Schwarzstahl gefertigtes Abgasrohr mit einem Nenndurchmesser von 200 mm, welches mit einer ca. 50 mm dicken Ummantelung aus Glaswolle isoliert war.

Das Rauchgas wurde zunächst horizontal von der Feuerung zu dem Abscheider geführt. Auf diesem Wegstück wurde am Ausgang des Kessels die Abgastemperatur sowie der Förderdruck im Abgas erfasst. Anschließend wurde dem Abgas ein geringer Teilstrom entnommen und der Gasanalyse (vgl. Abbildung 4: „Gasanalyse“) zugeführt. Über einen paramagnetischen Analysator (PMA) wurde dabei der Sauerstoffgehalt (O_2) im Abgas gemessen. Die Bestimmung der flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffe (Gesamt-C) erfolgte über einen Flammenionisationsdetektor (FID). Zur Messung der im Abgas enthaltenen Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Stickoxiden (NO, NO_2 , N_2O etc. angegeben als NO_x), Wasserdampf (H_2O), Methan (CH_4), Salzsäure (HCl) und Schwefeldioxid (SO_2) wurde ein Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer (FTIR) verwendet. Die Erfassung von Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid erfolgte als prozentualer Wert (in %), die weiteren Komponenten wurden erfasst als relative Konzentration (in ppm).

An der folgenden Messstelle wurde zur Bestimmung der Staubmenge aus dem Abgasstrom über eine Staubsonde und Staubabsaugung ein Teilstrom isokinetisch entnommen (vgl. Abbildung 5: „Gesamtstaub 1, Rohgas 1“). Vor Eintritt in den Abscheider wurden über die gesamte Versuchszeit die Temperatur gemessen sowie die Abgasgeschwindigkeit berechnet aus dem mit einem Prandtl-Staurohr erfassten dynamischen Druck und den Messgrößen Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur.

Anschließend wurde der Abgasstrom durch den Partikelabscheider geleitet. Aufgrund der verfügbaren Platzverhältnisse und der notwendigen Anpassung an die vorhandene Abgasabsaugung war eine 90° -Umlenkung des Abgasstranges in eine vertikale Luftführung unvermeidlich.

Parallel zu der Messung im Rohgas wurde die Staubbiladung im Reingas ebenfalls an zwei Messstellen erfasst (vgl. Abbildung 4: „Gesamtstaub 2 und 3“). An diesen Positionen wie auch am Abgasaustritt des Abscheiders wurde die Abgastemperatur gemessen. Die Abgasgeschwindigkeit wurde mit einem Flügelradanemometer nach der ersten Reingas-Staubmessung bestimmt. Durch die Erfassung der Abgasgeschwindigkeit an zwei Positionen sollten eventuell auftretende Abweichungen eines Messgerätes schnell verifiziert werden können. Abbildung 5 gibt einen Überblick über den Aufbau der Messstrecke und die Messstellenanordnung.

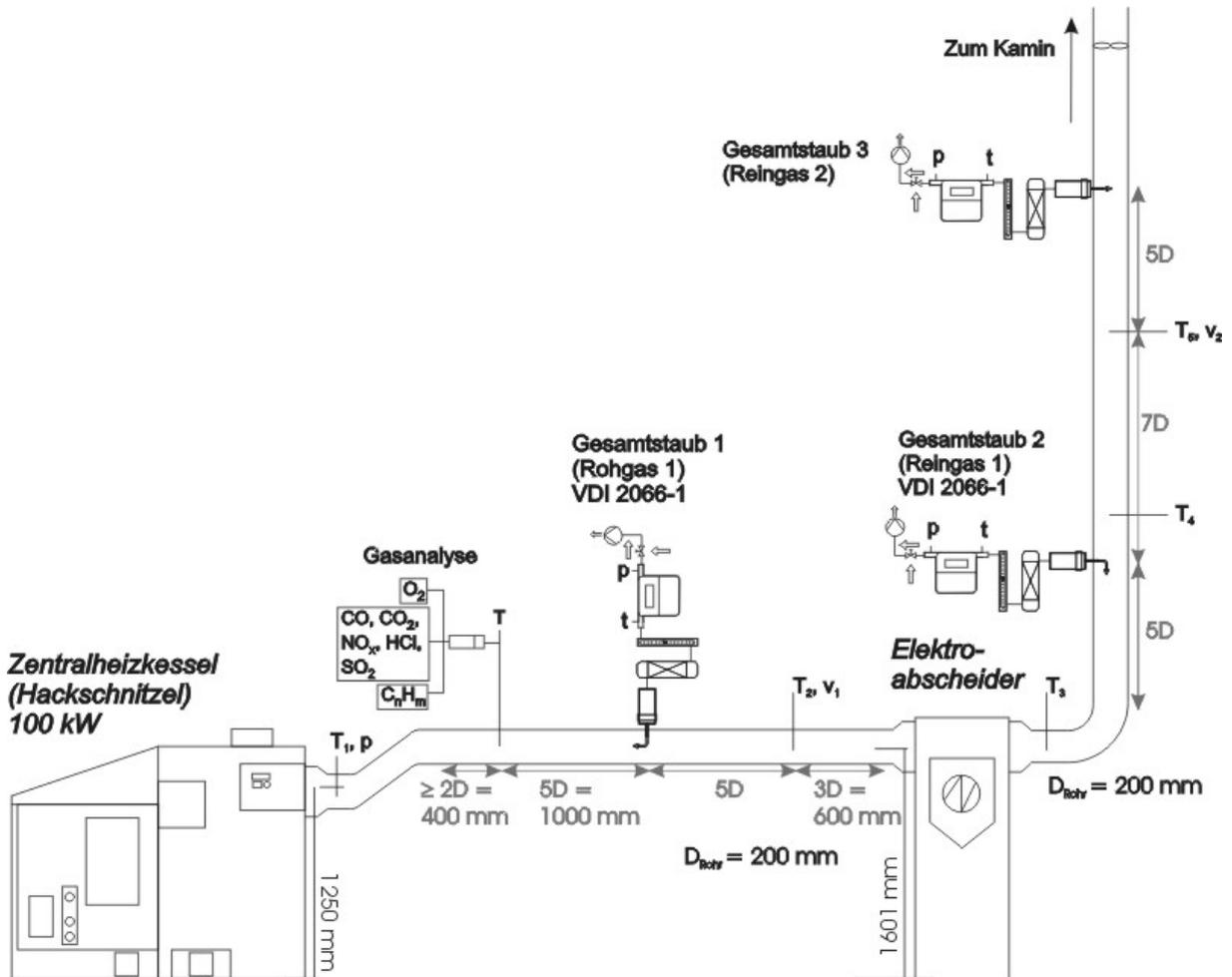


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und der Messstellen für die Vergleichsmessungen am TFZ-Prüfstand (alle Angaben in mm)



Abbildung 5: Abbildung des Versuchsaufbaus für die Vergleichsmessungen am TFZ-Prüfstand

Zusätzlich zu den Prozessgrößen konnten während der Messungen im Prüfstand auch verschiedene Betriebsparameter der Feuerung kontinuierlich aufgezeichnet werden. So wurde der jeweilige Lastbereich erfasst über die abgegebene Wärmeleistung der Feuerung an eine Wärmeleistungsmessstrecke bei konstantem und einheitlichem Kühlwasserdurchfluss während aller Messungen im gleichen Lastbetrieb. Weiterhin dokumentiert wurden die Vor- und Rücklauftemperaturen in dem Wasserkreislauf zur Wärmeabnahme, der Brennstoffverbrauch durch Positionierung des Brennstoffbehälters auf einer Waage sowie die Anlagenfunktionen bzw. auftretende Betriebsstörungen während der Versuche.

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Versuchsablauf

Die gasförmigen Emissionen wurden über den gesamten Versuchszeitraum bestimmt und aufgezeichnet. Die Staubemissionen der Feuerungsanlage wurden gemäß VDI 2066-1 in drei aufeinanderfolgenden, 30-minütigen Probenahmen gravimetrisch bestimmt. Die Erfassung erfolgte bei isokinetischer Absaugung parallel und unabhängig voneinander jeweils im Roh- und im Reingas, d. h. vor bzw. nach dem Abscheider. Auf diese Weise konnte ein repräsentativer Mittelwert für jede Messposition gebildet werden. Durchgeführt wurden die Messungen, sobald sich der Kessel in einem stabilen kontinuierlichen Dauerbetriebszustand mit konstanten Abgastemperaturen befand und die Staubsonden über Heizmanschetten auf die Abgastemperatur aufgeheizt wurden. Stabile Bedingungen herrschten meist ca. 60 min bis 90 min nach dem Zünden des Kessels.

Im Anschluss an die Versuche eines Messtages wurden die Staubprobenahmesonden gespült mit Aceton und vollentsalztem Wasser und die aufgefangenen Flüssigkeiten durch Abdampfen getrocknet. Die Ablagerungen in den einzelnen Sonden konnten so in der Auswertung der im Abgas enthaltenen Staubemissionen mit betrachtet werden.

2.2.1.1 Messungen im Feld

Während der Messungen im Feld wurden die Betriebsparameter des Kessels von Mitarbeitern des Projektpartners HDG Bavaria GmbH für einen stabilen Betrieb im gewünschten Lastbereich gewählt und gegebenenfalls angepasst.

2.2.1.2 Messungen am Prüfstand

Nach der Inbetriebnahme des Kessels und des Elektroabscheiders im Prüfstand mit der Überprüfung der ordnungsgemäßen Anlagenfunktionen wurden im Rahmen von Vorversuchen die notwendigen Einstellungen des Kessels getestet, um die gewünschten Betriebswerte mit den Versuchsbrennstoffen sicher zu erreichen.

In den kesselinternen Parametern wurde als Zielgröße ein stabiler Betrieb im gewünschten Lastbereich gewählt (ca. 50 kW entsprechen Teillastbetrieb, ca. 92 kW entsprechen Nennlastbetrieb). Angepasst wurden dafür insbesondere die Minimal-, Maximal- und

Sollwerte der Brennraumtemperatur, die Kesselvorlauf- und -rücklauf-temperatur sowie die minimal und maximal zu fördernde Brennstoffmenge.

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, wurde der Staubgehalt im Reingas nach dem Abscheider an zwei Positionen bestimmt. Dabei fand die erste gravimetrische Parallelmessung an der Position „Reingas 1“ unter isokinetischen Bedingungen statt und entsprach den Vorgaben der VDI 2066-1. Im Gegensatz dazu wurde in einer weiteren Parallelmessung („Reingas 2“) die Orientierung der Sonde zur Staubentnahme geändert, sodass diese nicht in den Volumenstrom geführt wurde, sondern ohne einen 90°-Krümmer in den Strom gerichtet wurde und sich daher in einem Winkel von 90° zur Strömungsrichtung des Volumenstroms befand. Der Vergleich zwischen diesen Düsenorientierungen sollte eine qualitative Unterscheidung zwischen unterschiedlichen aerodynamischen Durchmessern von Staubpartikeln erlauben, da große Partikel trägheitsbedingt nicht mit erfasst werden und die erwarteten Staubemissionen daher geringer sind.

Die Messungen im Prüfstand umfassten zusätzliche Staubmessungen während des Kaltstart- sowie während des Ausbrandbetriebs. Dabei wurde die Messung zu Betriebsbeginn jeweils nach dem Befüllen der Brennkammer und dem Zünden des Kessels gestartet sobald ein sichtbares Flammenbild in der Brennkammer festgestellt wurde. Nach beendeter Brennstoffzufuhr fand die Ausbrandmessung statt, während der verbliebene Brennstoff in der Brennkammer noch umgesetzt wurde. Mit diesen Messungen sollten das Verhalten und die Abscheideleistung des Elektroabscheiders während besonders kritischer, instabiler Betriebszustände mit potenziell hohen Abgasemissionen untersucht werden. Als Vergleichswert wurde ebenfalls am Prüfstand die Blindleistung des Abscheiders erfasst, indem Staubmessungen bei außer Betrieb gesetztem Abscheider durchgeführt wurden.

2.2.2 Versuchsplan

Um das Verhalten des Abscheiders unter definierten Betriebsbedingungen zu bestimmen und über einen längeren Zeitraum zu bewerten, wurde ein Versuchsplan erstellt, der insbesondere verschiedene Lastzustände des Kessels und ausgewählte Brennstoffe über mehrere Wochen betrachtet. Dadurch sollte eine Vielzahl möglicher Einfluss- und Störgrößen abgedeckt werden können, um die teilweise dynamischen und instabilen Betriebszustände der Feuerung praxisnah abbilden zu können.

2.2.2.1 Messungen im Feld

Die Messungen am Feldversuchsstandort dienten der Einschätzung des potenziellen Abscheideverhaltens und der erreichbaren Ergebnisse im Praxiseinsatz während des Langzeitbetriebs. Weiterhin wurden der Einfluss verschiedener Netzteile, der Beladungszustand der geerdeten Abscheideelektroden sowie das Abscheideverhalten bei unterschiedlichen Lastzuständen des Kessels betrachtet. Bezüglich der mit abgeschiedenem und angelagertem Staub beladenen Abscheideelektrode wurde dabei unterschieden zwischen dem „Abrütteln“ über den manuell vor Versuchsbeginn für ca. 10 Sekunden

betätigten Reinigungsaktuator, welcher die Abscheideelektroden in Schwingung versetzt, und dem zusätzlichen manuellen Abkehren der einzelnen Abscheideelektroden-Rohre mithilfe einer Kaminkehrer-Bürste. Die konkreten Versuchsparameter sind in der folgenden Tabelle 1 vergleichend gegeneinander aufgetragen. Die Feldmessungen wurden im zweiwöchentlichen Rhythmus durchgeführt zwischen 29. Mai 2013 und 06. August 2013.

Tabelle 1: Variierte Versuchsparameter während der Feldmessungen

Versuch	Netzteil	Beladungszustand Abscheideelektrode	Lastbereich Kessel
Test 1	2 x 120 W	Gekehrt und abgerüttelt	Nennlast
Test 2	2 x 120 W	Abgerüttelt	Nennlast
Test 3	1 x 400 W	Gekehrt und abgerüttelt	Nennlast
Test 4	1 x 400 W	Abgerüttelt	Nennlast
Test 5	1 x 400 W	Gekehrt und abgerüttelt	Teillast
Test 6	1 x 400 W	Abgerüttelt	Teillast

2.2.2.2 Messungen am Prüfstand

Im Rahmen der Prüfstandsmessungen sollte eine intensivere Untersuchung und Bewertung des Abscheiderverhaltens ermöglicht werden, in Abhängigkeit von anspruchsvollen Brennstoffen und Betriebszuständen des Kessels. Das Spektrum realisierter Betriebsbedingungen umfasste insbesondere den Teil- und den Nennlastbetrieb des Kessels sowie die Verwendung von Hackschnitzeln verschiedener Arten (Buche, Fichte, Gemische) und Qualitätsstufen (hoher Wassergehalt) und Nicht-Holz-Brennstoff (Miscanthus-Pellets). Auf diese Weise sollten unvorteilhafte Verbrennungsbedingungen mit ungünstigen Abgaszusammensetzungen und hohen Gehalten partikulärer Emissionen erzeugt werden, welche für den Abscheider eine Herausforderung darstellen könnten. Allerdings muss hinzugefügt werden, dass Miscanthus-Pellets für den Kessel kein zugelassener Brennstoff sind. Die Versuche mit diesem Brennstoff dienten ausschließlich der Erzeugung hoher Staubfrachten, stellen aber keine reproduzierbaren Verbrennungsbedingungen des Kessels dar. Der entsprechend erarbeitete Versuchsplan ist in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Bei den verwendeten Komponenten des Abscheiders handelte es sich um die gleiche Konfiguration wie während der letzten Feldmessungen mit einem 400 W-Netzteil, welches das Anlegen einer konstanten Spannung von ca. 16 kV erlaubte. Der Abscheider wurde im gereinigten Zustand angeliefert. Die erste Messung fand daher mit annähernd

unbeladenen Elektroden statt. Im Laufe der Messungen wurde der Abscheider weder mit Bürsten gereinigt noch wurde der Reinigungsaktuator zum Abrütteln betätigt. Auf diese Weise konnte der Einfluss eines zunehmenden Beladungszustandes betrachtet werden und es sollte die Wartungsanforderung, d. h. die Anzeigefunktion für eine manuelle Reinigung geprüft werden. Die Messungen im Feuerungsprüfstand wurden soweit möglich in täglicher Abfolge zwischen 26.11.13 und 05.12.13 und zwischen 20.01.14 und 22.01.14 durchgeführt

Tabelle 2: Variierte Versuchsparameter während der Messungen am Prüfstand

Versuch	Brennstoff	Aufbereitungsform	Wassergehalt	Lastbereich Kessel
Test 1	Fichte	Hackschnitzel	16 %	Nennlast
Test 2	Fichte	Hackschnitzel	16 %	Nennlast
Test 3	Fichte	Hackschnitzel	16 %	Teillast
Test 4	Fichte	Hackschnitzel	44 %	Nennlast
Test 5	Fichte	Hackschnitzel	44 %	Teillast
Test 6	Buche	Hackschnitzel	37 %	Nennlast
Test 7	Buche	Hackschnitzel	37 %	Teillast
Test 8	Miscanthus	Pellets	6 %	Nennlast
Test 9	Miscanthus	Pellets	6 %	Teillast
Test 10	Gemisch	Hackschnitzel	25 %	Teillast

2.2.3 Versuchsbrennstoffe

Die Eigenschaften und Zusammensetzungen der Brennstoffe schwankten zum Teil stark und konnten so den Betriebszustand der Feuerung und das Abgasverhalten durch auftretende Inhomogenität beeinflussen. So können beispielsweise Rückkopplungen auf die Strömungsverhältnisse oder das Emissionsniveau auftreten, die zu unvermeidlichen Unsicherheiten und Einschränkungen der Genauigkeit führen. Die Standardabweichungen zwischen den drei Wiederholungen während einer Messung erlauben entsprechend Rückschlüsse auf die Schwankungsbreite und die Reproduzierbarkeit. Die betrachteten Brennstoffe sind in der folgenden Tabelle 3 vergleichend charakterisiert.

Die Messung des Wassergehalts der jeweiligen Brennstoffe wurde entsprechend der DIN EN 14774-3 [3] mit einer Dreifachbestimmung einer repräsentativen Probenmenge durch Trocknung bei 105 °C über 24 h durchgeführt. Entsprechend den Vorgaben der DIN EN 14775 [4] wurde der Aschegehalt mit einer Dreifachbestimmung ermittelt durch Erhitzen einer repräsentativen Probenmenge auf 550 °C unter Luftatmosphäre. Der Heizwert wurde bestimmt mithilfe eines Bombenkalorimeters nach den Vorgaben der DIN EN 14918 [5].

Tabelle 3: Übersicht über die eingesetzten Versuchsbrennstoffe (TM ... Trockenmasse)

Versuchsort	Feld	Prüfstand				
Brennstoff	Gemisch	Fichte	Fichte	Buche	Miscanthus	Gemisch
Aufbereitungsform	Hack-schnitzel	Hack-schnitzel	Hack-schnitzel	Hack-schnitzel	Pellets	Hack-schnitzel
Wassergehalt [%]	21	16	44	37	6	25
Aschegehalt [%]	1,1	0,7	0,6	0,6	3,6	0,7
Heizwert [kJ/kg TM]	19.030	18.949	18.992	19.196	17.859	19.030
Visueller Vergleich						

2.2.4 Versuchsauswertung

Die in Kapitel 2.1 beschriebenen Messgrößen und Emissionen der Abgaskomponenten wurden über eine LabView-basierte Anzeige visualisiert und aufgezeichnet. Anschließend wurden das Luftverhältnis λ , die Normdichte, der Normvolumenstrom und die Massenströme berechnet als Mittelwerte über 60 Sekunden sowie über die 30-minütige Dauer der Staubmessung. Die Emissionen wurden dabei sowohl als Massenkonzentration in mg/Nm^3 bei Bezug auf 13 % O_2 ausgegeben als auch bezogen auf die gelieferte Kesselleistung in $\text{mg}/\text{MJ } H_{U(\text{roh})}$. Vereinfachend werden die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffverbindungen angegeben als gesamter organisch gebundener Kohlenstoff (Gesamt-C) und die verschiedenen Stickoxid-Komponenten (NO , NO_2 , N_2O etc.) als NO_x . Weiterhin werden die anorganischen Chlorverbindungen als HCl-Emissionen und die Schwefeloxidverbindungen als SO_2 -Emissionen ausgegeben. Für die Auswertung der Staubemissionen in mg/Nm^3 bei Bezug auf 13 % O_2 erfolgt die Berechnung des Gesamtstaubgehaltes über den Bezug der gravimetrisch bestimmten Staubbiladung auf die berechneten Normvolumina der abgesaugten Gasmenge in den gemessenen Gaszuständen und den definierten Sauerstoffgehalt.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Feldmessungen

Die während der Feldmessungen über den Wärmemengenzähler im Wasserkreislauf des Kessels ausgegebene thermische Leistung belief sich bei den Nennlastversuchen auf 80 kW bis 90 kW. Im Teillastbetrieb betrug die thermische Leistung ca. 40 kW bis 60 kW. Daraus ergab sich ein berechneter Brennstoffmassenstrom von ca. 20 kg/h während der Nennlastmessungen beziehungsweise von ca. 13 kg/h während der Teillastversuche.

3.1.1 Messung der Abgastemperatur

Die gemessenen Abgastemperaturen sind in Abbildung 6 dargestellt. Es handelt sich um die Mittelwerte aus den drei betrachteten Versuchszeiträumen von je 30 min Dauer während der Staubprobenahme. Der Kessel befand sich in dieser Zeit im Regelbetrieb. Die Werte „vor Abscheider“ und „nach Abscheider“ beziehen sich auf die Temperaturmessungen im Roh- und im Reingas, bei dem Wert „im Abscheider“ handelt es sich um den berechneten Mittelwert aus diesen beiden Messergebnissen.

Die Messwerte liegen in einer für diese Kesselgröße typischen Größenordnung von ca. 130 °C im Rohgas bei Nennlastbetrieb und ca. 100 °C bei Teillastbetrieb. Dabei weisen die Werte eine hohe Reproduzierbarkeit mit einer geringen Schwankungsbreite auf und verdeutlichen damit den stabilen Betrieb des Kessels sowie die entsprechend gut vergleichbaren Bedingungen, die während der Feldversuche vorlagen.

Zwischen Roh- und Reingasmessung ergab sich ein Temperaturgradient von ca. 25 K bei Nennlast beziehungsweise von ca. 15 K bei Teillast. Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, wurde der Abgastaupunkt im Rohgas von ca. 80 °C bzw. von ca. 40 °C im Regelbetrieb nicht unterschritten.

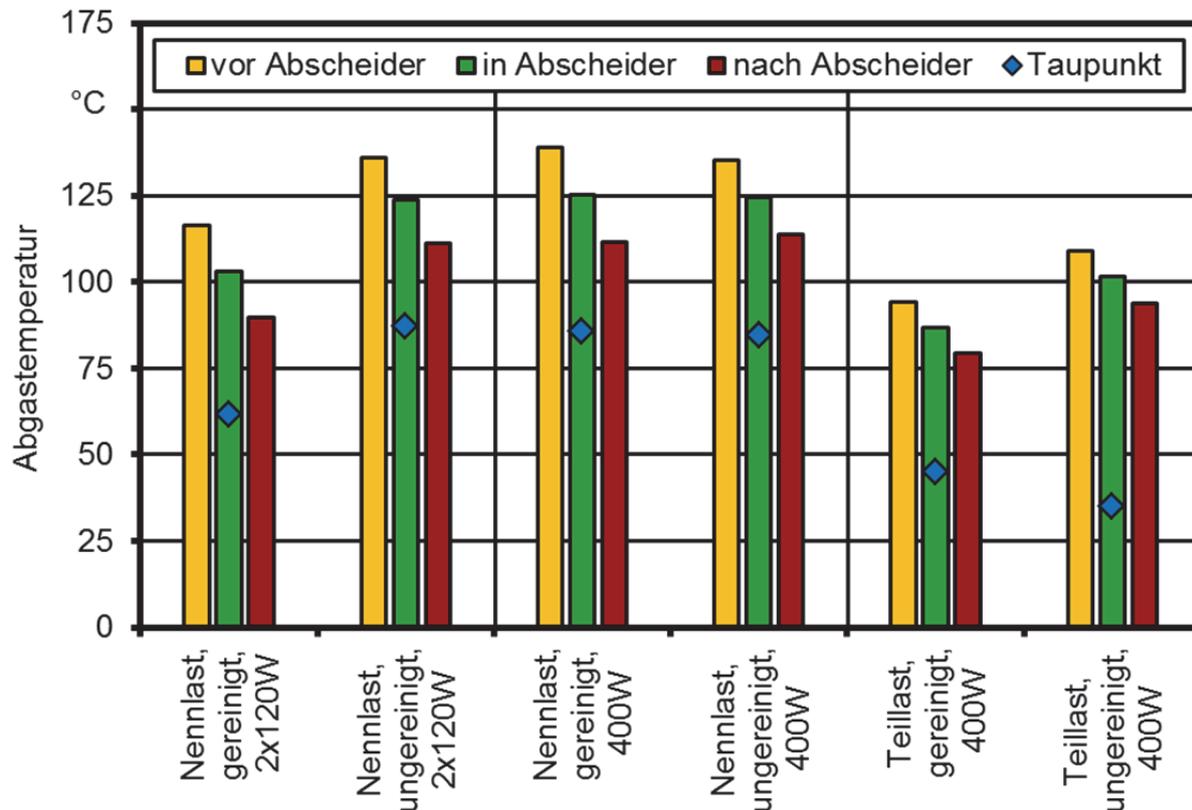


Abbildung 6: Ergebnisse der Temperaturmessung während der Feldmessungen

3.1.2 Messung der Abgasgeschwindigkeit

Da während der Feldmessungen keine kontinuierliche Erfassung der Geschwindigkeit im Abgas möglich war, wurde diese vor Beginn der Auswerteziträume (während der Staubabsaugung) gemessen. Die Aufzeichnung der Geschwindigkeit fand dabei über ca. 10 min im Regelbetrieb des Kessels statt. Aufgrund des sehr konstanten Verlaufs anderer Kessel-Betriebsparameter, wie z. B. Temperatur, Abgaskomponenten etc., ist nur von sehr geringen und vernachlässigbaren Schwankungen der Geschwindigkeit auszugehen. Daher ist diese diskontinuierliche Messung zulässig und muss als eine der einschränkenden Aspekte während Feldmessungen betrachtet werden.

Die gemessenen Werte sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei handelt es sich bei der Datenreihe „in Abscheider (berech.)“ um den über die gemessene Reingasgeschwindigkeit und entsprechende Temperaturkorrektur berechneten Wert der Geschwindigkeit in jeder Niederschlagselektrode des Abscheiders. Mit einem durchschnittlichen Wert von 0,45 m/s ergibt sich eine Verweilzeit im Bereich der Abscheideelektroden von 2,2 s.

Die Unterschiede zwischen den Messwerten im Roh- und im Reingas von bis zu 0,7 m/s müssen zurückgeführt werden auf die nicht normgerechte Einbausituation der Messstellen und dadurch bedingten Ungleichmäßigkeiten im Strömungsbild, die zu Schwankungen und Unsicherheiten führen.

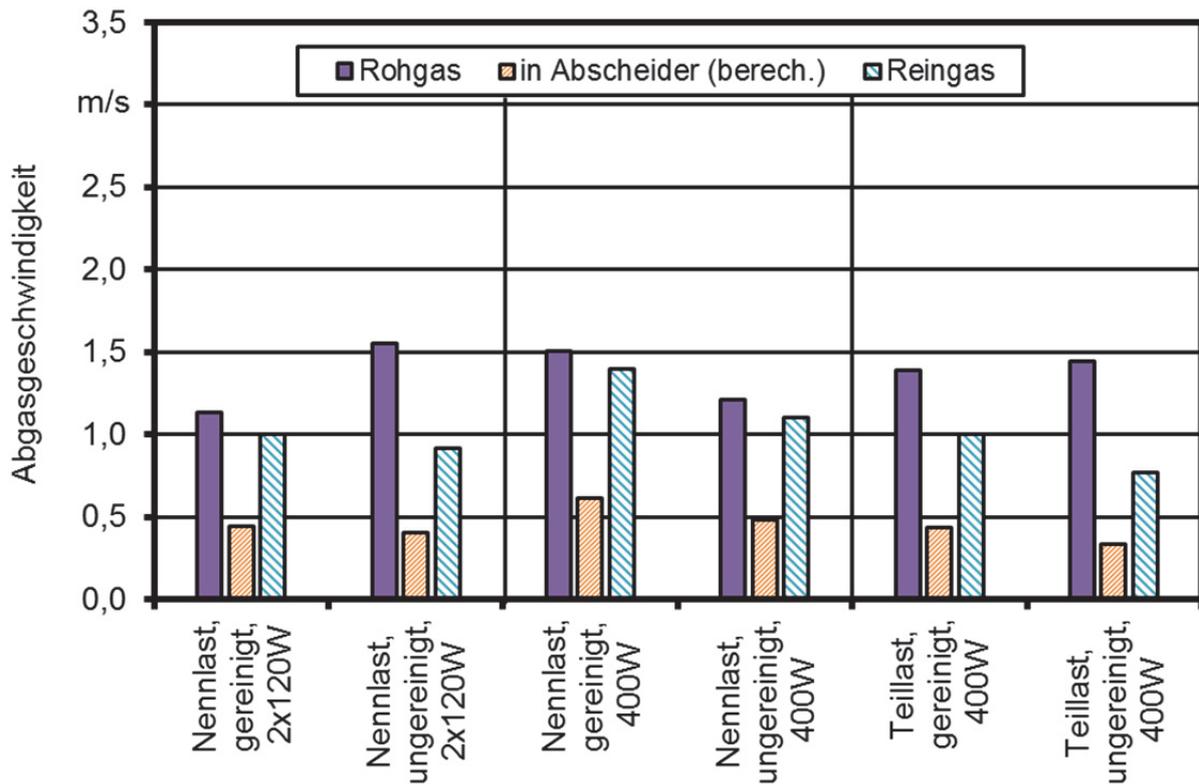


Abbildung 7: Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung während der Feldmessungen

3.1.3 Messung der Staubbelastung

Während der einzelnen Versuchstage wurden je drei Staubmessungen über je 30 min Dauer durchgeführt. Die resultierenden Mittelwerte der Staubmessungen sowie die Standardabweichungen zwischen diesen drei Messwerten während der betrachteten Messzeiträume sind in Abbildung 8 dargestellt.

Mit bereits moderaten Rohgasbelastungen von durchschnittlich 67 mg/Nm^3 befinden sich die Werte oberhalb der ab 2015 gültigen Grenzwerte von maximal 20 mg/Nm^3 . Bedingt durch die hohe Abscheideeffizienz mit guter Reproduzierbarkeit von $83 \% \pm 7 \%$ konnte allerdings mit 16 mg/Nm^3 eine Reingas-Staubbelastung unterhalb des Grenzwertes auch in Feldmessungen sicher erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen weiterhin durch die geringe Standardabweichung von 3 mg/Nm^3 bis 5 mg/Nm^3 eine hohe Reproduzierbarkeit der Werte.

Aufgrund von anlagenbedingt aufgetretenen Problemen befand sich der Kessel während des zweiten Teillastversuches mit ungereinigter Elektrode in einem nicht vergleichbaren instationären Zustand, der zu ungünstigem Betriebsverhalten mit sehr hohen Emissionen führte, wodurch nur ein einzelner Versuch möglich war. Durch diese sehr nachteiligen Verbrennungsbedingungen ergab sich allerdings ein Indikator für den Grenzbereich des Abscheidevermögens unter hohen Staubbelastungen im Abgas (hier: 60 % Abscheidegrad). Generelle Unterschiede im Abscheideverhalten zwischen Teil- und Nennlastbetrieb sind jedoch nicht erkennbar.

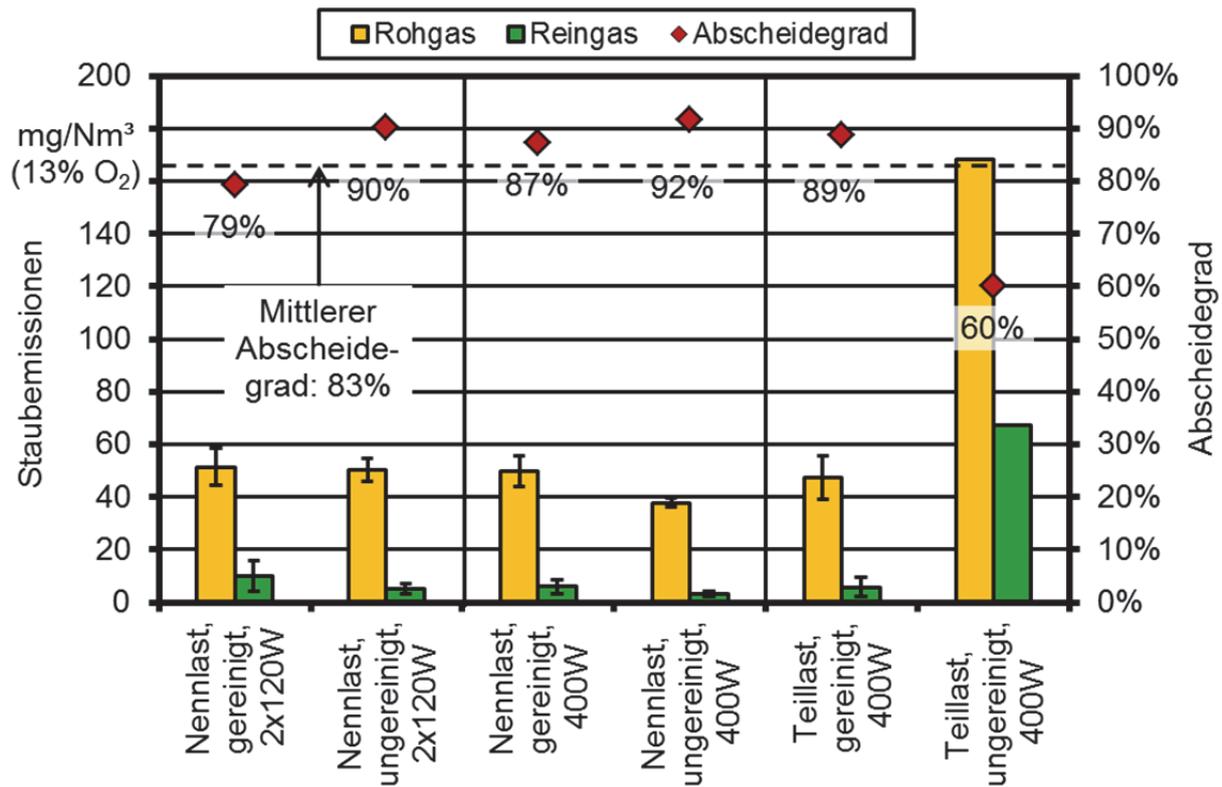


Abbildung 8: Ergebnisse der Staubmessungen während der Feldmessungen

Zwischen den Abscheideleistungen in Abhängigkeit vom Beladungszustand der Niederschlagselektroden zeigt sich, dass die ungereinigten Elektroden mit einer höherer angelegten Staubfracht eine geringfügig höhere Abscheideeffizienz aufweisen. Dies kann eventuell auf die höhere effektive Oberfläche, bedingt durch den stark strukturierten und ungleichmäßigen Aufbau der Staubanlagerung, zurückgeführt werden. Durch die bereits angelagerten Partikelagglomerate werden möglicherweise mehr freie Plätze zur Anlage noch nicht abgeschiedener Partikel zur Verfügung stellt.

In Bezug auf die Variation des Netzteils war kein Einfluss auf die Abscheideleistung sowie auf weitere Betriebsparameter feststellbar.

3.1.4 Messung der gasförmigen Abgasemissionen

Die Mittelwerte der emittierten sonstigen Abgaskomponenten während der betrachteten Auswertzeiträume sind in Abbildung 9 dargestellt. Mit Kohlenmonoxid-(CO) Emissionen von durchschnittlich unter 200 mg/Nm³, Stickoxid-(NO_x) Ergebnissen von ca. 300 mg/Nm³ und organischen Kohlenstoffemissionen (Gesamt-C) von unter 10 mg/Nm³ ergab sich ein sehr geringes Emissionsniveau bei hoher Reproduzierbarkeit der Messungen. Die geringen Gesamt-C- und CO-Emissionen korrelieren gut mit den gemessenen Staubgehalten im Rohgas.

Während der Teillastmessung bei gereinigter Elektrode zeigen sich die für diesen Betriebszustand erwarteten geringfügig erhöhten Emissionswerte. Auch anhand der hohen gasförmigen Emissionen sind die ungünstigen und nicht stationären Verbrennungsbedingungen während des Teillastversuchs mit ungereinigter Elektrode ersichtlich.

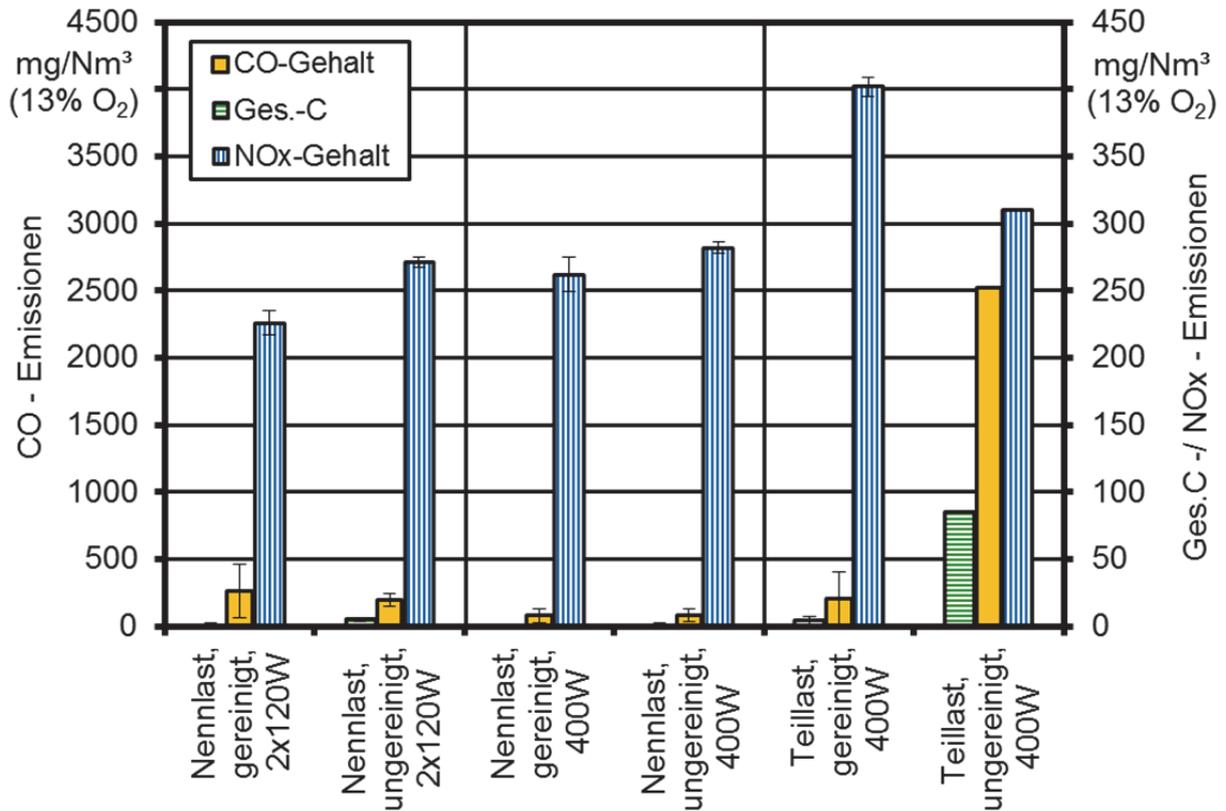


Abbildung 9: Ergebnisse der erfassten gasförmigen Abgaskomponenten während der Feldmessungen

3.1.5 Betriebsverhalten des Staubabscheiders

Exemplarisch ist das Betriebsverhalten des Elektroabscheiders während eines Mess-tages in Abbildung 10 verdeutlicht. Dabei sind Spannungsüberschläge während des in-stationären Anheizbetriebs des Kessels ersichtlich im Verlauf der grünen Kurve (zwi-schen 20 min und 50 min nach Messbeginn). Im Regelbetrieb des Kessels bei stabilen Bedingungen liegt allerdings eine konstante Spannung von 15,4 kV an den Hochspan-nungselektroden an. Mit 3 bis 4 mA befindet sich auch die Stromstärke in einem relativ konstanten Bereich. Eine Abnahme des Coronastromes an den Hochspannungselektroden über die Zeit konnte während der Feldmessungen nicht festgestellt werden.

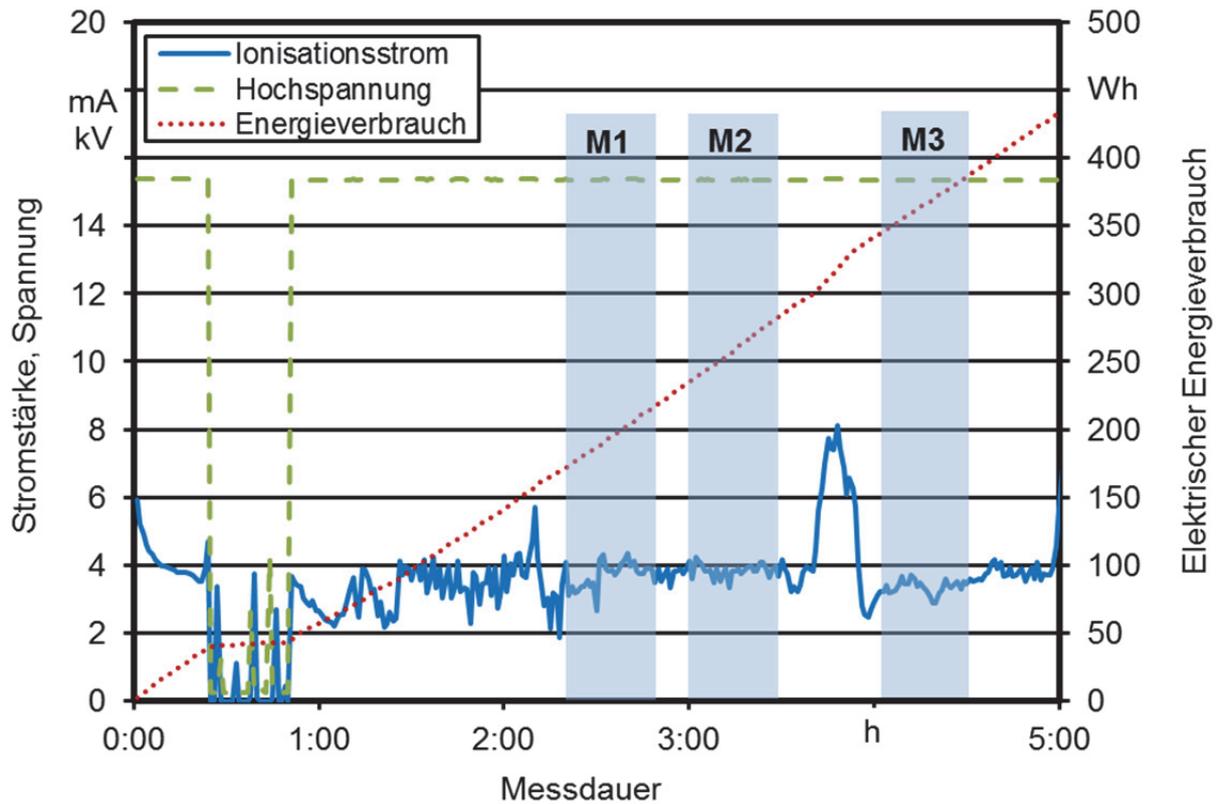


Abbildung 10: Betriebsverhalten des Elektroabscheiders während einer Feldmessung (M1–M3: je 30-minütige Einzelmessungen während des Messtages)

Die verbrauchte elektrische Energie betrug während einer Messung durchschnittlich ca. 400 Wh, was einer mittleren Leistung von ca. 20 W entspricht. Bei einer anliegenden Spannung von über 10 kV betrug die Verfügbarkeit des Abscheiders während der betrachteten Feldmessungen zwischen 88 % und 95 %. Einen visuellen Vergleich zwischen den gereinigten unbeladenen und den mit Partikelagglomeraten beladenen Abscheideelektroden zeigt Abbildung 11.



Abbildung 11: Vergleich zwischen unbeladenen Hochspannungs- und Abscheideelektroden (ganz links und links) und mit Staubfracht beladenen ungereinigten Hochspannungs- und Abscheideelektroden (rechts und ganz rechts)

3.2 Ergebnisse der Messungen am Prüfstand

Am Feuerungsprüfstand des TFZ wurden an insgesamt zehn Versuchstagen Messungen durchgeführt. Über die Wärmeleistungsmessstrecke am Prüfstand wurde die erzeugte thermische Leistung erfasst. Diese betrug im Regelbetrieb während der Versuche bei Nennlast durchschnittlich 91 kW und bei Teillast 51 kW. Mit den Werten in diesem Leistungsbereich ist eine hohe Vergleichbarkeit zu den Feldmessungen gegeben.

Die Brennstoffmassenströme schwankten je nach eingesetztem Brennstoff. Im Mittelwert beliefen sie sich auf 30 kg/h während der Nennlast- und auf 18 kg/h während der Teillastversuche. Damit lagen sie um das ca. 1,5-fache über den Bedingungen der Feldmessungen.

3.2.1 Messung der Abgastemperatur

Abbildung 12 verdeutlicht die Messergebnisse der Abgastemperaturen als Mittelwerte zwischen den drei betrachteten 30 min-Messungen je Versuch im stabilen Regelbetrieb. Die Werte für „Rohgas“ und „Reingas“ beziehen sich dabei auf die Messwerte der Abgastemperatur an der Staubmessposition im Rohgas beziehungsweise an der Reingas 1-Position. Der Temperaturwert „nach Abscheider“ wurde direkt am Abscheiderausgang gemessen.

Mit durchschnittlich 127 °C an der Rohgasposition, 104 °C am Ausgang des Abscheiders und 102 °C an der Reingas 1-Position während der Messungen im Nennlastbetrieb und einer Standardabweichung zwischen den einzelnen Messwerten von unter 6 K weisen die Ergebnisse eine hohe Vergleichbarkeit untereinander auf. Sie sind außerdem auf ähnlichem Niveau wie bei den Feldmessungen und zeigen ebenso eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Das Gleiche gilt auch für Teillast-Messungen mit Abgastemperaturen von 108 °C, 86 °C beziehungsweise 84 °C im Rohgas, am Ausgang des Abscheiders beziehungsweise an der Reingas 1-Position. Die Standardabweichung betrug zwischen diesen Messwerten unter 4 K. Der Temperaturverlust über den Abgasweg des Abscheiders belief sich auf 22 K im Teillast- beziehungsweise 23 K im Nennlastbetrieb.

Der in der Abbildung ebenfalls aufgeführte Abgas-Taupunkt im Rohgas von durchschnittlich 53 °C bei Teillast beziehungsweise von durchschnittlich 75 °C bei Nennlast wurde im Regelbetrieb nicht unterschritten.

Einzig während der Messungen im Kaltstartbetrieb kam es mit vereinzelt Taupunkt-werten von unter 40 °C zu möglichen, durchaus typischen Betriebsbedingungen, bei denen es zur Kondensation von Wasser im Abgas kommen konnte. Da diese Bedingungen eine Herausforderung für den Abscheider darstellen können, war dieser realitätsnahe Zustand bei den Messungen erwünscht.

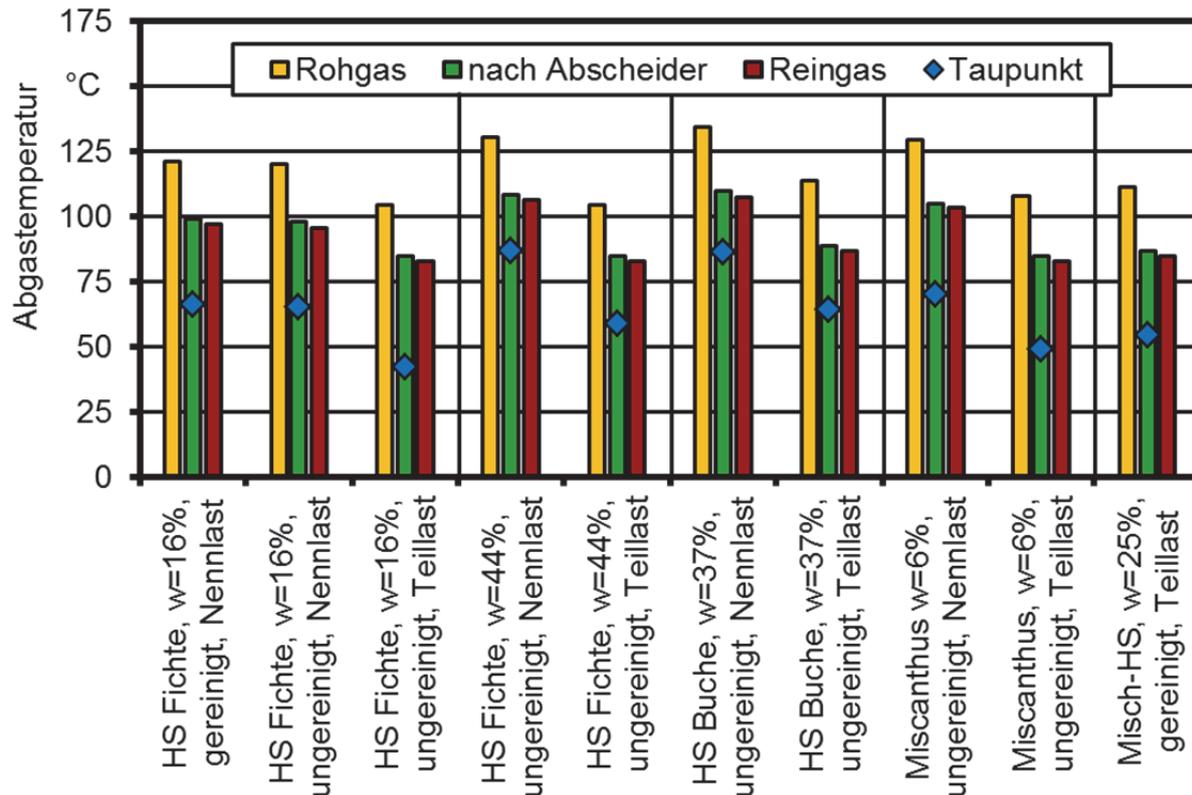


Abbildung 12: Ergebnisse der Temperaturmessung während der Messungen im Prüfstand

3.2.2 Messung der Abgasgeschwindigkeit

Während der Versuche im Prüfstand konnte die Geschwindigkeit im Abgas kontinuierlich aufgezeichnet werden – sowohl mit einem Prandtl-Staurohr im Rohgas als auch mit einem Flügelradanemometer im Reingas. Die dabei erfassten Mittelwerte während der drei Messungen im Regelbetrieb über die Dauer von je 30 min sind in der folgenden Abbildung 13 aufgetragen. Zusätzlich zu den gemessenen Werten ist der berechnete Wert „in Abscheider“ angegeben, welcher sich auf die gemessene Geschwindigkeit im Reingas bezieht und mit den entsprechenden Temperaturwerten korrigiert wurde.

Aus der mittleren Geschwindigkeit in den Abscheideelektroden von 0,7 m/s ergibt sich eine Verweilzeit von durchschnittlich 1,3 s. Die geringen Abweichungen zwischen den Werten im Roh- und im Reingas können auf eine Abkühlung des Abgases und die dadurch bedingte Verringerung der Geschwindigkeit zurückgeführt werden. Die im Vergleich zu den Feldmessungen höheren Geschwindigkeiten des Abgases sind einerseits auf einen geringeren Durchmesser des Abgasstranges am Prüfstand und andererseits auf einen höheren Brennstoffmassenstrom während der Messungen im Prüfstand zurückzuführen.

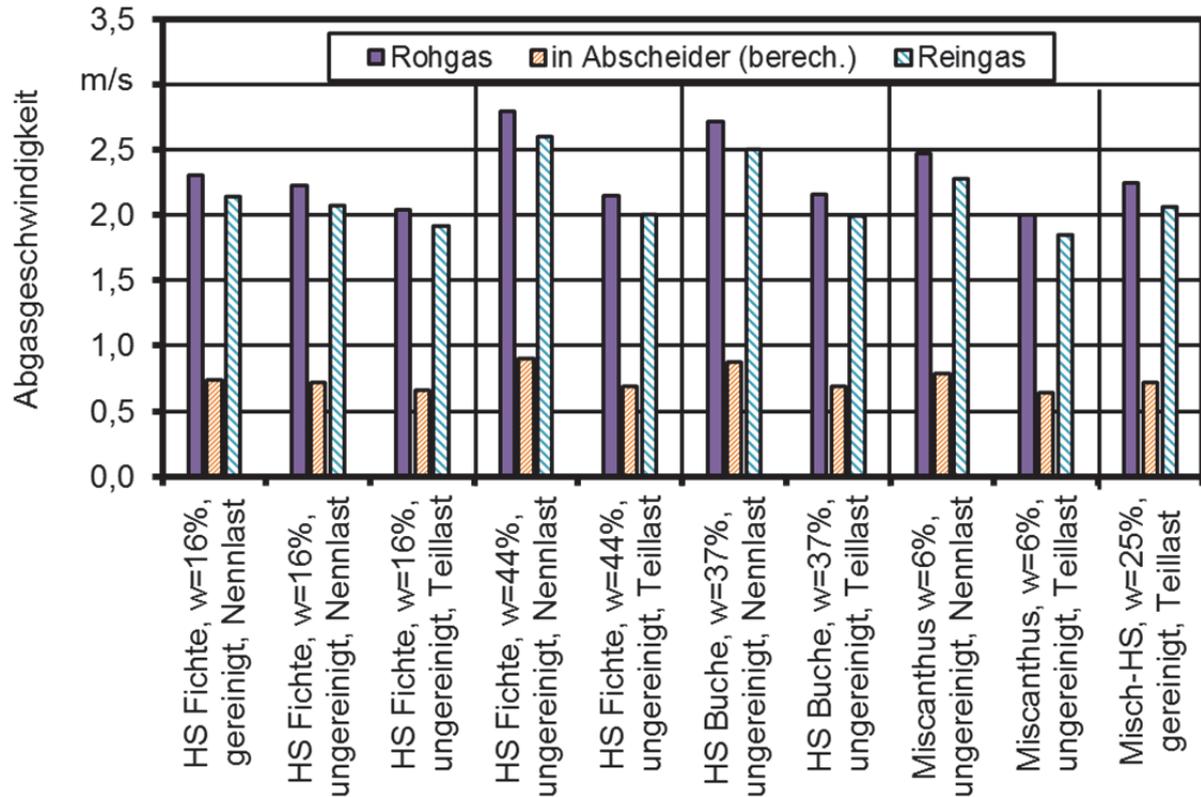


Abbildung 13: Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung während der Messungen im Prüfstand

3.2.3 Messung der Staubbelastung

Die Mittelwerte der Staubgehalte und Standardabweichungen sowie die Abscheidegrade aus den drei Staubmessungen, durchgeführt über je 30 min Betrachtungsdauer während des Regelbetriebs des Kessels, sind in Abbildung 14 dargestellt. Mit einer durchschnittlichen Staubbelastung im Rohgas von 57 mg/Nm^3 ist der Messwert zwar geringer als während der Feldmessungen, er liegt jedoch höher als der ab 2015 geforderte Grenzwert von 20 mg/Nm^3 . Eine Abscheideeffizienz von $88 \% \pm 3 \%$ führte allerdings zu einem Staubgehalt im Reingas von durchschnittlich nur noch 8 mg/Nm^3 . Der Grenzwert wurde also auch bei anspruchsvollen Brennstoffen sowie im Teillastbetrieb eingehalten. Einzig bei dem Versuch mit Miscanthus-Pellets im Teillastbetrieb lag die gemessene Reingasbelastung mit 22 mg/Nm^3 geringfügig über dem Grenzwert aber noch im Bereich der Messunsicherheit. Da dieser Brennstoff für den Kessel allerdings nicht zugelassen ist, kann aus dem Ergebnis kein Rückschluss auf ein nachteiliges Verhalten der Feuerung gezogen werden. Die geringen Standardabweichungen zwischen 2 mg/Nm^3 und 6 mg/Nm^3 lassen insgesamt auf eine sehr hohe Reproduzierbarkeit der Messwerte bei sehr geringer Unsicherheit schließen.

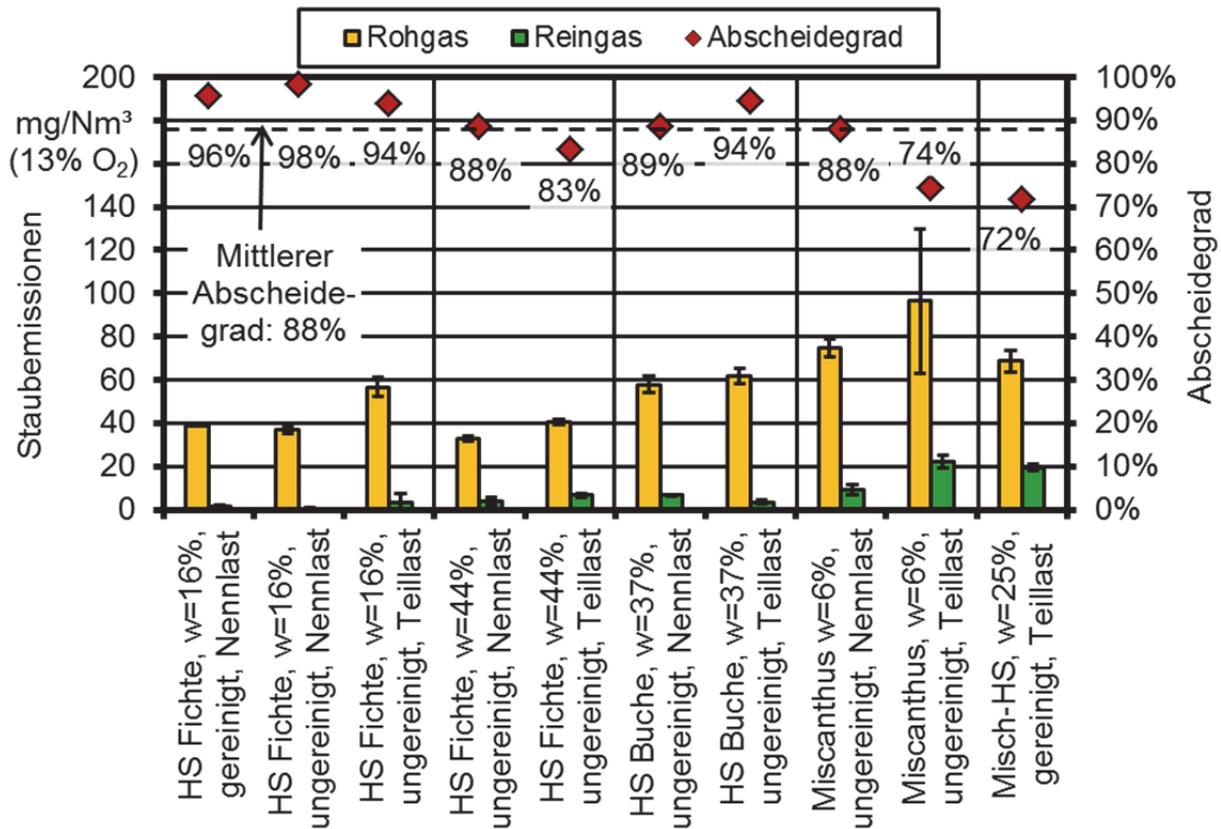


Abbildung 14: Gesamtstaub und Abscheidegrade während der Messungen im Prüfstand

Bei einem Vergleich der einzelnen Messwerte untereinander zeigt sich eine erwartete geringfügig höhere Staubbelastung im Rohgas während der Messungen bei Teillast. Ebenso steigen die Rohgas-Staubemissionen tendenziell für die problematischen Brennstoffe mit hohem Wassergehalt, inhomogener Aufbereitungsform oder anspruchsvoller Brennstoffart. Dennoch kann ein sehr hoher Abscheidegrad von zum Teil über 90 % relativ konstant gehalten werden. Insbesondere während der ersten sieben Messungen zeigt sich, dass trotz sehr unterschiedlicher Verbrennungsbedingungen ein konstant geringer Staubgehalt im Reingas erzielt werden kann.

Im Verlauf der Messungen kommt es zu einem langsamen Anstieg der Staubgehalte im Reingas. Dies kann eventuell auf eine zunehmende Beladung der Abscheideelektroden zurückgeführt werden, die während der Messungen nicht gereinigt wurden. Insbesondere das Absinken der Abscheideeffizienz während der letzten beiden Versuche (Miscanthus-Pellets sowie Mischholz-Hackschnitzel bei Teillastbetrieb) auf durchschnittlich 73 % ist möglicherweise auf diese Zunahme der Partikelanlagerung zurückzuführen. Damit wird die Notwendigkeit der Reinigung der Abscheideelektroden für einen zuverlässig emissionsarmen Betrieb verdeutlicht. Da zu diesem Zeitpunkt die in die Abscheidersteuerung integrierte Anzeige zur manuellen Reinigung der Niederschlagselektrode noch nicht ausgelöst wurde, sollte der entsprechend hinterlegte Parameter gegebenenfalls kontrolliert und angepasst werden. Allerdings weisen Miscanthus-Pellets bedingt durch einen hohen Aschegehalt (vgl. Tabelle 3) und einen niedrigen Ascheschmelzpunkt ein

hohes Schlackebildungsvermögen auf. Zudem kommt es aufgrund des üblicherweise erhöhten Kaliumgehalts solcher Halmgutbrennstoffe zu einer vermehrten Bildung besonders feiner Aerosole, die wegen ihrer sehr hohen Anzahl möglicherweise nicht mehr vollständig abgeschieden werden können.

In Abbildung 15 sind zusätzlich die Ergebnisse der zweiten Staubmessung im Reingas ("Reingas 2") aufgetragen. Im Gegensatz zu der Messung im Rohgas und im Reingas 1, welche das gesamte Größenspektrum der im Abgas vorhandenen Partikel widerspiegeln, verdeutlicht dieser Messwert hauptsächlich die Partikelfraktion im sehr kleinen Mikrometer-Größenbereich. Aus dem Vergleich der beiden Reingasmessungen kann so ein qualitativer Rückschluss gezogen werden über die Masse großer Partikel ("Reingas 1") im Verhältnis zur Masse kleiner Partikel ("Reingas 2"). Der angegebene Wert "Reingas-Differenz" stellt dabei die prozentuale Minderbeladung in Reingas 2 im Verhältnis zu Reingas 1 dar.

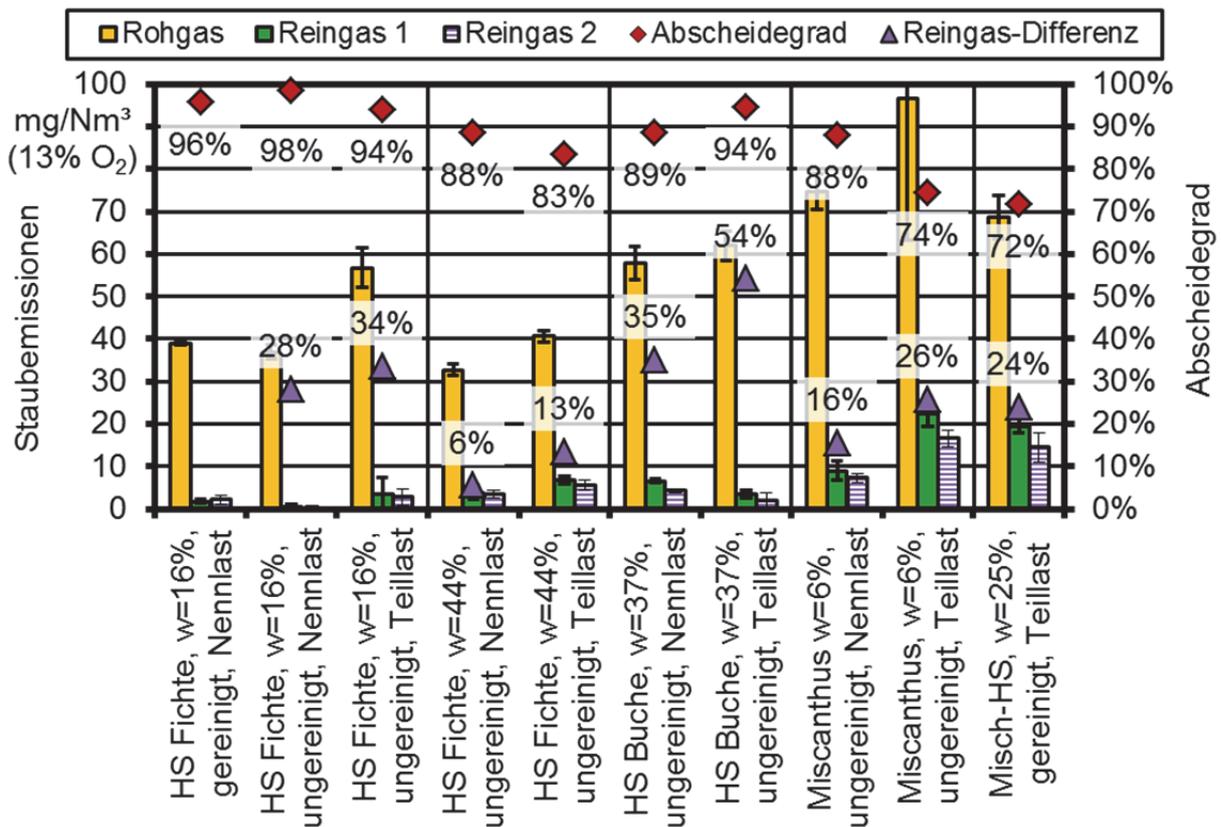


Abbildung 15: Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Messpositionen "Rohgas", "Reingas 1" sowie "Reingas 2" während der Messungen im Prüfstand

Mit einem durchschnittlichen Staubgehalt in Reingas 2 von 6 mg/Nm³ ergab sich eine um ca. 21 % geringere Beladung als in Reingas 1. Dies bedeutet allerdings, dass etwa 79 % der Partikelmasse im Reingas 1 (Sondenorientierung in den Volumenstrom) auf sehr

kleine Partikel zurückgeführt werden muss. Während der Nennlastmessungen beläuft sich der Mittelwert sogar bis auf 88 %.

Unter Beachtung der hohen Abscheidegrade handelt es sich bei diesen Partikeln möglicherweise um die im ursprünglichen Zustand durch den Abscheider transportierte Fraktion, die nicht aufgeladen wurde. Da es sich lediglich um eine qualitative Messmethode ohne scharfe Trenngrenze zwischen den Partikelgrößenklassen handelt, können auch Verbrennungseinflüsse, Unsicherheiten sowie Partikelfraktionen in einem mittleren Größenbereich das Ergebnis beeinflusst haben. Für genauere Aussagen über mögliche Agglomerationsprozesse der Partikel im Abscheider und den Wiedereintritt bereits abgetrennter Staubbestandteile in den Gasstrom wären weitergehende Untersuchungen mit Partikelzählern und Partikelgrößenklassieren vor und nach dem Abscheider notwendig.

Wie in Kapitel 2.2.1.2 beschrieben wurden zusätzliche Messungen durchgeführt während des Kaltstartbetriebes, während der Abscheider außer Betrieb war ("ESP aus") und während sich der Kessel im Ausbrandbetrieb befand.

Bedingt durch die instabilen Betriebszustände unter nicht konstanten Bedingungen treten insbesondere während der Kaltstartphase hohe Staubemissionen von durchschnittlich 223 mg/Nm^3 auf. Aufgrund von Überschlügen in dieser Anfahrphase und einer dadurch reduzierten anliegenden Spannung wurde eine verminderte Abscheideeffizienz von durchschnittlich 63 % erreicht, was zu einer Staubbelastung im Reingas von 49 mg/Nm^3 führte. Dargestellt sind diese Messergebnisse in Abbildung 16.

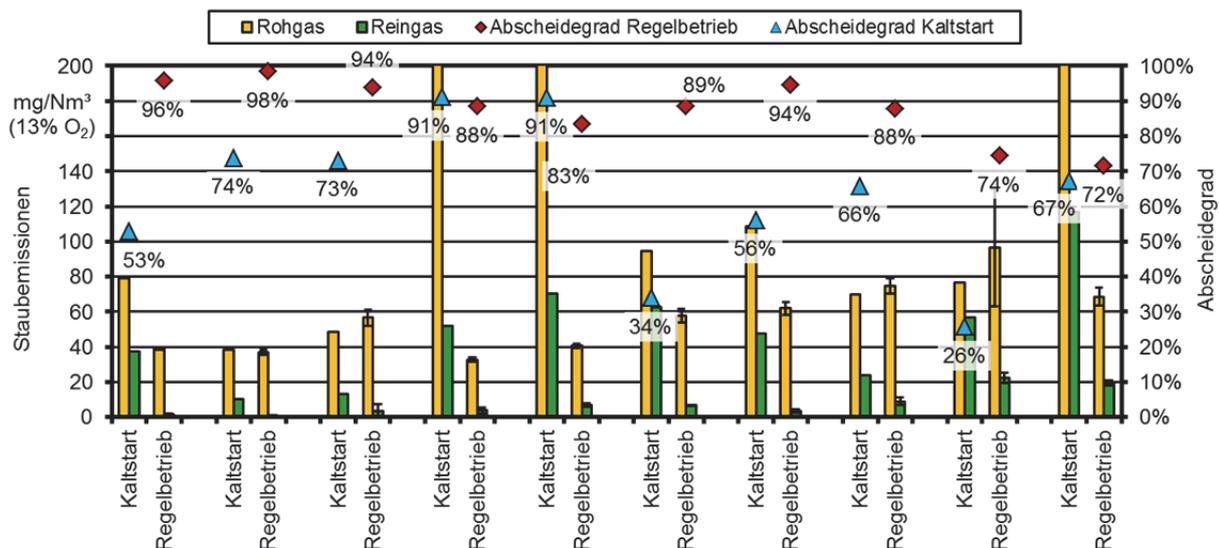


Abbildung 16: Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Kaltstart und Kessel-Regelbetrieb während der Messungen im Prüfstand

Diese Überschläge können zurückgeführt werden auf die Kondensation von Wasserdampf aus dem Abgas im Bereich der Isolatoren, welche zur elektrischen Entkopplung der Hochspannungselektroden dienen. Bei der Anlagerung einer leitfähigen Schicht auf diesen Isolatoren, zum Beispiel kondensierter Wasserdampf oder eine dichte Rubeladung, bricht diese elektrische Entkopplung zwischen Hochspannungs- und geerdeter Niederschlagselektrode zusammen und es treten Spannungsüberschläge auf, die zu einem Zusammenbruch des anliegenden Hochspannungsfeldes führen.

Während der Abscheider außer Betrieb war konnte meist noch ein - wenn auch geringer - Abscheidegrad gemessen werden. Er lag im Mittel bei 3 %, wobei dieser Wert an der Grenze der Messgenauigkeit lag. Abbildung 17 verdeutlicht diese Ergebnisse. Eine Abscheidung bei ausgeschaltetem Abscheider kann auf eine eventuell vorliegende Restionisation zurückgeführt werden oder auf eine tragheitsbedingte Anlagerung der Staubpartikel an der großen vorhandenen Oberfläche des Abscheiders. Damit wird verdeutlicht, welchen hohen Einfluss die anliegende Spannung auf die abzuschneidende Partikelmasse hat im Verhältnis zum Einfluss der Geometrie des Abscheiders.

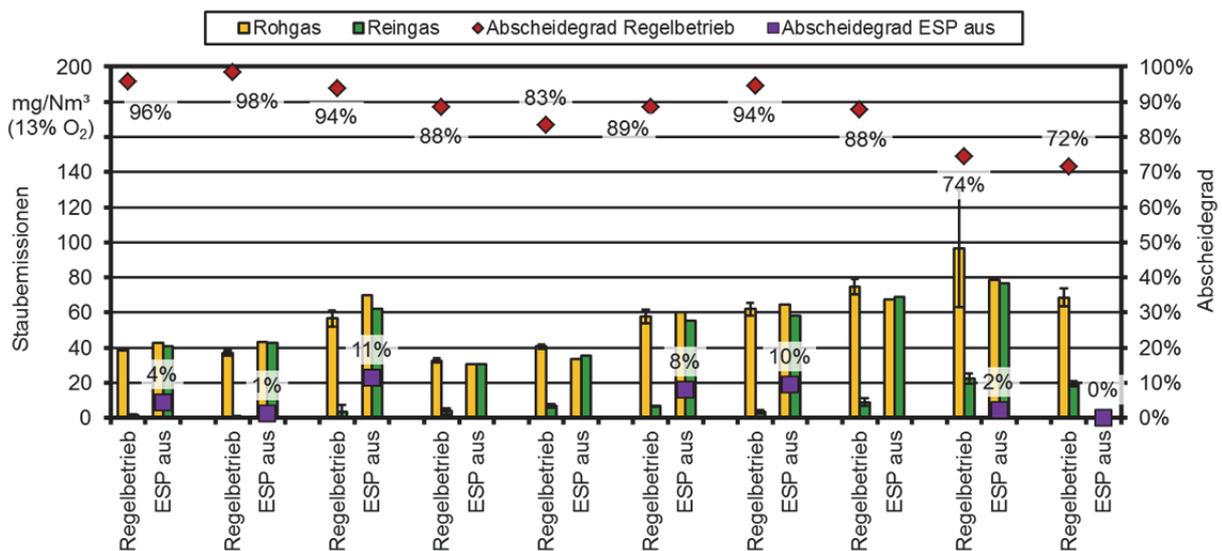


Abbildung 17: Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Regelbetrieb und Abscheider außer Betrieb während der Messungen im Prüfstand

Auch beim Ausbrand handelt es sich um einen instationären Betriebszustand mit meist hohen Schadstoffemissionen. Dies verdeutlicht auch das durchschnittliche Niveau der Rohgas-Staubbelastung von 121 mg/Nm³. Allerdings kommt es wegen des Fehlens von Wasserdampfkondensation zu einem verminderten Auftreten von Spannungsüberschlägen, wodurch eine höhere und konstantere Abscheideeffizienz von 70 % erreicht werden konnte, bei einem mittleren Staubgehalt im Reingas von 39 mg/Nm³. Die Messergebnisse sind aus Abbildung 18 ersichtlich.

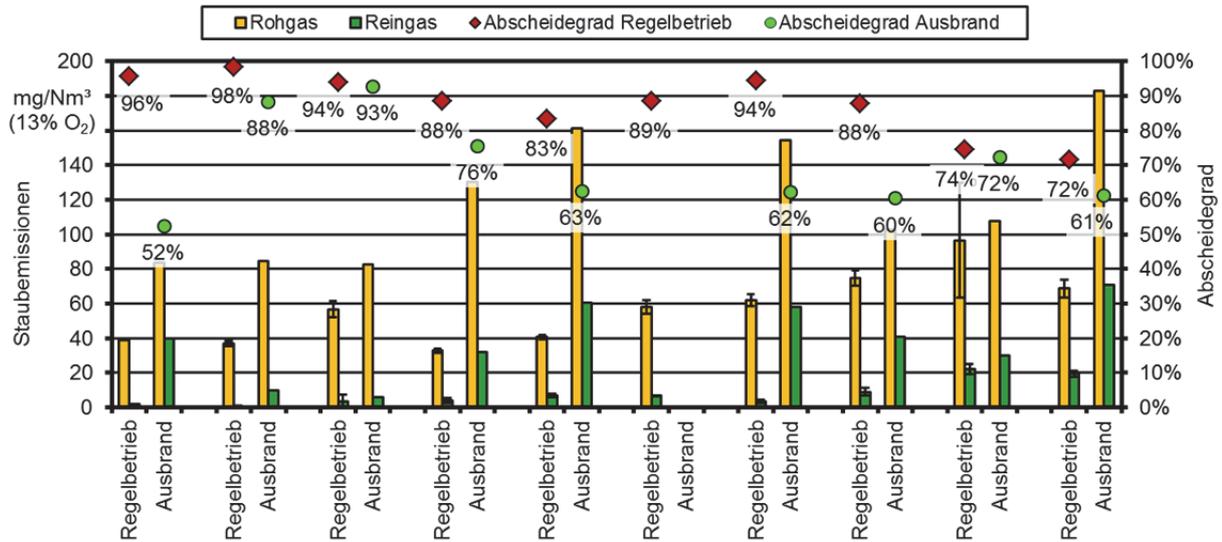


Abbildung 18: Vergleich zwischen Gesamtstaub und Abscheidegraden zwischen den Betriebszuständen Kessel-Regelbetrieb und Kessel-Ausbrand während der Messungen im Prüfstand

3.2.4 Messung der gasförmigen Abgasemissionen

Die im Abgas ermittelten gasförmigen Emissionen sind in Abbildung 19 dargestellt. Dabei handelt es sich jeweils um die Mittelwerte aus drei Messungen während des Regelbetriebs des Kessels, die über den Zeitraum der parallel durchgeführten 30-minütigen Staubprobenahmen ausgewertet wurden.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Emissionen von Kohlenmonoxid (CO) sowie von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (Ges.-C) während der Messungen im Teillastbetrieb und bei Verwendung der Holzbrennstoffe wie erwartet wesentlich höher sind als während des Nennlastbetriebs oder während der Versuche mit Miscanthus-Pellets. Für die Stickoxid-Emissionen (NO_x) dagegen zeigt sich, dass diese insbesondere während der Messungen mit Miscanthus und im Nennlastbetrieb erhöht sind.

Während der Nennlastversuche ergeben sich für die Kohlenmonoxid-, die Stickoxid- sowie die Kohlenwasserstoffemissionen Mittelwerte von 269 mg/Nm³, 200 mg/Nm³ sowie 6 mg/Nm³. Die Emissionen der Teillastversuche belaufen sich auf 1574 mg/Nm³ für die CO-Messung, 194 mg/Nm³ für die NO_x-Messung sowie 56 mg/Nm³ für die Ges.-C-Messung. Dieses geringe Emissionsniveau liegt damit in etwa auf dem gleichen Niveau wie während der Feldmessungen.

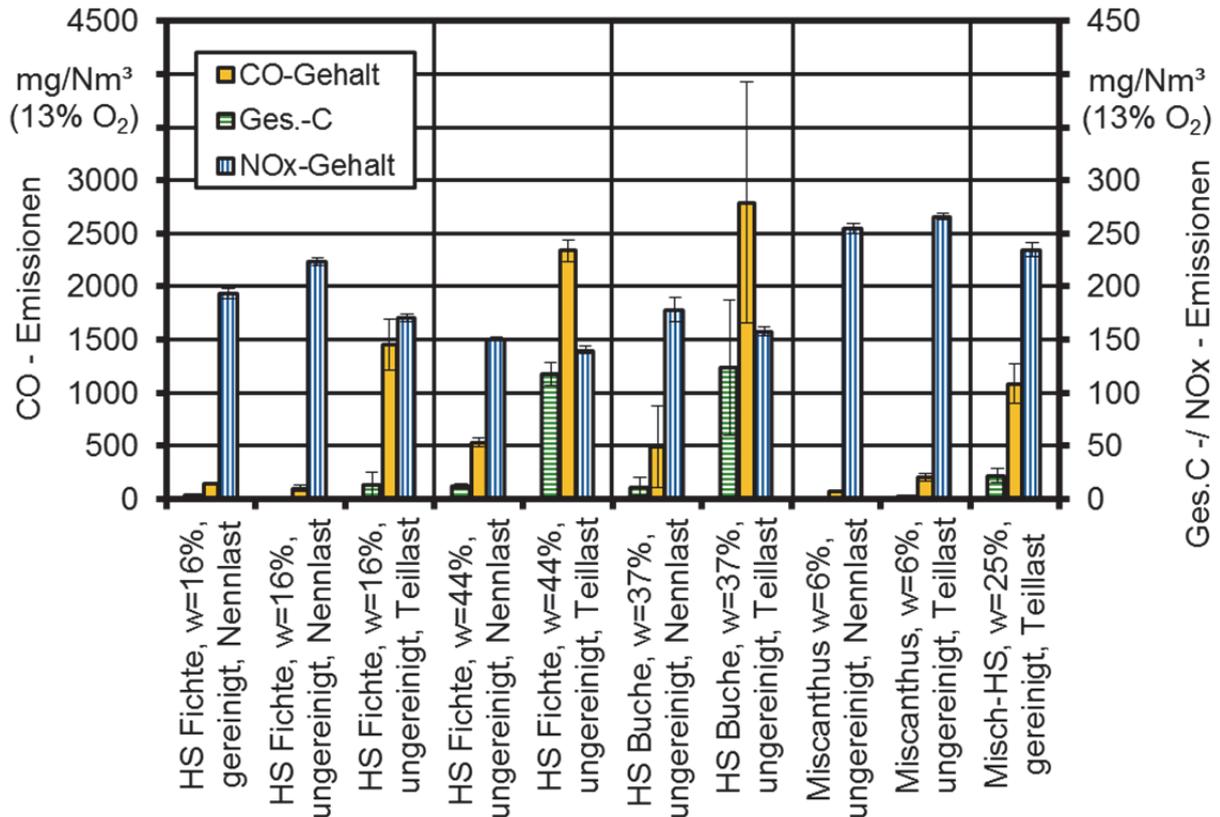


Abbildung 19: Ergebnisse der erfassten gasförmigen Abgaskomponenten während der Messungen im Prüfstand

3.2.5 Betriebsverhalten des Staubabscheiders

Die kontinuierlich über die gesamte Messperiode aufgezeichneten Betriebsparameter des Elektroabscheiders sind in der folgenden Abbildung 20 dargestellt. Der Verlauf der Messwerte wurde dabei zusammengefasst und nur für die einzelnen betrachteten Mess-tage aufgetragen. Die gelb unterlegten Bereiche (M1 bis M10) beziehen sich jeweils auf die gesamte Versuchszeit eines Messtages.

Dabei zeigt sich der konstante und stabile Verlauf der angelegten Hochspannung. Ein kurzes Zusammenbrechen dieser Spannung findet nur statt zu Versuchsbeginn bei stark schwankenden Verbrennungsbedingungen (vgl. Kapitel 0) sowie während der 30-minütigen Messung ohne Abscheiderbetrieb (während Versuch M10 war diese Messung nicht möglich). Mit stationären Bedingungen im Abgas erreicht die Spannung wieder den konstanten Sollwert.

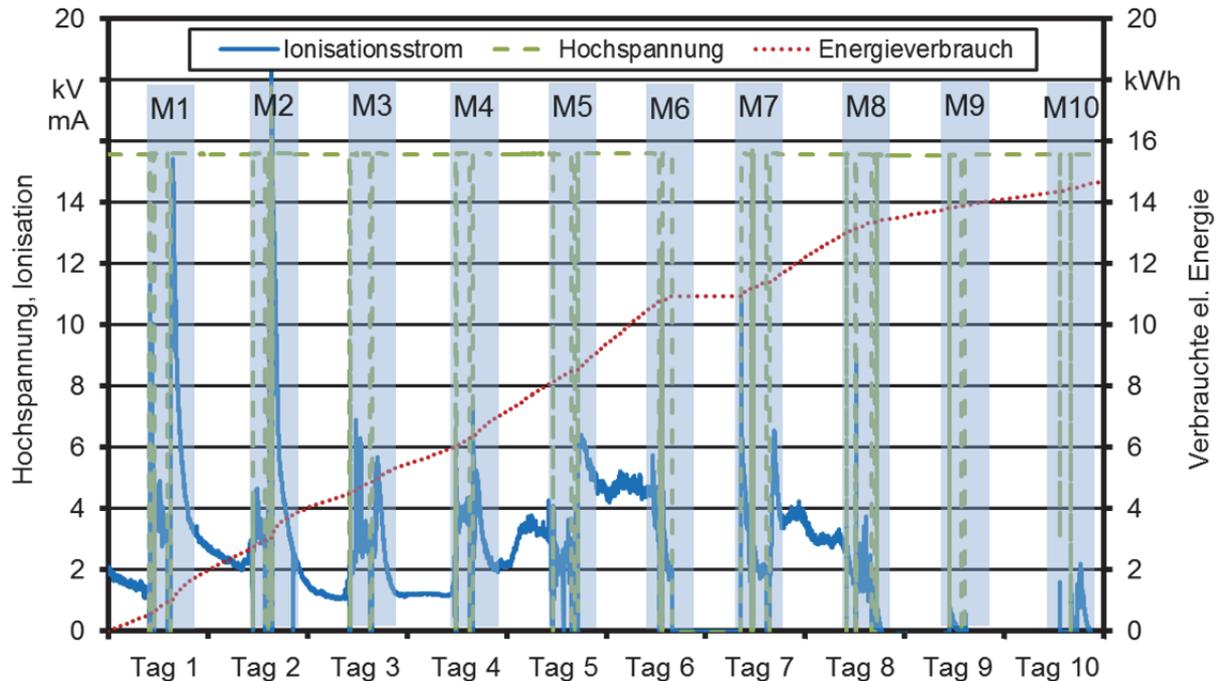


Abbildung 20: Betriebsverhalten des Elektroabscheiders während der Messungen im Prüfstand (M1–M10: Messdauer eines Messtages mit je 6 durchgeführten Einzelmessungen)

Der Ionisationsstrom zeigt während der Messungen einen tendenziell erhöhten Wert, was darauf hindeutet, dass Komponenten im Abgas (Staubpartikel, Wassertropfen etc.) ionisiert werden. Eine starke Abnahme dieses Ionisationsstroms über den Verlauf der Versuche, welcher insbesondere während der letzten Messungen (M9 und M10, d. h. mit Miscanthus-Pellets bzw. Mischholz-Hackschnitzel im Teillastbetrieb) auftrat, deutet auf eine Verschmutzung der Elektroden hin und korreliert so mit den Ergebnissen der Staubmessungen.

Je nach Betrieb des Kessels und des Abscheiders sowie nach eingesetztem Brennstoff könnte sich daher eine Reinigung der Elektroden nach ca. 40 h bis 45 h (entspricht Zeitpunkt M8) als notwendig erweisen. Gegebenenfalls sollte die Grenzstromstärke, die als Regelparameter den Zeitpunkt zum manuellen Reinigen der Elektroden anzeigt, entsprechend korrigiert werden. Alternativ wäre zukünftig eine auf den Kessel abgestimmte Regelungsstruktur möglich, die nach jedem Betrieb der Feuerung automatisch eine Reinigung des Abscheiders veranlasst.

Über den gesamten Messzeitraum betrug die verbrauchte elektrische Energie 4,7 kWh, was einer Leistung von 57 W entsprach. Für die betrachteten Zeiten der Messungen beliefen sich diese Werte auf 290 Wh und 47 W, was 0,05 % der Feuerungsleistung entspricht. Die Verfügbarkeit des Abscheiders mit einer anliegenden Spannung von über 10 kV betrug während der Messungen im Prüfstand 95,2 %.

Die folgenden Abbildungen vermitteln einen Eindruck des gereinigten Abscheiders im Anlieferungszustand (oben) sowie mit abgeschiedenen und angelagerten Staubagglomer-

raten nach 36 h Versuchszeit (beziehungsweise nach Messtag Nr. 7, nach ca. 170 Betriebsstunden) (unten).

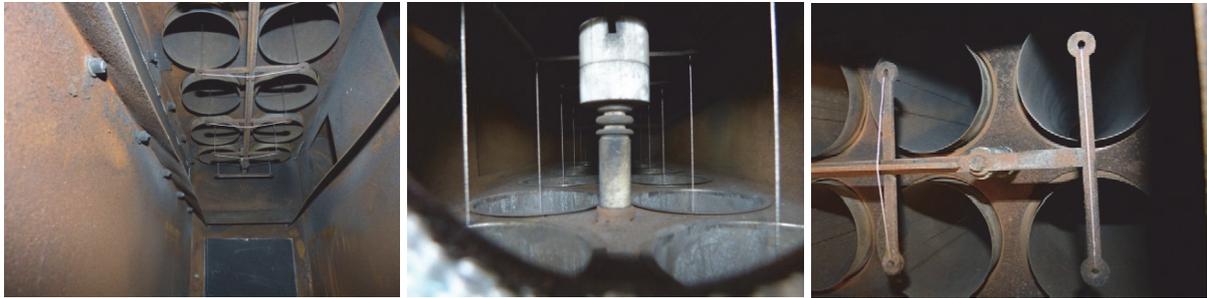


Abbildung 21: Vergleich zwischen unbelasteten Hochspannungs- und Abscheideelektroden (links: Blick von unten auf Abscheideelektroden; Mitte: Blick in den Einströmbereich des Abgases und auf Isolator; rechts: Blick in Abscheideelektroden von unten)

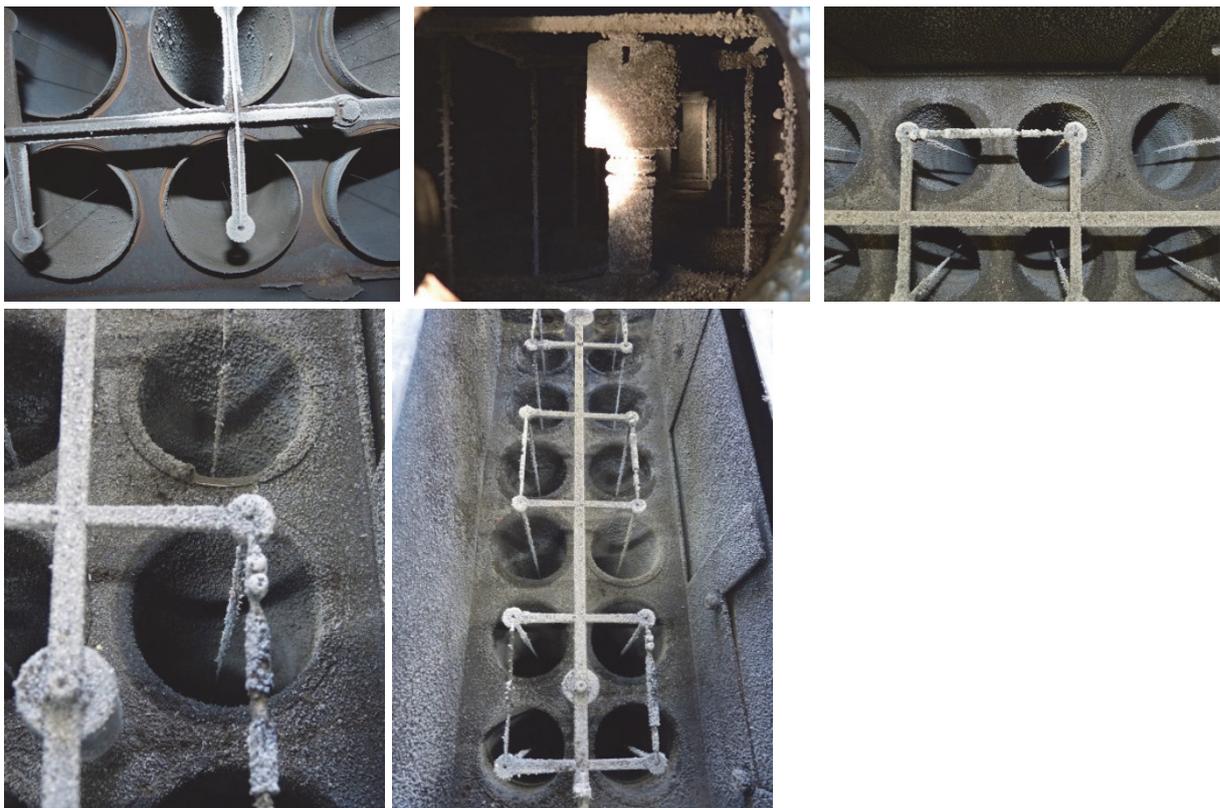


Abbildung 22: Vergleich zwischen mit Staubfracht beladenen ungereinigten Hochspannungs- und Abscheideelektroden (oben links: Blick in Abscheideelektroden von unten; oben Mitte: Blick in den Einströmbereich des Abgases und auf Isolator; oben rechts und unten: Blick auf Abscheideelektroden von oben)

Zusammenfassung

Ein Prototyp eines elektrostatischen Abscheiders FSF 100 der Firma Spanner Re² GmbH wurde in der Praxis an einem Holzhackschnitzelkessel HDG Compact 100 eingesetzt und an insgesamt 6 Messtagen vor Ort auf seine Wirksamkeit (d. h. Abscheidegrad) geprüft. Anschließend wurde der Abscheider am Feuerungsprüfstand unter wechselnden, gezielt abgestuften Einsatzbedingungen mit unterschiedlichen Brennstoffen und Lastzuständen eingesetzt und bewertet.

Mit den durchgeführten Messungen konnte die Eignung des Elektroabscheiders für den Einsatz in der Praxis auch unter anspruchsvollen Bedingungen gezeigt werden. Das dabei gezeigte Ergebnis entsprach den Erwartungen: So konnten im Prüfstand geringere Emissionen von Schadkomponenten im Reingas gemessen werden. Weiterhin wiesen die ermittelten Messwerte eine relative geringere Standardabweichung auf, waren also gut reproduzierbar. Die während der Feldmessungen erreichten Werte lagen trotz größerer Schwankungen in der gleichen Größenordnung, weshalb eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Messkampagnen gegeben war. Insgesamt konnten ein emissionsarmer Betrieb sowie stabile Ergebnisse erreicht werden, die sich als relativ unabhängig von den Betriebsbedingungen erwiesen.

Bei Betrachtung der Einflüsse der einzelnen Kesselzustände auf das Verhalten des Abscheiders zeigte sich, dass auch in der Startphase bei einer kalten Feuerung eine Staubabscheidung gewährleistet ist. Diese liegt mit 63 % in einer nur etwas geringeren Größenordnung als während des Regelbetriebs (88 % verglichen zwischen allen Messungen am Prüfstand).

Eine Zusammenfassung der gemessenen Werte und der erreichten Bedingungen sowohl während der Feldmessungen als auch während der Versuche am Prüfstand zeigt Tabelle 4.

Tabelle 4: Vergleichende Übersicht über die erzielten Mittelwerte aus den Messwerten am Feldstandort und am Prüfstand, unterschieden zwischen Nenn- und Teillast (Bm³ ... Betriebskubikmeter)

	Einheit	Feldanlage (D=225 mm)		Prüfstand (D=200 mm)	
		Nennlast	Teillast	Nennlast	Teillast
Rohgasstaubbeladung	mg/Nm ³	47	108	48	65
Reingasstaubbeladung	mg/Nm ³	6	36	4	11
Abscheideeffizienz	%	87 %	74 %	92 %	84 %
CO-Gehalt	mg/Nm ³	157	1364	269	1574
NO _x -Gehalt	mg/Nm ³	260	356	200	194
Ges.C-Gehalt	mg/Nm ³	3	45	6	56
Volumenstrom durch Abscheider	Bm ³ /h	182	168	283	240
Abgasgeschwindigkeit in Abscheider	m/s	0,5	0,4	0,8	0,7
Verweilzeit in Abscheider	s	2,1	2,6	1,2	1,4
Temp. nach Feuerung	°C	132	102	127	108
Temp. nach Abscheider	°C	107	87	102	84
Brennstoffmassenstrom	kg/h	20	9	30	18
Anliegende Spannung an Hochspannungselektrode	kV	15,4		15,6	
Verfügbarkeit des Abscheiders	%	92		95	

Aus den erhaltenen Daten und Erfahrungen konnten weiterhin Rückschlüsse gezogen werden auf das Betriebsverhalten und die Langzeiteignung des Elektroabscheiders. So ließen die konstant und stabil anliegende Spannung und eine Verfügbarkeit von bis zu 95 % im Prüfstand und während der Feldmessungen auf eine sehr geringe Störanfälligkeit im betrachteten Zeitraum schließen.

Der Stromverbrauch kann bei einer benötigten Leistung von 20 W bis 47 W im Betrieb als annähernd vernachlässigbar betrachtet werden. Bezüglich der Reinigungshäufigkeit ist noch Optimierungspotenzial gegeben. Hier wäre zu untersuchen, ob ein manuelles Auslösen des Reinigungsaktuators im wöchentlichen Intervall ausreichend ist, oder ob zusätzlich eine manuelle Reinigung der Abscheideelektroden in diesem Rhythmus notwendig wäre. Dies würde sich entsprechend auf die Bewertung der Bedienerfreundlichkeit und den Reinigungsaufwand auswirken.

Mit Ausnahme des Auslösens der automatischen Reinigung war jedoch keinerlei Eingreifen des Bedieners erforderlich, somit kann die Nutzerfreundlichkeit in der bisherigen Konfiguration als relativ hoch eingestuft werden. Insbesondere durch eine Anpassung der Regelungsstruktur des Abscheiders an den Betriebszustand der Feuerung (beispielsweise durch eine automatische Reinigung des Abscheiders gleichzeitig mit der automatischen Wärmetauscher-Abreinigung) kann ein noch stabilerer Betrieb sichergestellt und ein noch geringerer Bedienerinfluss erreicht werden.

Quellenverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSI-
CHERHEIT (2009): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-
Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanla-
gen – 1. BimSchV). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4, S. 5 – 72, ISSN
0720-2946
- [2] KOMMISSION ZUR REINHALTUNG DER LUFT (KRDL) IM VDI UND DIN-
NORMENAUSSCHUSS (2006): VDI 2066 Blatt 1: Messen von Partikeln. Staub-
messungen in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbela-
dung. November 2006. Berlin: Beuth, 111 Seiten
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2009): DIN EN 14774-3: Feste
Biobrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 3: Was-
sergehalt in allgemeinen Analysenproben. Deutsche Fassung EN 14774-3:2009.
Februar 2010. Berlin: Beuth, 8 Seiten
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2009): DIN EN 14775: Feste Bio-
brennstoffe – Bestimmung des Aschegehaltes. Deutsche Fassung EN 14775:2009.
November 2012. Berlin: Beuth, 12 Seiten
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2009): DIN EN 14918: Feste Bio-
brennstoffe – Bestimmung des Heizwertes. Deutsche Fassung EN 14918:2009.
April 2010. Berlin: Beuth, 61 Seiten

Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

1	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
2	Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
3	Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
4	Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzcentralheizungsanlagen kleiner Leistung
5	Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
6	Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
7	Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
8	Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
9	Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
10	Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
11	Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
12	Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
13	Getreidekörner als Brennstoff für Kleinfeuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
14	Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
15	Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
16	Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
17	Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
18	Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
19	Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis
20	Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung

21	Kleine Biomassefeuerungen – Marktbetrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
22	Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
23	Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
24	Charakterisierung von Holzbriketts
25	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
26	Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
27	Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
28	Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
29	Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
30	Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
31	Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufe I und II
32	Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
33	Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
34	Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
35	Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstandsuntersuchungen
36	Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
37	Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
38	Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen

