

Entwicklung eines Entstaubungsaggregates für Abgase aus Holz-Kleinf Feuerungsanlagen



Bayerisches Landesamt
für Umweltschutz



Augsburg, 2004

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Bearbeitung: Ingenieurbüro Oskar Winkel
Talweg 3
92331 Parsberg-Rudenshofen



Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.)

Entwicklung eines Entstaubungsaggregates für Abgase aus Holz-Kleinf Feuerungsanlagen, Projekt Nr. 1331, Abschlussbericht, Augsburg, 2004

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

Dieses Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Allgemeines | 3 |
| 2 Vorbetrachtungen | 3 |
| 2.1 Vorhabensziel und Stand der Technik | 3 |
| 2.2 Aufgabenstellung | 6 |
| 2.3 Patentrecherche und Innovation | 7 |
| 2.4 Standort der Teilstrom-Versuchsanlage | 8 |
| 3 Anlagenauslegung | 10 |
| 3.1 Teilstrom-Versuchsanlage | 10 |
| 3.2 Abscheidergestaltung | 10 |
| 3.2.1 Filtermaterialauswahl | 10 |
| 3.2.2 Filterpatrone | 11 |
| 3.2.3 Injektorsedimentationseinrichtung | 12 |
| 4 Fertigung und Montage der Versuchsanlage | 13 |
| 4.1 Abscheider | 13 |
| 4.2 Elektroanlage und Steuerung | 16 |
| 4.2.1 Funktionsbeschreibung an Hand des Stromlaufplanes | 17 |
| 4.2.2 Kurzanleitung zur Bedienung | 18 |
| 5 Inbetriebnahmeuntersuchungen | 21 |
| 5.1 Art und Umfang der Untersuchungen | 21 |
| 5.2 Aerodynamisches Verhalten | 22 |
| 5.3 Untersuchungen zum Energieverbrauch | 23 |
| 5.3.1 Druckluftverbrauch des Regenerierungssystems | 23 |
| 5.3.2 Regenerierungs- und Gesamtleistung Filterelement | 26 |
| 5.3.3 Gesamtleistung des Filternden Abscheiders | 29 |
| 5.3.4 Gesamtenergieverbrauch | 30 |
| 5.3.5 Ventilatorleistung | 31 |
| 5.4 Temperaturverhalten der Filteranlage | 32 |
| 6 Anlagenerprobung | 34 |
| 6.1 Brennstoff und Rohgasparameter | 34 |
| 6.2 Messplan und Vorgehen bei der Anlagenerprobung | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3 Durchführung der Messungen | 38 |
| 6.3.1 Eingesetzte Messtechnik | 38 |
| 6.4 Betriebsbedingungen der Kesselanlage | 41 |
| 6.5 Betriebsüberwachung der Anlage und Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen | 42 |
| 6.5.1 Einfahrverhalten des Abscheiders | 42 |
| 6.5.2 Dauererprobung | 43 |
| 6.6 Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen | 46 |
| 6.7 Partikelgrößenverteilung | 57 |
| 6.8 Filterstaub und Staubinhaltsstoffe | 60 |
| 6.8.1 Korngrößenverteilung der Bunkerstäube | 60 |
| 6.9 Staubinhaltsstoffe | 61 |
| 6.10 Ergebnisse der Gasmessungen | 62 |
| 7 Außerbetriebnahme/ Festigkeit der Filterelemente | 67 |
| 7.1 Demontage, Staubablagerungen im Rohgasraum | 67 |
| 7.2 Kontrolle der Filterelemente | 68 |
| 7.2.1 Alterungsverhalten des Filtermaterials | 71 |
| 8 Bewertung der Erprobungsergebnisse und Zusammenfassung | 72 |
| 9 Literatur | 73 |
| 10 Anhang | 75 |
| 10.1 Mess- und Berechnungsergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen im Rohgas | 75 |
| 10.2 Protokolle der Impaktormessungen | 78 |
| 10.3 Messprotokolle der Niederdruckimpaktormessungen – Rohgasmessungen | 82 |
| 10.4 Messprotokolle der Niederdruckimpaktormessungen – Reingasmessungen | 85 |
| 10.5 Protokolle der Partikelgrößenanalysen der Filterstäube (Bunker) | 88 |
| 10.6 Messstellenschema der Versuchsanlage | 91 |
| 10.7 Messprotokolle zur Bestimmung des Druckluftverbrauches | 92 |
| Prüfbericht LfU Augsburg | 94 |

1 Allgemeines

Vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg, wurde mit Vertrag vom 20.10.2003 das Ingenieurbüro Oskar Winkel mit der Durchführung des Vorhabens:

Entwicklung eines Entstaubungsaggregates für Abgase aus Holz-Kleinfeuerungsanlagen (Projekt 1331)

beauftragt.

Bezüglich der meßtechnischen Ausrüstung und Durchführung arbeitete das Ingenieurbüro Oskar Winkel mit dem Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden - Gemeinnützige Gesellschaft mbH zusammen.

Im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens sind Untersuchungen an einer im Heizhaus des Sibyllenbades in Neualbenreuth aufzustellenden Teilstrom-Versuchsanlage durchzuführen. In der Versuchsanlage waren im Kurzzeit- und Dauerbetrieb verfahrenstechnische Neuerungen für die Rauchgasreinigung bei Holz-Kleinfeuerungen zu erproben und zu optimieren.

2 Vorbetrachtungen

2.1 Vorhabensziel und Stand der Technik

Die EU-Mitgliedsstaaten haben sich verpflichtet, während der nächsten zehn Jahre Ziele für den künftigen Inlandsverbrauch von Energie aus regenerativen Energieträgern festzulegen und jährlich zu erfüllen. Maßstab für die Zielsetzung sind das Weißbuch der EU-Kommission und die Kyotoverpflichtungen (EU-Kommission 2000a).

Der Beitrag der Biomasse zur Deckung des EU-Energieverbrauchs umfasste 1998 etwa 3% (EU-Kommission 2000b). Deutlich über diesem EU-Durchschnitt liegt ihr Anteil in Österreich (12 %), Schweden (18 %) und in Finnland (23 %). Beim überwiegenden Teil der energetisch genutzten Biomasse handelt es sich um Schwachholz und Waldrestholz aus der Forstwirtschaft, Industrierestholz aus der Holzwirtschaft und Altholz.

In Deutschland trägt die Biomasse derzeit nur zu etwa rd. 1 % - bezogen auf den fossilen Primärenergieeinsatz in Höhe von 14,3 EJ im Jahr 1998 - zur Deckung der Energienachfrage bei (Nitsch et al. 2001). Es handelt sich dabei überwiegend um Schwachholz, Waldrestholz, Industrierestholz und Altholz.

In Deutschland könnte die Biomasse, respektive die festen biogenen Brennstoffe, aus heutiger Sicht schätzungsweise bis zu ca. 22 Mio. t RÖE zur Energieversorgung beitragen, ohne dass ökologische Nachhaltigkeitsaspekte wesentlich verletzt würden (Nitsch et al. 2001). Dieses Potential wird bislang kaum ausgeschöpft. Die wichtigsten noch weitgehend ungenutzten heimischen Bioenergieträger sind Schwach- und Waldrestholz, Stroh und auf Stilllegungsflächen angebaute Energiepflanzen.

Bei der thermischen Nutzung von Biomassen fällt ein Rauchgas an, was besonders feine Flugstaubpartikel in größerer Zahl enthält. Epidemiologische Untersuchungen verweisen darauf, dass zwischen der Aufnahme von Feinpartikeln aus der Luft und der Zunahme von Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen der Bevölkerung Zusammenhänge bestehen. Daraus folgend wurden in entsprechenden Richtlinien [1, 2, 3] für Staub und Partikel die Grenzwerte abgesenkt. Besonderes Aufsehen hat darin der Staubwert ausgelöst. Für den nach der maßgeblichen Größe PM₁₀ genannten Parameter (aerodynamischer Durchmesser 10 Mikrometer) soll bis zum Januar 2005 der Wert von 50 µg/m³ nicht überschritten werden. Nur 35 Überschreitungen sind gestattet. Als Jahresgrenzwert ist daneben 40 µg/m³ vorgesehen. Bis 2010 soll die Zahl der Überschreitungen des Grenzwertes auf maximal 7 begrenzt sein, bei einem Jahresgrenzwert von 20 µg/m³. Fest steht, dass auch in Deutschland erhebliche Anstrengungen nötig sind, um die Werte zu erreichen. Dementsprechend ergeben sich auch neue Anforderungen für die Staubabscheidung bei technischen Prozessen.

Während die Industrie bei Großanlagen, z. B. Müllverbrennungsanlagen, günstige verfahrenstechnische Lösungen zur Emissionsminderung bereits eingeleitet hat und strenge Emissionsbegrenzungswerte einhält, sind Rauchgasreinigungen bei der Vielzahl von Kleinanlagen zur Energieerzeugung noch kaum im Einsatz.

Aussichtsreich für den niedrigen Partikelbereich ist das Verfahren der Staubfiltration. Es gibt jedoch gerade in den Anlagen der Biomasse-Verbrennung noch keine wartungsarm arbeitenden Filter mit hoher Abscheideleistung. Gesamtziel des Vorhabens ist daher die Weiterentwicklung des Verfahrens mit den Randbedingungen:

- Einsatz eines nicht brennbaren Filtermaterials
- geringer Druckverlust auch bei dem im Rauchgas vorhandenen sehr feinen Flugstaub
- Unempfindlichkeit gegenüber dem insbesondere beim Anfahrprozess zu durchfahrenden Taupunkt.

Der Stand der Rauchgasreinigung für die thermische Nutzung von Biomassen bei kleinen Kesselanlagen lässt sich wie folgt darstellen:

- Die in Absetzkammern und Fliehkraftabscheidern genutzten Trägheitskräfte können die im Rauchgas vorhandenen feinen Partikel nicht im ausreichendem Maße zur Abscheidung bringen. Außerdem sind die Abscheider relativ groß und haben einen dementsprechenden Platzbedarf.
- Nassabscheider kommen zum Einsatz, wenn neben der Reinigung von Rauchgasen eine Brennwertnutzung erfolgen soll. Für kleinere Anlagen sind die Aufwendungen für die Trübewirtschaft jedoch zu hoch. Hinzu kommen Korrosionsprobleme an den Anlagenbauteilen.
- Bei größeren Anlagen sind Elektrofilter im Einsatz, die bei ordnungsgemäßer Auslegung auch Feinstaubpartikel gut abscheiden, ihr Einsatz ist aber mit erheblichen Kosten und einem hohen Platzbedarf verbunden.
- Sehr gute Abscheideleistungen für den Feinstaub in Rauchgasen können mit Filteranlagen erreicht werden. Sie haben jedoch auch erheblichen Platzbedarf und sind bei kleineren Rauchgasreinigungsanlagen bisher noch nicht üblich. Als Nachteile treten insbesondere bei Schlauchfiltern mit textilen Filtermedien auf:
 - die Gefahr der Zerstörung des Filtermaterials durch Funkenflug in das Filter hinein (Abhilfe wird durch die Vorabscheidung von glühenden Partikeln mit Zyklonen erreicht - erheblicher Apparat-Aufwand und hoher zusätzlicher Druckverlust)
 - das mit relativ hohem Druckverlust verbundene Verstopfen von textilen Filtermedien durch die bei der Biomassefeuerung extrem kleinen Partikel der Flugasche
 - das bei der üblichen Druckimpulsabreinigung schlechte Absinken des abgereinigten Staubes in den Bunker (infolge der geringen Partikelgrößen) und der damit nach der Abreinigung sofort wieder ansteigende Druckverlust am Filterelement
 - dass beim Anfahren im kalten Zustand des Filters Kondensat anfällt, welches im Filtermedium Verstopfungen verursacht und im Zusammenhang mit den Eigenschaften der Flugasche zu Verkrustungen am Filtermaterial führen kann
 - das Durchfahren des Taupunktes im Anfahrzustand führt in hohem Maße infolge der sauren Bestandteile des Rauchgases zu Korrosionen am Abscheider.

Als in der letzten Zeit speziell für Biomasse-Feuerungen entwickelte Abscheider können genannt werden:

- ein zweistufiger Heißgasabscheider (Entwicklung des ILK Dresden gGmbH mit Fliehkraftvorabscheidung und integrierten Filterelementen), welcher eine Trennung des Flugstaubes in schwermetallbelastete Feinstaubfraktion $<1 \dots 2 \mu\text{m}$ Korndurchmesser und in die Grobstaubfraktion vornimmt
- ein Partikelabscheider einer schwedischen Firma mit rotierendem Filterelement, bei welchem durch die Fliehkräfte der abgeschiedene Staub wieder vom Filterelement entfernt werden soll.

Beide Systeme haben Nachteile. Während das erstere einen erheblichen Raumbedarf hat (es sollte dort zum Einsatz kommen, wo eine Flugaschetrennung sinnvoll ist), muss bei der Variante mit rotierendem Filterelement erwartet werden, dass Dichtheitsprobleme und Festigkeitsprobleme am Filterelement auftreten werden.

2.2 Aufgabenstellung

Als aussichtsreich für die Rauchgasreinigung bei kleineren Kesselanlagen wird aufbauend auf bereits vorliegende Erfahrungen und Entwicklungen der Fa. Winkel bei der Rauchgasfilterung und des ILK Dresden gGmbH bei der Entwicklung von Filtermedien und Abscheidern folgendes Konzept für Filternde Abscheider bei der Biomasse-Verbrennung vorgesehen:

- Einsatz von Filterpatronen mit plissiertem Filtermaterial (große Flächen bei kleinem Raumbedarf)
- Verwendung von neuartigem metallischem, nicht brennbarem Filtermaterial
- online-Impulsabreinigung mit Druckluft (mindestens 2-VentilAusführung, druckverlustgesteuert)
- Einsatz eines Verdrängungskörpers in der Filterpatrone, um eine intensivere Abreinigung zu erhalten und den Druckverlust der Filterpatronen zu vermindern
- Ausbildung der Verdrängungskörper als Heizeinrichtung, um die Filterpatronen vor dem Anfahren aufheizen zu können (Vermeidung kritischer Taupunktunterschreitungen)
- Einsatz einer Injektorsedimentationseinrichtung im Rohgasraum, um die Abführung des abgereinigten Staubes in den Bunker zu beschleunigen (kann bis 30 % Druckverlusteinsparung bringen)

- Verwendung eines Heißgasventilators (nach dem Filter angeordnet), um den Druckverlust des Filters auszugleichen.

Zur Realisierung dieses Konzeptes soll eine Versuchsanlage konzipiert, konstruiert und an einer Holzhackschnitzel / Rinde-Verbrennungsanlage im Teilstrom installiert werden.

Die Teilstromversuchsanlage ist so mit BMSR-Technik auszurüsten, dass ein Dauerbetrieb möglich ist. Die Anlage soll messtechnisch überwacht werden (kontinuierlich). Emissionsmessungen bei der Inbetriebnahme, nach dem Einfahren der Anlage und nach Abschluss der Dauererprobung sollen den Nachweis der Wirksamkeit bringen. Insbesondere ist zu klären, ob eine elektrische Vorheizung der Filterelemente die Zuverlässigkeit des Filters (Durchfahren des Taupunktes) wesentlich verbessern kann.

2.3 Patentrecherche und Innovation

Die Patentrecherche zum Stand der Technik wurde mittels PATOS-CD-ROM für den Zeitraum der letzten 10 Jahre durchgeführt. Für die Gestaltung einer Rauchgasreinigung in dem oben dargestellten Konzept wurden keine störenden Fremdpatente gefunden.

Der Erfolg des neugestalteten Filternden Abscheiders soll auf der Basis der Kombination von metallischem Filtermaterial in plissierter Form mit einem beheizbaren Verdrängungskörper und im Rohgasraum angebrachten Blasdüsen zur Realisierung des Prinzips der Injektorsedimentation basieren. Der neue Filter wird daher

- geringeren Platzbedarf
 - niedrigeren Druckverlust als Vergleichsfilter
 - geringere Taupunktanfälligkeit
- haben.

Das technische Risiko besteht darin, dass

- der anfallende Staub sehr fein ist, aber auch Unverbranntes enthalten kann
- im Teillastbereich eine ungünstige Rauchgaszusammensetzung auftreten kann
- das ausgewählte Filtermedium nicht den Anforderungen hinsichtlich der Abscheideleistung entspricht

und damit der erwartete Effekt der Rauchgasreinigung gemindert wird.

2.4 Standort der Teilstrom-Versuchsanlage

Das Heizhaus steht auf einer Anhöhe ca. 500 m vom Kurhaus Sibyllenbad entfernt. Das Bild 2.4-1 zeigt das Gebäude des Heizhauses und das Lager für die zu verbrennenden Holzhackschnitzel und Rindenbestandteile.



Bild 2.4-1: Heizhaus des Kurbetriebes Sibyllenbad

Die hier betriebene 3000 KW-Anlage hat zur Rauchgasreinigung einen Multi-Zyklon. Eine nachgeschaltete Rauchgaskondensationsanlage sollte die Feinstaubabscheidung verbessern, wird aber wegen starker Korrosionsschäden nicht mehr betrieben. Die Teilstrom-Versuchsanlage wird auf der 1. Etage angeordnet. Bild 2.4-2 zeigt den Standort.



Bild 2.4-2: Standort der Teilstromversuchsanlage im Heizhaus

Der Rauchgasteilstrom wird direkt nach dem Kessel an einer Revisionsluke entnommen und über eine Rohgasmessstrecke dem Filternden Abscheider zugeführt. Nach oben verlässt das Rauchgas den Abscheider, wobei in einer anschließend angeordneten waagerechten Messstrecke die Reingasparameter ermittelt werden. Über einen Heißgasventilator, der auch den Drucksprung der Teilstromanlage ausgleicht, wird das gereinigte Rauchgas dem Rauchgaskanal ebenfalls über eine Revisionsluke wieder zugeführt.

Die Anlage 1 zeigt die Anordnung der Teilstromanlage mit ihren einzelnen Baugruppen als Projektzeichnung.

3 Anlagenauslegung

3.1 Teilstrom-Versuchsanlage

Die wichtigsten Auslegungsparameter für die Versuchsanlage sind:

| | |
|---------------|---|
| Gasdurchsatz: | $V_B \leq 400 \text{ m}_B^3/\text{h}$ bei |
| | $t = 180 \text{ }^\circ\text{C}$ |

(entspricht einer Kesselleistung von ca.150 kW)

| | |
|---|--|
| Maximale Temperatur: | $t_{\text{Max}} \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Anzahl der Patronen: | 4 Stück |
| Abreinigung: | 4-6 bar, online, jeweils 1 Patrone |
| Strömungsgeschwindigkeit: | 14 m/s |
| Rohrdurchmesser (roh- und reingasseitig) | $\varnothing 100 \text{ mm}$ |
| Unterdruck am Kesselende | 35 Pa |

Die Teilstromversuchsanlage soll nur bei ordnungsgemäßem Betrieb des Kessels zugeschaltet werden. Das Zu- und Abschalten erfolgt über zwei dichtschießende Klappen am Ein- und Austritt der Rohrleitungen. Der Rauchgasdurchsatz wird über den Frequenzumrichter des Heißgasventilators geregelt. Um Korrosionsschäden zu vermeiden, ist eine Komplettisolierung (80 mm dick, Mineralfasern, mit Zink- und Alublech abgedeckt) vorzunehmen, und Falschluffeinbrüche sind zuverlässig zu unterbinden.

3.2 Abscheidergestaltung

3.2.1 Filtermaterialauswahl

Zur Herstellung von Filterpatronen mit großen Filterflächen für die Rauchgasreinigung wird ein formstabiles, gut plissierbares und temperatur- bzw. korrosionsbeständiges Filtermaterial benötigt. Zwei Möglichkeiten boten sich nach den Erfahrungen der Fa. Winkel und des ILK nach ersten Betriebseinsätzen bzw. Laborversuchen mit VA-Geweben an:

- Der Einsatz von engmaschigen Filtergeweben aus Edelstahl.

Das Filtermaterial PZ 17 wurde ausgewählt, weil es

- eine Materialstärke von 210 μm (Stabilität) hat
- geringere Druckverluste als TD 15 und OTD 25 aufweist
- gute Abscheideleistung für Mikro-Calcilin zeigte.

Umfangreiche ILK-Untersuchungen am Laborprüfstand nach VDI 3926 und Erfahrungen der Fa. Winkel aus Pilot- und Betriebsanlagen u. a. in einem Krematorium, gaben die Sicherheit, daß das Filtermaterial PZ 17 als Standardmaterial zu wählen war.

Bei Reingasstaubgehalten $\leq 1 \text{ mg/m}^3$ wurden Standzeiten von ca. 3 Jahren erreicht. Die dünnen Gewebe werden beidseitig durch gröbere Gitter gehalten. Erfahrungen bei der Herstellung der Heißgasgewebe und Heißgasfilterpatronen liegen bei Spezial-Herstellern vor.

- Die Verwendung eines neuartigen Filtermaterials aus einem Edelmetallgrobgritter und beidseitig aufgelegten hitzebeständigen Fasern, welche durch das aqua-jet-Verfahren fest miteinander verbunden werden. Auch hierzu gibt es bereits Erfahrungen aus einer Pilotanlage in der Industrie (Abfallverbrennungsanlage), die positiv sind. Gegenwärtig besteht bereits die Produktionsaufnahme des neuen Materials.

Die Teilstromversuchsanlage wurde auch auf den Einsatz dieses engmaschigen Filtergewebes ausgerichtet und kann sehr bald alternativ hiermit bestückt werden. Etwa bei extremen Anforderungen an geringst mögliche Reingasstaubwerte.

3.2.2 Filterpatrone

Die Filterpatrone (Bild 3.2.-1) hat folgende Parameter:

Material Edeltstahlgewebe 973130, PZ 17, mit Stützgewebe
 alle Metallteile aus Edelstahl 1.4301 (Temperaturbeständigkeit bis 400 °C)
 FP 175/150 mm Ø, 1305 mm lg.
 Filterfläche 2,7 m².

Der Verdrängungskörper ist mittig in der Filterpatrone angeordnet und hat gleichzeitig die Funktion des Erhitzers:

| | |
|--------------------------------|----------------------------|
| Rohrdurchmesser | 50 mm |
| Länge | 1200 mm |
| maximale Oberflächentemperatur | 700 °C |
| Werkstoff | X5CrNi18.10 DIN 1.4301. |
| elektrische Leistung | 2500 Watt |



Bild:3.2-1 Filterpatrone

3.2.3. Injektorsedimentationseinrichtung

Um die Sedimentation des abgereinigten Staubes in den Bunker zu verbessern, wird eine Einrichtung am Kopf der Patronen installiert, die gleichzeitig mit dem Blasstrahl der Impulsabreinigung (Düsendurchmesser 8 mm, Abstand zur Patrone 180 mm) betätigt wird. Sie erzeugt 8 am Außenmantel der Patronen nach unten gerichtete Blasstrahlen.

Die Einrichtung zur Injektorsedimentation kann bei Filterpatronen eine Energieeinsparung je nach Staubart bis zu 30 % erbringen. Die Druckluft-Impulse lösen den anhaftenden Staub von der Filteroberfläche, der in der Regel größte Staubanteil folgt jedoch danach unmittelbar wieder der Anströmung auf das Filtergewebe. Durch den ringförmigen direkt nach unten gerichteten Blasstrahl um die Filterpatrone erfolgt in jedem Falle ein höherer Anteil des abgelösten Staubes nach unten in Richtung Staubsammelbehälter, der wieder am Filtergewebe ankommende Anteil ist entsprechend geringer mit dem Ergebnis, daß weniger Abreinigungen erforderlich werden. Hält man die Abreinigungs-Intervalle gleich, ist dagegen ein geringerer Patronendruckverlust möglich.

Weniger Abreinigungs-Druckluftimpulse machen sich im Energiebedarf besonders sparend bemerkbar. Allerdings kommt der günstige Effekt einer Injektorsedimentation mit gröber werdendem Staub erst zunehmend zum Tragen und verläuft entsprechend geringer mit feineren Staubfraktionen. Wie im Bericht mehrfach dargestellt, war der Rohgasstaub im vorliegenden Betrieb extrem fein.

4 Fertigung und Montage der Versuchsanlage

4.1 Abscheider

Entsprechend der konstruktiven Vorgaben wurden der Abscheider und die Rohrleitungsbauteile für die Versuchsanlage in Ausführung 1.4301 gefertigt. Dabei wurde der Abscheider weitgehend vormontiert, um den Aufwand auf der Baustelle zu minimieren. Die Filterelemente wurden allerdings als letztes in den Abscheider eingesetzt, um eine Beschädigung zu vermeiden und eine absolute Dichtheit des Anschlusses im Reingasraum zu gewährleisten. Bild 4.1-1 zeigt den fertig montierten Versuchsabscheider im Heizhaus des Sibyllenbades Neualbenreuth.

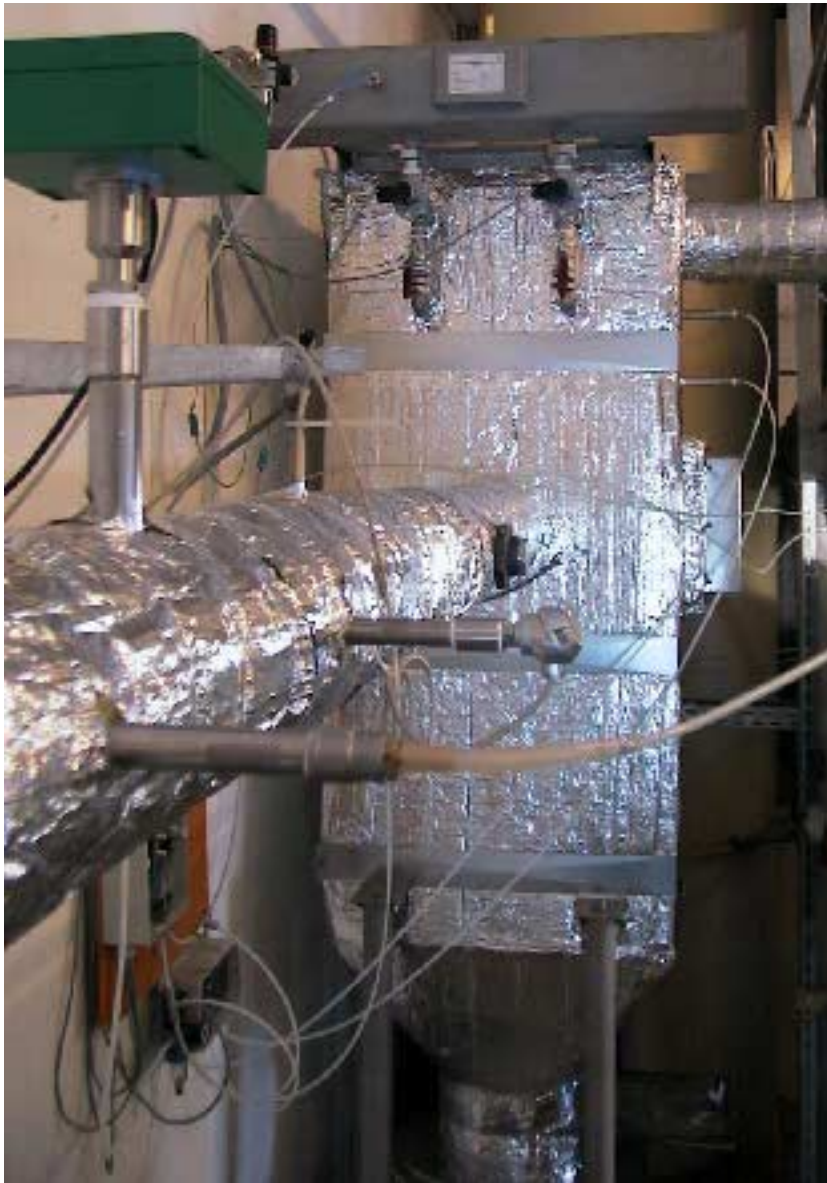


Bild 4.1-1: Isolierter Versuchsabscheider mit Rohgasmessstrecke



Bild 4.1-2: Versuchsabscheider mit geöffnetem Reingasraum und Reingasmessstrecke



Bild 4.1-3: Reingasraum mit Düsenlanzen



Bild 4.1-4: Versuchsabscheider, Regenerierungssystem, Ventilator

In Bild 4.1-2 werden Einzelansichten des Versuchsabscheiders und der Versuchsanlage gezeigt. Aus Bild 4.1-4 geht hervor, dass der Luftweg für die Regenerierung in jeweils 2 Düsenlanzen unterteilt wurde. Der untere Abgang für die Injektorsedimentationseinrichtung kann separat abgesperrt werden. Die beiden Druckluftspeicher weisen eine Druckfestigkeit von 8 bar bei maximal 50 °C aus.

Bild 4.1-5 zeigt den unteren Teil der Versuchsanlage mit dem Schaltschrank für den Frequenzumrichter und die Steuerung für die Heizpatronen. Oben auf der Bühne ist die Reingasmessstrecke angeordnet.



Bild 4.1-5: Versuchsabscheider mit Staubbunker, Schaltschrank und kontinuierlicher Betriebsmesstechnik

4.2 Elektroanlage und Steuerung

Für die Pilotanlage Biomassestaubabscheidung Sybillenbad war ein Schaltschrank für die Ansteuerung folgender Einheiten zu erstellen:

- 4 Heizpatronen 2,5 kW (400 V)
- 1 Ventilator (4,3 kW) über Frequenzumrichter angetrieben
- 1 Abreinigungssteuerung
- Kompressor/ Staubmessgerät.

Dabei sind folgende Steuerfunktionen zu realisieren:

- Zweipunktregelung der einzelnen Heizpatronen; Solltemperatur bis 450 °C, Hysterese bis 50 C
- manuelle Steuerung der Ventilator Drehzahl, Einschaltung in Abhängigkeit von der Temperatur des Abscheiders
- Ansteuerung der Abreinigungssteuerung in Abhängigkeit von Kompressor und Ventilator
- Störabschaltung, wenn nach einer vorgegebenen Zeit die Abscheidertemperatur nicht erreicht wird.

4.2.1 Funktionsbeschreibung von Hand des Stromlaufplanes

Der Stromlaufplan und die schaltungstechnischen Unterlagen sind Bestandteil der Anlagendokumentation. Folgende Funktionen wurden realisiert und sind auf den Blättern der Dokumentation beschrieben:

- Blatt 1: Hauptschalter, gleichzeitig NOT-AUS, 24 V DC Stromversorgung für Schütze und Temperaturregler, unabhängige interne Servicesteckdose
- Blatt 2: Hauptschütz für Ein/Aus der Gesamtanlage, Ein nur bei rückgesetzter Störung möglich
- Blatt 3: externe, über Hauptschütz geschaltene Steckdosen
- Blatt 4: Ansteuerung der Heizpatronen kontaktlos über Thyristorrelais
- Blatt 5: Frequenzumrichter für Ventilator; Drehzahl intern über Potentiometer vorgebar, „Ein“ über 10 K3, wenn die Abscheidertemperatur den am Regler 3/1 eingestellten Wert überschreitet.
- Blatt 6: Mit dem Einschalten des Hauptschützes wird der Kompressor eingeschalten.
- Blatt 7: Wenn Kompressor und Ventilator laufen, wird diese Abreinigungssteuerung aktiviert. Ein interner Schalter im Schrank erlaubt das manuelle Aktivieren unabhängig vom Hauptschütz unter der Bedingung, dass der Hauptschalter die Stellung „Ein“ hat.
- Blatt 8: Konfigurationsmodul für 8-kanaligen Regler
- Blatt 9: zweikanalige Reglermodule 1, 2 (Modulnummer im spannungslosen Zustand am Modul eingestellt) zur Temperaturregelung der Heizpatronen 1 – 4
- Blatt 10: zweikanalige Reglermodule 3, 4
- | | |
|------------------|--|
| Modul 3 Kanal 1: | Start des Frequenzumrichters Ventilator |
| Modul 3 Kanal 2: | Reserve, extern kurzgeschlossen, um Störanzeige zu verhindern |
| Modul 4 Kanal 1: | Blockieren aller Heizungen, wenn Reingastemperatur den voreingestellten Sollwert überschreitet |
| Modul 4 Kanal 2: | Temperaturanzeige für Vorabscheider |

Blatt 11: Störabschaltung der Anlage, wenn nach der am Zeitrelais voreingestellten Zeit die Reingastemperatur nicht erreicht ist. Störanzeige bis zum erneuten Einschalten der Anlage.

Selbthalterung der Störmeldung, für ein erneutes Einschalten muß entriegelt werden.

4.2.2 Kurzanleitung zur Bedienung

Bild 4.2-1 zeigt die Frontansicht des Schaltschranks. Mit Betätigung des Hauptschalters, der gleichzeitig als Not-Aus-Schalter fungiert, ist die Anlage betriebsbereit. Mit Betätigung des grünen Tasters erfolgt das Einschalten der Anlage. Gleichzeitig stehen auch die externen Steckdosen unter Spannung. Der Zustand „Ein“ wird durch eine grüne Anzeige signalisiert. Das Ausschalten der Anlage wird mit dem Hauptschalter realisiert. Tritt nach dem Einschalten eine Störung auf, d.h. nach der internen voreingestellten Zeit wird die Reingastemperatur nicht erreicht, schaltet sich die Anlage ab und die rote Störanzeige signalisiert diesen Zustand. Der Hauptschalter verbleibt dabei in Stellung „Ein“ und mit Betätigung des grünen Tasters ist ein sofortiges Wiedereinschalten möglich.

Sicherheitshinweis:

Bei allen Arbeiten an den Heizpatronen ist zu beachten, dass bedingt durch die Halbleiterrelais keine galvanische Trennung vorhanden ist und immer beide Sicherungen gelöst oder der Hauptschalter geöffnet werden müssen.

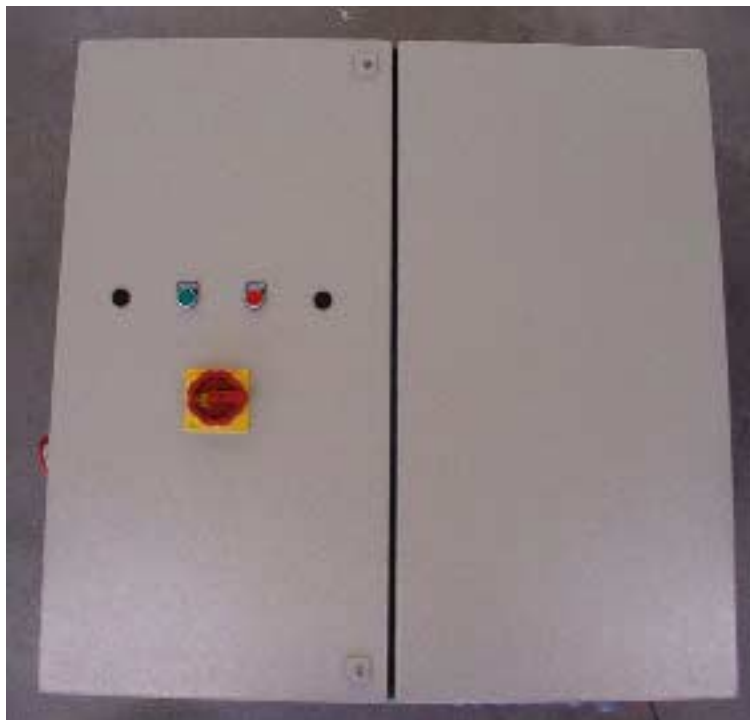


Bild 4.2-1: Frontansicht

4.2.2.1 Parametrierung Temperaturregler

Beim eingesetzten Temperaturregler vom Typ E52N handelt es sich um eine bis auf 32 Kanäle erweiterbare Reglerkombination mit gemeinsamer Kopfstation. Dieser Regler bietet vielfältige Parametriermöglichkeiten, die auszugsweise dargestellt sind. Das Gerät wird im vorliegenden Einsatzfall als Zweipunktregler mit variabler Hysterese eingesetzt, so dass an dieser Stelle eine verkürzte Darstellung der Parametrierung wiedergegeben werden soll. Bild 4.2-2 zeigt die Frontansicht des Anzeige- und Bediengerätes, über das die jeweiligen Kanäle konfiguriert werden.

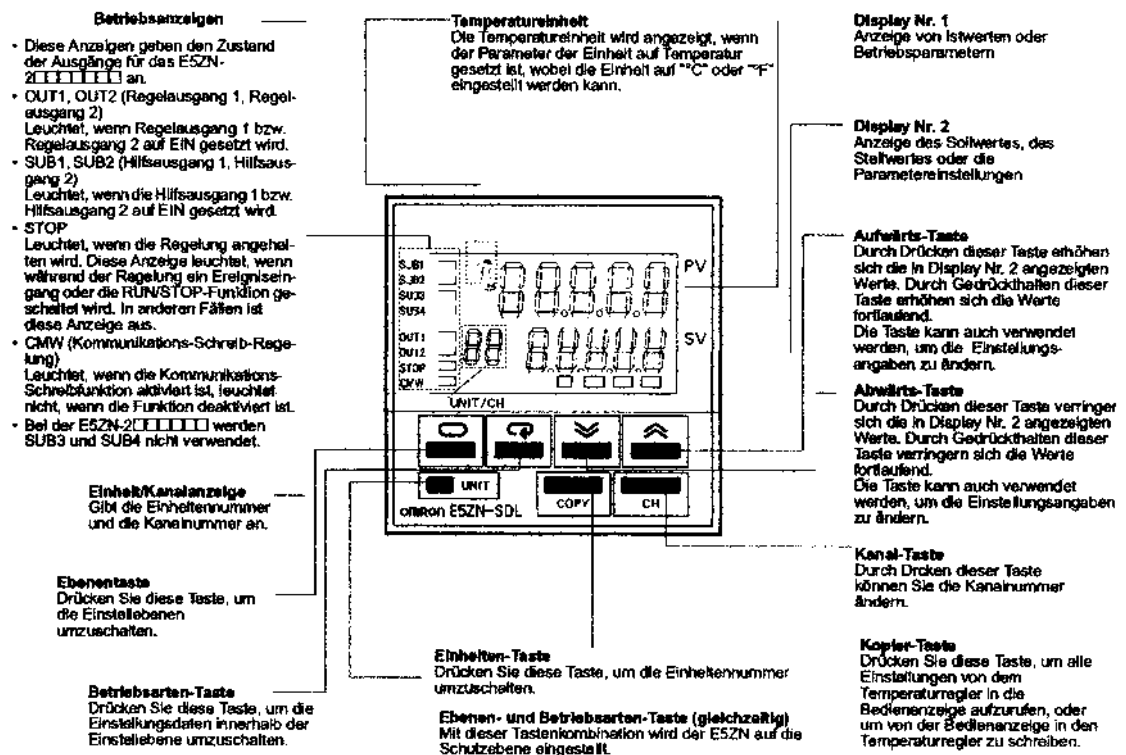


Bild 4.2-2: Frontansicht des Bedienteiles der Regler

Für die Zuordnung der Kanäle und Messstellen gilt:

| Unit | Chanel | Funktion | Fühler |
|------|--------|---------------------------|--------|
| 1 | 1 | Temperatur Heizpatrone 1 | THE |
| 1 | 2 | Temperatur Heizpatrone 2 | THE |
| 2 | 1 | Temperatur Heizpatrone 3 | THE |
| 2 | 2 | Temperatur Heizpatrone 4 | THE |
| 3 | 1 | Temperatur Abscheider | THE |
| 3 | 2 | Reserve | THE |
| 4 | 1 | Temperatur Reingas | PT100 |
| 4 | 2 | Temperatur vor Abscheider | PT100 |

4.2.2.2 Grundkonfiguration

Die Grundkonfiguration ist wie folgt durchgeführt.

Grundkonfiguration und Sollwert einstellen

Einheit und Kanal auswählen

1. \Rightarrow >3 s drücken bis Anzeige **in-t** erscheint; auf „0“
2. \Rightarrow **d – U** auf **C** $\hat{=}$ °C
3. \Rightarrow **SL – H** auf **850** (PT100) /**1300** (THE)
4. \Rightarrow **SC – L** auf **200**
5. \Rightarrow **Cutl** auf **onoF** $\hat{=}$ 2 Pk. Regler
6. \Rightarrow **orEu** auf **or-r** $\hat{=}$ pos. Regelung
7. \Rightarrow **Alt 1** auf **2**
8. \Rightarrow länger 1 s, kürzer 3 s drücken, kurz warten bis Werte angezeigt werden
9. Schaltpunkt einstellen
10. \Rightarrow , \Rightarrow **r – S** auf **rUu**, Anzeige **Stop** muss aus gehen
11. \Rightarrow 5 x bis Werte erscheinen

4.2.2.3 Verstellung von Sollwert und Hysterese

Das Gerät startet automatisch beim Einschalten der Anlage. Zum Verstellen des Sollwertes sind die Aufwärts- bzw. Abwärtstaste zu betätigen. Die Werte werden sofort übernommen. Zum Verstellen der Hysterese sind folgende Schritte auszuführen:

Hysterese einstellen:

1. Einheit + Kanal wählen
2. \Rightarrow kürzer 1 s drücken
3. \Rightarrow bis **HYS** drücken
4. gewünschte Hysterese einstellen
5. \Rightarrow kurz drücken, Wert ist übernommen

Nach jeder Verstellung von Soll- oder Hysteresewerten ist darauf zu achten, dass sich der Regler im „Run-Zustand“ befindet, d.h. die Anzeige „Stop“ nicht aktiv ist. Ansonsten ist gemäß 4.1 auf run zu schalten.

Bild 4.2-3 zeigt die Innenansicht des an der Versuchsanlage montierten Schaltschranks, in Bild 4.2-4 sind Einstellungen des Sollwertes für die einzelnen Sollwerte am Reglerbaustein dargestellt.

Vor Ort erfolgte eine Änderung in der Ansteuerung noch dahingehend, als dass über ein Schütz das Steuersignal des Rauchgasventilators der Hauptanlage eingeschleift wurde. Damit läuft die Versuchsanlage nur dann, wenn auch die Hauptanlage im Normalmodus betrieben wird. Bei Gluterhaltungsbetrieb schaltet der Rauchgasventilator, und damit auch die Versuchsanlage, ab.



Bild 4.2-3: Schaltschrank in angeschlossenem Zustand an der Versuchsanlage (Innen)



Bild 4.2-4: Reglerbaustein mit einzelnen Parametriereinstellungen für die Sollwerte von Heizstab(21), Rohgasraum (31) und Reingas (41)

5 Inbetriebnahmeuntersuchungen

5.1 Art und Umfang der Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen des neuartigen Abscheideaggregates geht es neben der Beurteilung der Emissionen von staub- und gasförmigen Stoffen vor allem auch um die energetische Optimierung des Systems. Die ist von entscheidender Bedeutung, da Filternde Abscheider gegenüber den bisher eingesetzten Zyklonabscheidern einen höheren Druckverlust aufweisen. Die Injektorsedimentation setzt an dieser Stelle an.

Das Verfahren ermöglicht eine Senkung des mittleren Druckverlustes und damit eine Verringerung der aufzuwendenden Energie für den Filtrationsprozess. Wichtig waren in diesem Rahmen die Untersuchungen zum Energieverbrauch des Abscheiders und des Regenerierungssystems, die im Rahmen der Inbetriebnahme durchgeführt wurden. Einen schematischen Überblick über die filtertechnischen Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens gibt Bild 5.1-1.

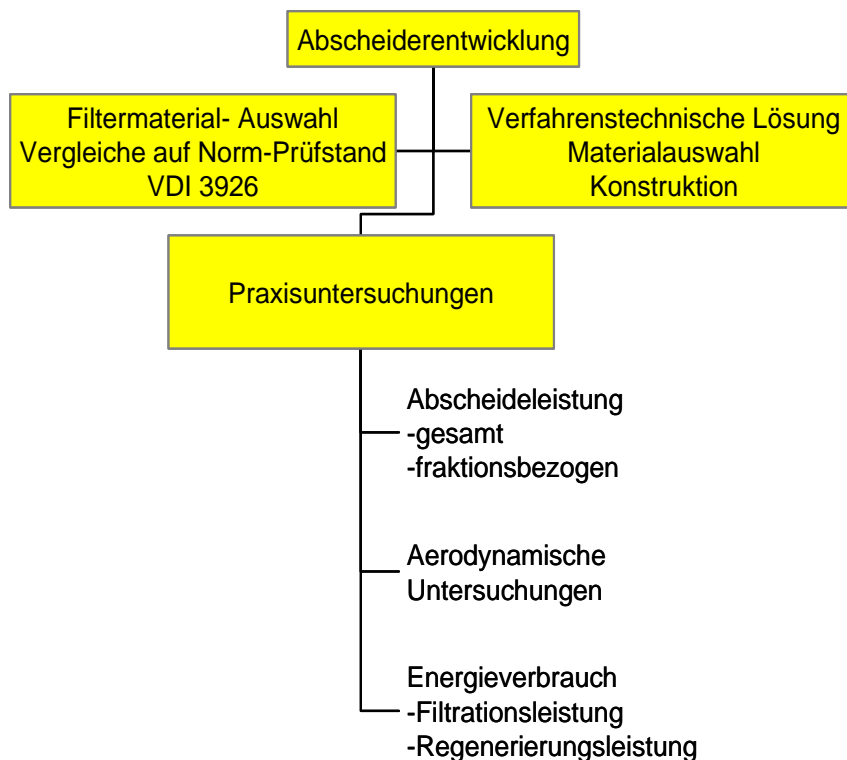


Bild 5.1-1: Schematische Darstellung der für die Abscheiderentwicklung und Erprobung notwendigen Schritte

5.2 Aerodynamisches Verhalten

Nach Fertigstellung der Anlage erfolgte die Inbetriebnahme mit ersten Untersuchungen zum aerodynamischen Verhalten und zum Energieverbrauch. Für Filternde Abscheider sind dies die wesentlichen Parameter, die für eine effiziente Betriebsweise zu betrachten sind. Insbesondere der Druckverlust der Filterelemente im Neuzustand ergibt im Vergleich zum Druckverlust in nachgelagerten Betriebsphasen eine Aussage zur Staubeinlagerung im Gewebe und zum Verschleiß des Filtermaterials.

In Bild 5.2-1 ist das Druckverlustverhalten der Filterelemente im Neuzustand bei Anlageninbetriebnahme dargestellt.

Es zeigte sich, dass die Druckverluste im angestrebten Betriebsbereich von 400 bis 450 Bm³/h zwischen 320 und 410 Pa, also sehr niedrig, lagen. Damit wurde zunächst eine Betriebsweise des Abscheiders bei einem Differenzdruck von 750 Pa avisiert.

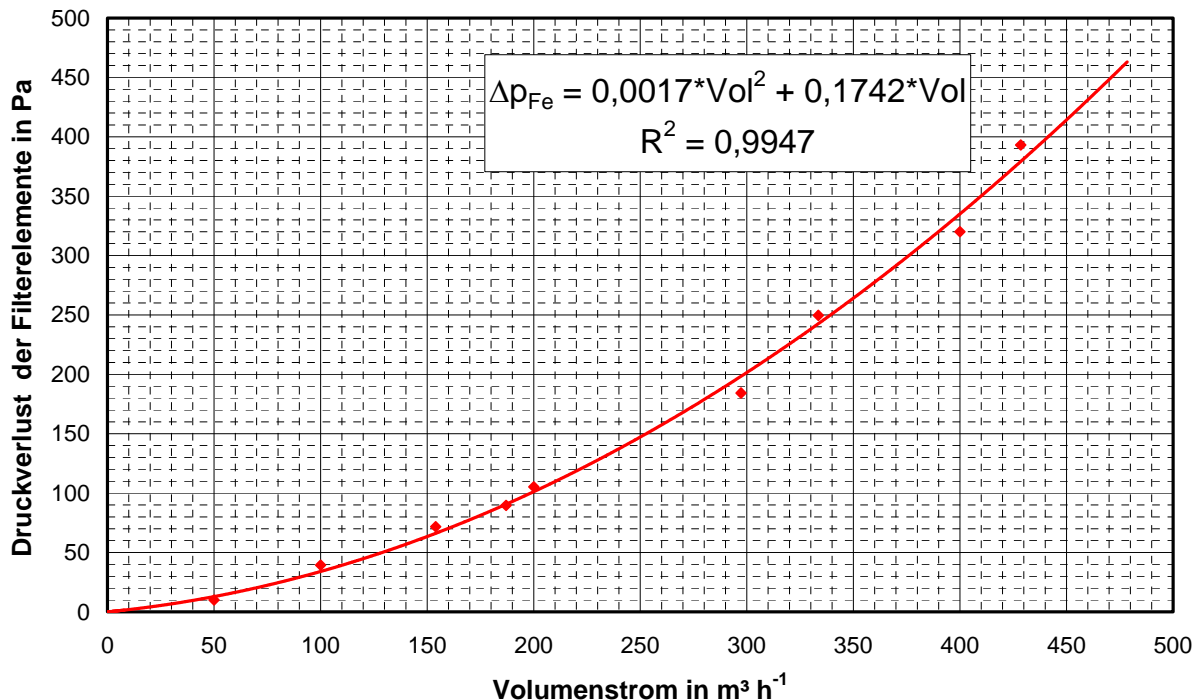


Bild 5.2-1: Druckverlustverhalten der Filterelemente im Neuzustand

Der Gesamtdruckverlust des Abscheiders liegt im Nennleistungsbereich um 200 Pa höher, als der Druckverlust am Filterelement. Dies zeigt, dass günstige Strömungsverhältnisse durch die Konstruktion erreicht werden konnten. Der Gesamtdruckverlust der Versuchsanlage beträgt einschließlich der Rohrleitungen rund 18 Hektopascal.

5.3 Untersuchungen zum Energieverbrauch

5.3.1 Druckluftverbrauch des Regenerierungssystems

Die Bestimmung des Druckluftverbrauches für das Regenerierungssystem erfolgte durch die Messung des Druckabfall im Druckluftspeicher durch den Druckluftimpuls. Der Druckluftspeicher war während der jeweiligen Messung durch das Schließen eines Kugelhahnes vom Druckluftnetz getrennt. Für jede der vier Druckluftventile wurde jeweils Messungen mit und ohne Injektorsedimentationseinrichtung durchgeführt.

Die Versuchsreihen erfolgten für die Überdrücke von 2, 3; 4 und 5 bar bei fest eingestellter Impulszeit von 220 ms.

Der Druckluftverbrauch für die Abreinigungsimpulse wird mit Hilfe einer Massenbilanz am Druckluftspeicher unter Berücksichtigung der thermodynamischen Grundgesetze für die

isentrope Zustandsänderung bestimmt. Damit ergeben sich die folgenden Gleichungen zur Berechnung des Druckluftverbrauches pro Impuls $V_{D,I}$.

$$V_{D,I} = \frac{m_{D,I}}{1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \quad (1)$$

$$m_{D,I} = \frac{V_K \cdot p_{R1}}{R \cdot T} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (2)$$

Die Versuchsergebnisse sind in 5.3-1 bis Bild 5.3-3 graphisch dargestellt.

Bild 5.2-1 zeigt den Druckluftverbrauch pro Impuls in Abhängigkeit vom Abreinigungsdruck.

Es ist erkennbar, dass bei zunehmendem Abreinigungsdruck die Druckluftmenge zunimmt.

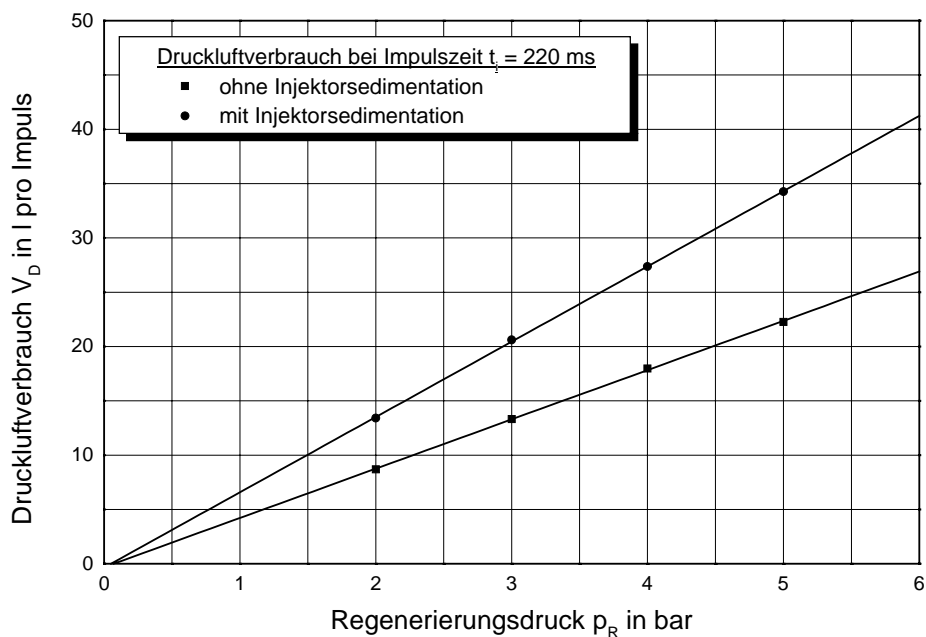


Bild 5.3-1: Druckluftverbrauch des Regenerierungssystems pro Impuls

In Bild 5.3-2 und Bild 5.3-3 wird die Abhängigkeit des Druckluftverbrauches von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse bei den Abreinigungsdrücken von 2 bar bis 5 bar angegeben.

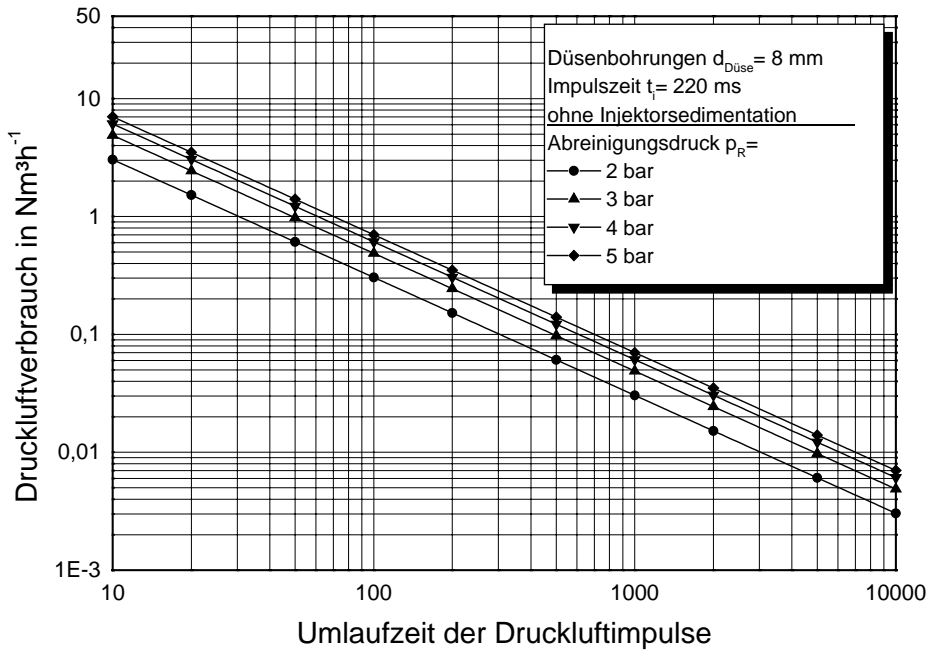


Bild 5.3-2: Druckluftverbrauch des Regenerierungssystems als Funktion der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für eine Abreinigung ohne Injektorsedimentation

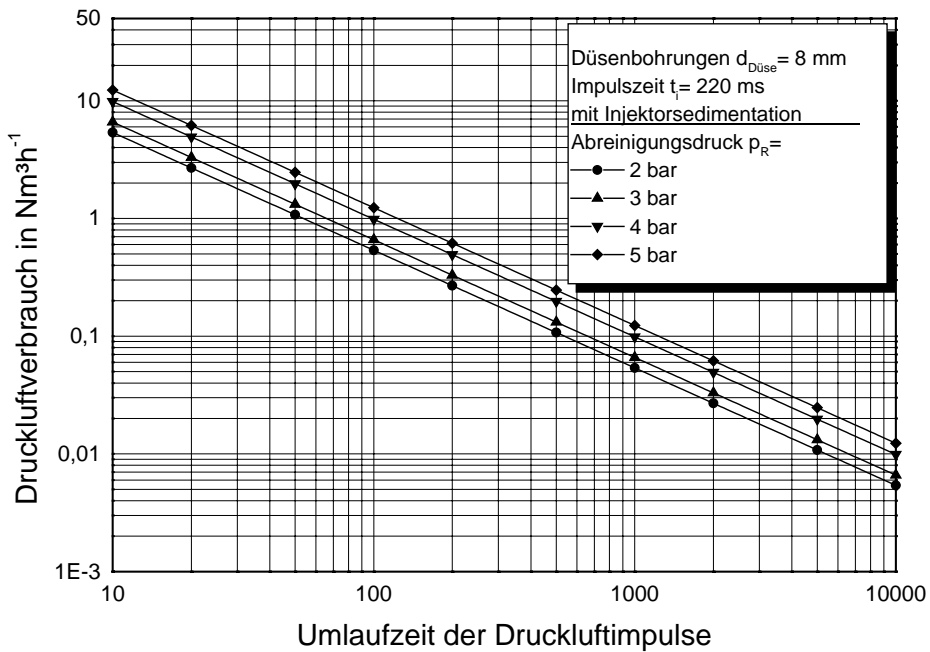


Bild 5.3-3: Druckluftverbrauch des Regenerierungssystems als Funktion der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für eine Abreinigung mit Injektorsedimentation

Die Umlaufzeit hat einen starken Einfluss auf den Druckluftverbrauch. Bei geringen Umlaufzeiten steigt der Druckluftverbrauch steil an. Eine Umlaufzeit unter 60 s ist praktisch nicht sinnvoll. Geringe Umlaufzeiten haben einen hohen Energieverbrauch zur Folge. Des Weiteren wirkt sich ein häufiges Abreinigen ungünstig auf die Reingasstaubkonzentration aus. Für eine energetisch optimale Betriebsweise müssen die minimalen Werte des Abreinigungsdruckes und ggf. der Impulszeit, sowie das Maximum der Umlaufzeit der Druckluftimpulse gefunden werden, bei denen eine stabile Betriebsweise des Filters bei günstigen Filterdruckverlusten gewährleistet wird.

5.3.2 Regenerierungs- und Gesamtleistung Filterelement

Die Regenerierungsleistung P_R ist von der für die Abreinigung benötigten Druckluftmenge abhängig; die Energie stellt der Kompressor in Form von Druckluft bereit. Für die Annahme einer isentropen Zustandsänderung ergibt sich die Regenerierungsleistung aus dem Produkt von benötigtem Druckluftmassenstrom \dot{m}_D und spezifischer Arbeitsübertragung e am Kompressor.

$$P_R = \dot{m}_D \cdot e \quad (3)$$

Der Druckluftmassenstrom ist von der Umlaufzeit der Druckluftimpulse und der Anzahl der geöffneten Ventile abhängig.

$$\dot{m}_D = \frac{n_V}{t_U} \cdot m_{D,i} \quad (4)$$

Die pro Impuls durchgesetzte Druckluftmenge $m_{D,i}$ wird nach Gleichung (2) berechnet.

Die spezifische Arbeitsübertragung am Kompressor e entspricht dem Arbeitsvermögen der im Druckluftkessel bereitgestellten Druckluft beim Ruhedruck vor dem Impuls.

$$e = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot R \cdot T \cdot \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (5)$$

Damit ergibt sich aus den Gleichungen (1) bis (5) die folgende, auf einer isentropen Zustandsänderung beruhende, Formel für die Regenerierungsleistung P_R .

$$P_R = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{V_K \cdot p_{R1} \cdot n_V}{t_U} \cdot \left[\left(\frac{p_{R1}}{p_b} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{R2}}{p_{R1}} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (6)$$

Die Regenerierungsleistung ist somit direkt proportional zum Kesseldruck und indirekt proportional zur Umlaufzeit der Druckluftimpulse.

Der Druckverlust der Filterelemente (bzw. des Abscheiders) und somit auch die Filtrationsleistung steigen näherungsweise linear mit der Filtrations- bzw. Umlaufzeit der Druckluftimpulse. Im Gegensatz dazu besteht bei der Regenerierungsleistung eine entgegengesetzte Abhängigkeit. Somit durchläuft der Graph der Gesamtleistung in Abhängigkeit von der Umlaufzeit ein Minimum. Dieser Extremwert stellt den Punkt mit dem geringsten Energieaufwand dar. In Bild 5.3-4 und Bild 5.3-5 wurde die Regenerierungsleistung des Systems in Abhängigkeit der Parameter - Abreinigungsdruck und Impulszeit - dargestellt. Daraus geht noch einmal der deutliche Anstieg der Regenerierungsleistung bei Verkürzung der Umlaufzeiten hervor.

In 5.3-6 ist die Regenerierungsleistung mit und ohne Injektorsedimentation für eine Abreinigungsdruck von 5 bar über der Umlaufzeit der Druckluftimpulse aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass die Erhöhung des Druckluftverbrauchs und der Regenerierungsleistung durch die Injektorsedimentation zwar deutlich, der Einfluss der Umlaufzeit aber wesentlich stärker ist. Daraus lässt sich auch das Energieeinsparungspotential erkennen – gelingt es durch den Einsatz der Injektorsedimentation größere Umlaufzeiten zu erreichen, sind deutliche Abschläge im Gesamtenergieverbrauch möglich.

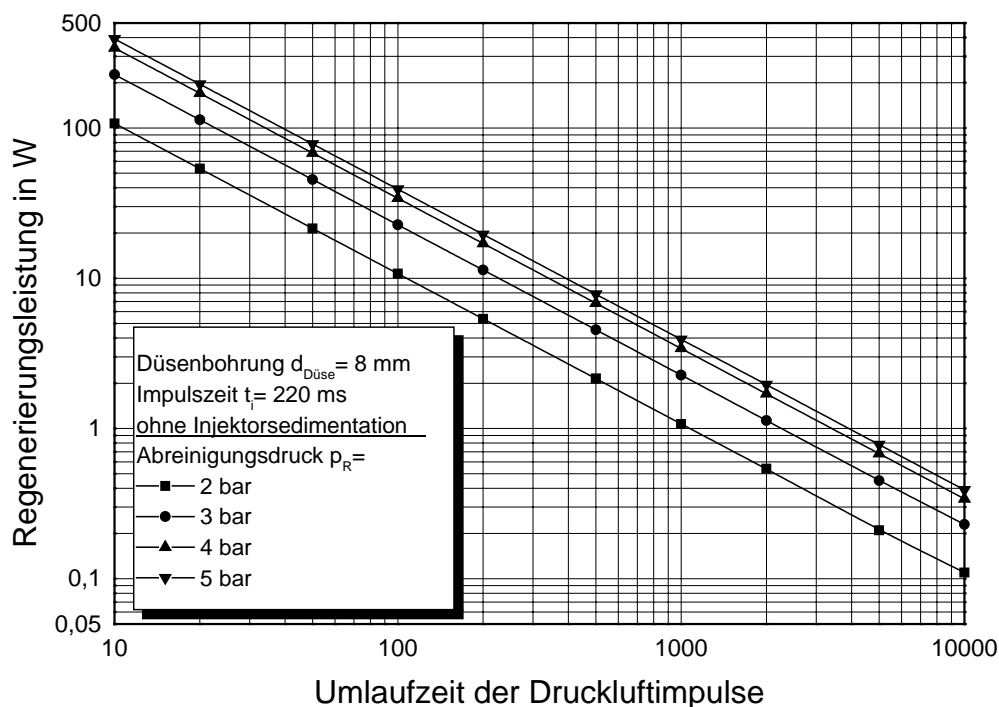


Bild 5.3-4: Regenerierungsleistung als Funktion der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für eine Abreinigung ohne Injektorsedimentation

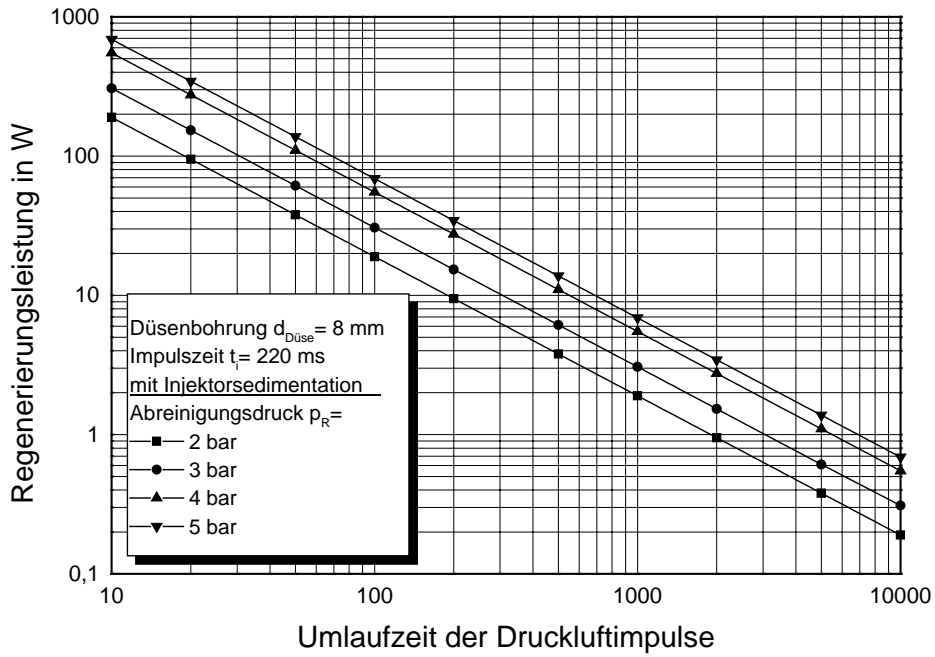


Bild 5.3-5: Regenerierungsleistung als Funktion der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für eine Abreinigung mit Injektorsedimentation

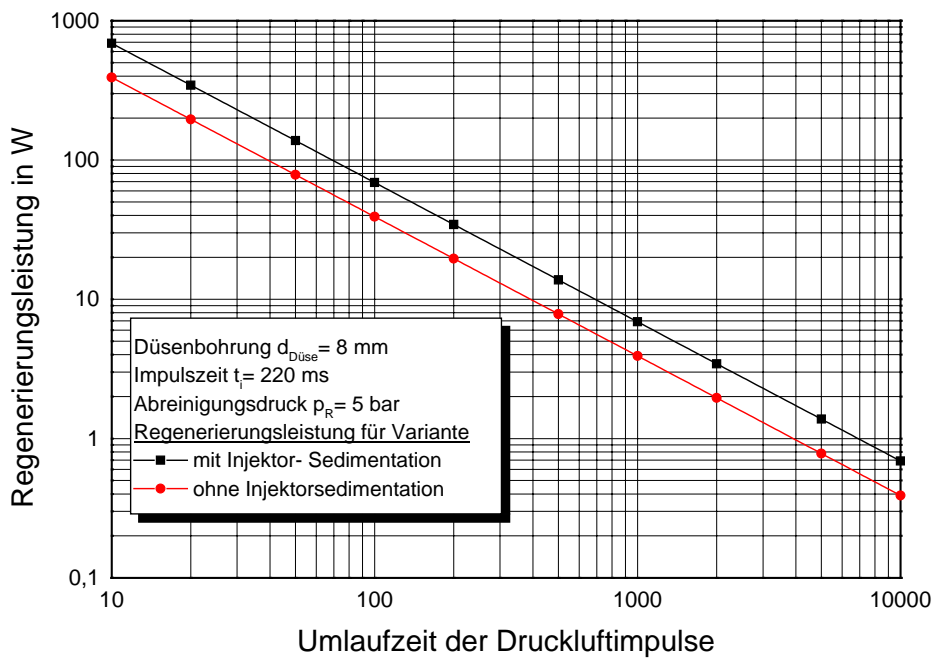


Bild 5.3-6: Regenerierungsleistung mit und ohne Injektorsedimentation als Funktion der Umlaufzeit der Druckluftimpulse für einen Abreinigungsdruck von 5 bar

5.3.3 Gesamtleistung des filternden Abscheiders

Die Gesamtleistung des filternden Abscheiders setzt sich aus der Gesamtleistung des Filterelements, der Verlustleistung im Abscheideraum und dem Energieverlust durch die Querschnittsänderung von Abscheiderein- und -austritt zusammen. Für die stabilen, energetisch günstigen Betriebspunkte ergeben sich folgende Werte für die Abscheider-Gesamtleistung:

Tabelle 5.3-7: Druckverlust, Gesamtleistung und Energiekosten für das Entstaubungsaggregat

| Impulsmenge pro Stunde | Betriebspunkte: Volumenstrom - Abreinigungsdruck | | |
|-------------------------------|--|------------------|------------------|
| | 400 m³/h - 4 bar | 400 m³/h - 5 bar | 450 m³/h - 5 bar |
| Gesamtdruckverlust in Pa | | | |
| 60 | 1150 | 950 | 1000 |
| 5 | 1750 | 1010 | 1150 |
| Gesamtleistung in kW | | | |
| 60 | 0,185 | 0,171 | 0,190 |
| 5 | 0,199 | 0,118 | 0,149 |
| Energiekosten pro Jahr in EUR | | | |
| 60 | 130 | 120 | 133 |
| 5 | 139 | 83 | 104 |

Bei der Berechnung der Energiekosten wurden folgende Annahmen getroffen:

- jährliche Betriebsstunden des Abscheiders 3500 h
- Gesamtwirkungsgrad (Gesamtleistung/ el. Leistung) 60 %
- Industriepreis für Elektroenergie 0,12 EUR/kWh

Der Hauptanteil des Energiebedarfs des Abscheiders resultiert aus Filtrations- und Regenerierungsleistung. Die Verlustleistung im Abscheideraum bringt nur einen geringen Anteil zum Energieverbrauch. Für einen Vergleich und die Einordnung des untersuchten Abscheiders ist die Verwendung spezifischer Kennwerte zweckmäßig.

Im Folgenden werden hierfür die Größen:

- spezifische Leistung bezogen auf den Luftvolumenstrom

$$e_L = \frac{P_{ges}}{\dot{V}} \quad (7)$$

- spezifische Leistung bezogen auf die Filterfläche

$$e_{AF} = \frac{P_{ges}}{A_F} \quad (8)$$

herangezogen.

In Tabelle 5.3-8 sind die spezifischen Werte für die Betriebseinstellung mit dem niedrigsten Energiebedarf bei einem Druckverlust von rund 1000 Pa und einer Umlaufzeit der Druckluftimpulse von 720 Sekunden aufgeführt. Zum Vergleich sind Daten eines mit Großraumfilterpatronen (\varnothing 327 mm; Höhe 1200mm) ausgerüsteten Abscheiders dargestellt. Es handelt sich hierbei um Untersuchungsergebnisse des ILK Dresden zur Verringerung des Druckluftverbrauches bei Großraumfilterpatronen durch den Einsatz von Strömungs-Leitvorrichtungen im Patroneninnenraum. Bei den dazu durchgeführten Versuchen kam Schiefermehl zum Einsatz. Auch hier wurden wiederum die Werte bei der Betriebseinstellung mit geringstem Gesamtenergiebedarf ausgewählt.

Tabelle 5.3-8: Vergleich der spezifischen Leistungen

| Entstaubungsaggregat für die Biomasseverbrennung | | Patronenabscheider ohne Inneneinbauten | | Patronenabscheider mit Strömungsleitvorrichtung | |
|--|------------------|--|------------------|---|------------------|
| e_L | e_{AF} | e_L | e_{AF} | e_L | e_{AF} |
| W/m ³ /h | W/m ² | W/m ³ /h | W/m ² | W/m ³ /h | W/m ² |
| 0,295 | 18,88 | 0,27 | 17,34 | 0,179 | 11,47 |

Im Vergleich zeigt sich, dass die spezifischen Leistungen für das neue Entstaubungsaggregat im Bereich derer von Patronenabscheidern ohne Inneneinbauten liegen. Unter der Berücksichtigung, dass die Vergleichswerte aus optimalen Versuchseinstellungen mit Teststäuben resultieren, ist das erreichte Ergebnis in Bezug auf die schwierig abzuschheidenden Stäube mit einem hohen Verstopfungspotential sehr gut.

5.3.4 Gesamtenergieverbrauch

Zum Energieverbrauch des Filternden Abscheiders kommt noch der Energieverbrauch für die Gasförderung und die Überwindung von Druckunterschieden, sowie die Heizleistung der in den Filterelementen integrierten Heizpatronen hinzu. Ausgehend von zwei Anfahrvorgängen pro Tag in der Heizperiode (180 Tage) und einer Aufheizzeit von 10 Minuten ergibt sich bei einer Nennleistung der eingesetzten Heizpatronen von 1,8 kW ein Energieverbrauch von rund 430 kWh. Damit liegt der Energiebedarf für die Heizung in der

gleichen Höhe wie der des Filternden Abscheiders. Insgesamt ergeben sich für den Betrieb an 3500 Vollaststunden Energiekosten von rund 160 EUR.

Wesentlich in diesem Zusammenhang ist, daß je nach Betriebsweise der Kesselanlage die Patronenbeheizung nur zu einen sehr geringen Teil der Betriebszeit erforderlich ist, diese Patronenbeheizung aber einen stabilen Betrieb sichert (konstante Filterdurchgängigkeit) und verhindert, daß es zu ständigen chemischen Reaktionen kommt, die zur Korrosion des Filtermaterials führen (Taupunktunterschreitungen).

5.3.5 Ventilatorleistung

Für den Luft- und Rauchgasbereich kann die Baugröße in Bezug auf die Ventilatorleistung im Unterdruckbereich bis 30 mbar mit

$$P_{Vent} = 9,6 \cdot \dot{V} \tag{9}$$

\dot{V} ...Betrag in $m^3 s^{-1}$
 P_{Vent} in kW

überschlägig abgeschätzt werden.

Für das neu entwickelte Entstaubungsaggregat folgt damit bei einer Nennluftmenge von 400 m³/h eine Ventilatorleistung von rund 1,1 kW. Für die Auswahl des Motors wird ein Sicherheitszuschlag von 15 % zugegeben. Die Auswahl des Ventilators richtet sich aber auch nach den Erfordernissen der benötigten Kennliniencharakteristik. Typische Beispiele dazu sind in Tabelle 5.3-9 dargestellt. Die Auswahl ist nach den benötigten Druckreserven zu treffen.

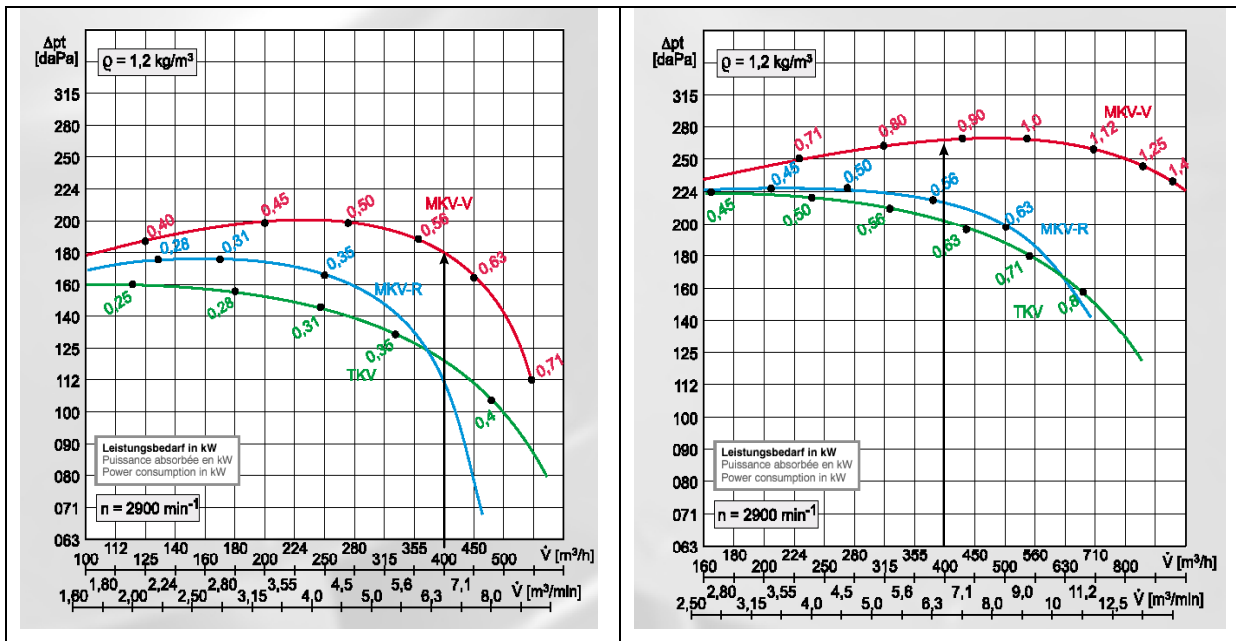


Bild 5.3-9: Auswahldiagramme von Ventilatoren (Quelle: Fa. Reitz Ventilatoren)

5.4 Temperaturverhalten der Filteranlage

Nach Abschluss der Untersuchungen zur Aerodynamik und zum Druckluftverbrauch wurde die Steuerung der Anlage für die Aufheizung der Filterelemente und des Rohgasraumes in Betrieb genommen. Um Taupunktunterschreitungen zu vermeiden, welche bei Biomasse-Feuerungen immer wieder zu einem Verkleben und Verstopfen der Filterelemente führen, zu vermeiden, wurde der Versuchsabscheider gemäß Abschnitt 2.2 mit Heizeinrichtungen ausgerüstet. Diese sind im Inneren der Filterelemente (Reingasseite) angeordnet und wirkten beim Filtrations- und Regenerierungsvorgang gleichzeitig als Strömungsleit-Einrichtung. Zur Temperaturbegrenzung sind auf der Oberfläche der Heizeinrichtungen Fühler angebracht. Bei Inbetriebnahme der Rauchgasreinigung soll zunächst eine Aufheizung der Filterelemente und des Rohgasraumes erfolgen, so dass der Taupunkt sicher überschritten wird. Für die Steuerung wurden folgender Ablauf und folgende Grenzwerte definiert.

Eingangssignale:

| | | |
|------|-------------------------------------|-----------------------------|
| T_1 | Oberflächentemperatur Heizpatrone 1 | Thermoelement |
| T_2 | Oberflächentemperatur Heizpatrone 2 | Thermoelement |
| T_3 | Oberflächentemperatur Heizpatrone 3 | Thermoelement |
| T_4 | Oberflächentemperatur Heizpatrone 4 | Thermoelement |
| T_5 | Temperatur Abscheider | Thermoelement |
| T_6 | Temperatur Reingas | PT 100 |
| T_7 | Temperatur vor Abscheider | PT 100 |
| dp_1 | Differenzdruck Prantl- Rohr | XLDP 3, 0..250 Pa; 4..20 mA |

Lasten:

| | |
|----------|----------------------------|
| L 1 ...4 | Heizpatronen 1 ...4 |
| M 1 | Ventilator |
| L 5 | Steuerung Druckluftventile |

1. Einschalten Hauptschalter
Abfrage T_1 bis T_7
2. Grenzwerte

| | |
|-------------|--|
| T_1 bis T_4 | T _u = 350 °C T _O = 400 °C, variabel |
| T_5 | 120 °C |
| T_6 | 120 °C |

3. Verknüpfungen

| | |
|----------------------|-----------------|
| Wenn T < GW | L_1 ... L_4 = 1 |
| Wenn T_1... T_4 > GW | L_1 ... L_4 = 0 |
| Wenn T_5 > GW | M 1 = 1 |
| Wenn T_6 > GW | L_1... L_4 = 0 |
| Wenn M1 & M2 = 1 | L_5 = 1 |
| Mit Zeitfunktion | |

| | |
|--|---------------------------------|
| Wenn $t > t_{\text{Grenz}}$ (var.) & $T < GW$ | Alles Null: Signal „Störung“ |
|--|---------------------------------|

Dies bedeutet, dass der Ventilator erst dann einschaltet, wenn die vorgegebene Grenztemperatur im Abscheider (hier 120 °C) erreicht wird.

Bild 5.4-1 zeigt das Temperaturverhalten der Anlage nach dem Einschalten. Die Abscheidertemperatur steigt durch die Aufheizung mittels Heizelement gleichmäßig an. Bei Erreichen der Soll-Temperatur von 120 °C wird der Ventilator gestartet. Damit steigt auch die Reingastemperatur sprunghaft an.

Durch die schon durchgeführten aerodynamischen Untersuchungen war der Abscheider schon auf über 70 °C vorgewärmt. Soll der Abscheider ausgehend von Temperaturen um die 30°C bis zur Soll-Temperatur aufgeheizt werden dauert die Aufheizphase etwa 15 Minuten länger.

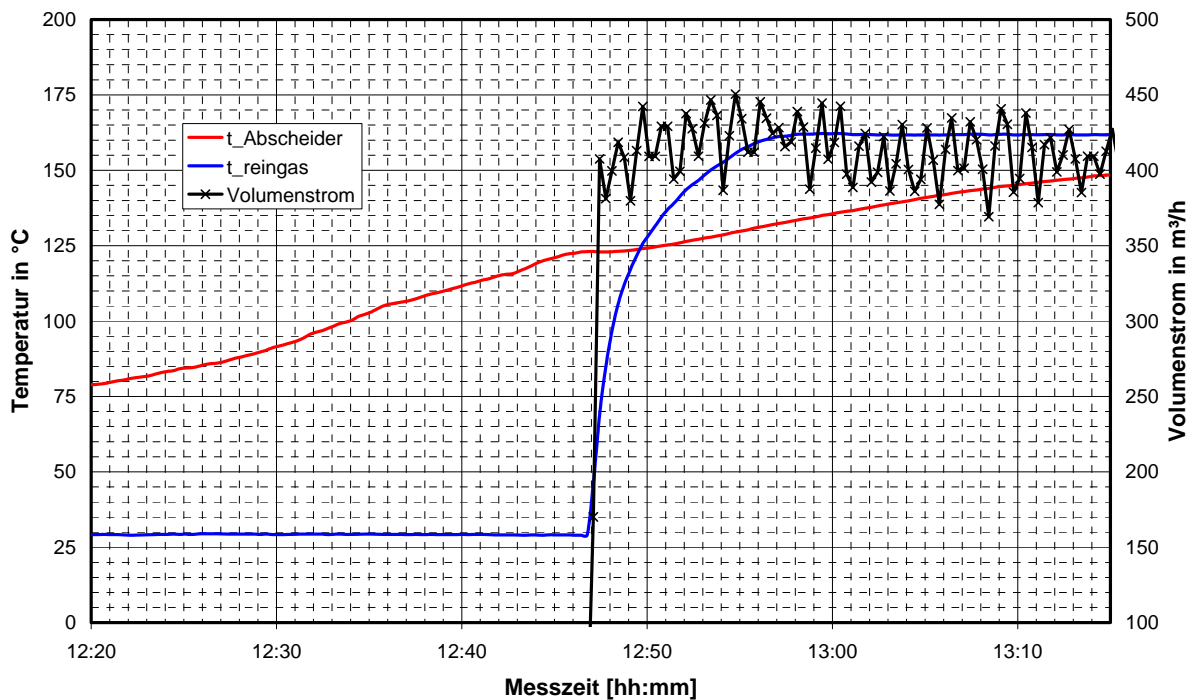


Bild 5.4-1: Temperaturverhalten des Abscheiders beim Anfahren der Anlage

Die Steuerung und Temperaturregelung funktionierte im Zeitraum der Erprobung einwandfrei und zuverlässig. Auf Grund der auch noch im Anlagenstillstand existenten relativ hohen Temperaturen im Abscheider war nach Betriebspausen nicht in jedem Fall eine erneute Aufheizung nötig. Durch die Eingabe einer Hysterese für die Abscheidertemperatur von 20 K konnten die Schaltzyklen minimiert werden.

6 Anlagenerprobung

6.1 Brennstoff und Rohgasparameter

Im Rahmen der Erprobung der Filteranlage lag auch ein Schwerpunkt auf der Charakterisierung der Rohgasbedingungen und der Rohgasparameter in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes, insbesondere bei Verwendung von Hackschnitzeln mit erhöhtem Grünanteil (Nadeln, Äste). Nadeln und Äste stellen in der Forstwirtschaft einen kaum zu nutzenden Abfall dar. Es sollte daher geprüft werden, ob eine Nutzung als Brennstoff möglich ist. Für die Sicherung einer relativ gleich bleibenden Brennstoffqualität werden die angelieferten Holz hackschnitzel zwischengelagert und können in verschiedenen Haufen abgelegt werden (vgl. Bild 6.1-1). Diese Chargen werden nach ihrem Feuchtegehalt gemischt und in den Tagesvorratsbunker (vgl. Bild 6.1-2) gemischt.

Um ggf. entstehende Unterscheide in den Rohgasparametern feststellen zu können wurde im Rahmen einer Messkampagne gezielt Brennstoff mit einem hohen Grünanteil gefeuert.



Bild 6.1-1: Brennstofflager

In Bild 6.1-3 ist die Brennstoffzusammensetzung mit hohem Grünanteil fotografisch festgehalten worden. Von den Brennstoffen wurden jeweils Mischproben angefertigt, welche dann im Bayerischen Landesamt für Umweltschutz in Augsburg ausgewertet wurden.



Bild 6.1-2: Brennstoff- Zwischenbunker



Bild 6.1-3: Holzhackschnitzel mit Grünanteil

Die Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen sind in Tabelle 6.1-1 gegenübergestellt. Dabei ist Brennstoffprobe BP01 ein hoher Grünanteil zuzuordnen; Brennstoff BP02 ist der normalerweise verwendete Brennstoff. Dabei zeigt sich, dass der Brennstoff BP01 mehr Inhaltsstoffe ausweist. Viele Messwerte liegen aber auch nahe des Bereiches der Nachweisgrenze. Signifikant ist vor allem der höhere Chloranteil; insgesamt ist der eingesetzte Brennstoff aber gering belastet.

Tabelle 6.1-1: Ergebnisse der Brennstoffuntersuchungen des LfU Augsburg

| | | 1 | 2 |
|-------|-------|-------|-------|
| | | BP 01 | BP 02 |
| Cd | mg/kg | <2 | <2 |
| Chlor | mg/kg | 183 | <100 |
| Cl | mg/kg | | |
| Cr | mg/kg | 12.1 | <7 |
| Cu | mg/kg | 6.80 | 2.90 |
| Hg | mg/kg | 0.015 | 0.004 |
| Ni | mg/kg | 3.90 | <3 |
| Pb | mg/kg | 4.10 | <3 |
| S | mg/kg | <700 | <700 |
| Tl | mg/kg | <5 | <5 |
| Zn | mg/kg | 56.3 | 14.0 |

Die Rohgastemperaturen lagen bei Betrieb der Anlage meist bei 160 °C. Im Gluterhaltungsbetrieb sinken die Temperaturen bis auf Werte von 120 °C ab, fallen dann aber nicht weiter.

6.2 Messplan und Vorgehen bei der Anlagenerprobung

Für die Durchführungen der Messungen wurde im ersten Zwischenbericht des Vorhabens folgender Mess- und Aufgabenplan erstellt:

Komplex Inbetriebnahme:

- Kontrolle und Inbetriebnahme der Überwachungstechnik
- Kontrolle Regelung Ventilator
- Kontrolle der Abreinigungsregelung
- Einfahren des Filternden Abscheiders (bis Gleichgewichtszustand erreicht ist)

Komplex Erstmessungen:

- Staubkonzentrationsmessungen, Korngrößenverteilungen
- Gasmessungen.

Zunächst sollte bei Nennlast, danach im Bereich von 70 % Teillast gemessen werden.

Komplex Betriebsüberwachung:

Die Betriebsüberwachung soll Gasdurchsatz, Filterdruckverlust, Rauchgastemperatur und reingasseitige Staubkonzentration betreffen. Es wird angestrebt, die Messergebnisse täglich über Telefon zu kontrollieren.

Komplex Abschlussmessungen:

- Wiederholung der Messungen wie bei Erstmessung
- Verschleiß und Zuverlässigkeitskontrollen
- Dokumentation des Zustandes der Filterpatronen.

Im Einzelnen wurden die Messaufgaben wie folgt umgesetzt:

Komplex Inbetriebnahme:

- Der Abscheider wurde in Betrieb genommen; die Parameter der Abreinigung wurden zunächst auf einen Grenzdruckverlust von 850 Pa festgelegt.
- Die Regelungstechnik des Abscheiders in Bezug auf das Anfahrverhalten mit Beheizung der Filterelemente wurde überprüft; die einzelnen Parameter wurden eingestellt. Dabei wurden die Hysteresen und Schaltpunkte überprüft. Die Grenztemperatur für ein Zuschalten der Anlage wurde auf 120 °C eingestellt. Für die Korrespondenz der Versuchsanlage mit dem Kessel wurde eine Verschaltung der Filtersteuerung mit der SPS- Steuerung der Kesselanlage (Rauchgas-Ventilator- Signal) realisiert. Bei Stillstandszeiten von weniger als 45 Minuten läuft die Filteranlage auch ohne Nachheizen wieder an.
- Der Ventilator arbeitet zufrieden stellend; die maximal zulässige Temperatur wird unterschritten; ein stabiler Betrieb ist bis zu einem Gesamtdruckverlust von 20 mbar möglich.
- Es wurden Staubproben für eine Dichtebestimmung und Korngrößenanalytik entnommen.

Komplex Erstmessung:

Dieser Komplex wurde auf Grund der für die einzelnen Messgrößen notwendigen Messtechnik in mehreren Etappen durchgeführt.

- Es wurden Bestimmung der Staubkonzentrationen jeweils in Roh- und Reingas simultan durchgeführt.
- Gasmessungen wurden in einer Mess- Serie mittels FTIR- Analysator durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Lastzustände erfasst (kontinuierlicher und intermittierender Betrieb, Bereitschaftsbetrieb).

- Partikelgrößenverteilungen wurden in Roh- und Reingas mit einem 7-stufigen Kaskadenimpaktor gemäß VDI 2066 Bl. 5 bestimmt.
Die Messungen im Nano- Bereich mit dem Berner- Niederdruck- Impaktor wurden im Roh- und Reingas des Versuchsabscheiders durchgeführt.
- Die Messungen der Staubkonzentrationen erfolgten an verschiedenen Terminen, bei denen eine unterschiedliche Wärmelastabnahme vorlag. Eine genaue Quantifizierung der Wärmelast konnte aber bei der intermittierenden Betriebsweise nicht erfolgen.

Komplex Betriebsüberwachung:

Die Betriebsüberwachung bezieht sich vor allem auf die Parameter Filtertemperatur, Druckverlust und Reingasstaubkonzentration. Dazu wurde die notwendige Messtechnik an der Anlage montiert. Es zeigte sich aber, dass der für die Quantifizierung des Reingasstaubgehaltes eingesetzte triboelektrische Filterwächter in Bezug auf die an der Anlage vorkommenden Feinst-Stäube relativ unempfindlich ist und entsprechende Integrationszeiten aufweist. Es wird daher zeitweise parallel ein optisches Mess-System der Fa. Sigrist-Photometer betrieben. Offenbar auf Grund der hohen Temperaturen am Messort wurde ein Schaden am Messwert-Erfassungsrechner ausgelöst, der kurzfristig ausgetauscht wurde. Die Fernabfrage der Daten konnte auf Grund der relativ instabilen Telefonverbindung nach Neualbenreuth nicht täglich erfolgen. Die Überwachung wurde daher zusätzlich bzw. hauptsächlich durch persönlichen Einsatz der Fa. Winkel vor Ort vorgenommen. Insgesamt verlief der kontinuierliche Betrieb der Anlage erfolgreich. Nach rund einem Monat Betriebsdauer zeigte sich, daß der Grenzdruckverlust für einen energetisch sinnvollen Betrieb des Abscheiders auf 1250 Pa angehoben werden sollte, was auch so erfolgte.

Komplex Abschlussmessung:

Im Rahmen des Komplexes Abschlussmessung wurden noch einmal die Staub- und Gasemissionen überprüft und Untersuchungen zu den Partikelgrößen der Stäube in Roh- und Reingas vorgenommen. Weiterhin wurden die Filterelemente ausgebaut und auf Schäden begutachtet. Danach wurden zur Beurteilung der Filtermaterialalterung nochmals aerodynamische Untersuchungen durchgeführt.

6.3 Durchführung der Messungen

6.3.1 Eingesetzte Messtechnik

Für die Erprobung und messtechnische Qualifizierung des Abscheideaggregates wird eine Vielzahl von Sensoren und Messgeräten eingesetzt. Tabelle 6.3-1 und die nachfolgenden Bilder geben einen Überblick über die zum Einsatz gekommene Messtechnik.

Im Rahmen der Abschlussmessungen kam auch die Partikelgrößenmesstechnik mittels Niederdruckimpaktor zum Einsatz. Diese Messungen erfordern einen besonders hohen

Aufwand, da die Auswertung vor Ort erfolgen muss und der Impaktor vor und nach jeder Messung im Trockenschrank zu konditionieren ist. Allerdings sind mit dieser Technik Partikelgrößenverteilungen abzubilden, welche mit herkömmlichen Impaktoren nicht mehr darstellbar sind (unter $0,5 \mu\text{m}$).

Die FTIR- Messtechnik hat sich sehr gut bewährt, so wurde es möglich beispielsweise HCl online zu messen.

Tabelle 6.3-1: Eingesetzte Messtechnik

| Messgröße | Messverfahren | Messgerät | Hersteller |
|--|---|--|--|
| Gastemperatur | Bestimmung der temperaturabhängigen Widerstandsänderung mittels eines genormten Platinsensors | Widerstandsthermometer Sensor Pt 100 Meßbereich: $-20 +600 \text{ }^\circ\text{C}$ | Temperaturmesstechnik Geraberg GmbH Martinrode |
| Gasdurchsatz | Messung des dynamischen Druckes (Staudruck) im freien Strömungsquerschnitt mit angeschlossenen Differenzdruck-Sensor | Staurohr nach Prandtl Typ: 81.071 Nennlänge: 500 mm Material: 1.4571 | Dosch Meßapparate GmbH Berlin |
| Luftdruck | Piezoelektrische Widerstandsänderung durch Druckeinwirkung auf ein biegsames Membran mit eingebetteten piezoresistiven Widerständen | Barometrischer Drucksensor Typ: DB 1 Messbereich 800 - 1100 mbar | Fa. Airflow |
| statischer Druck Druckdifferenz | Piezoelektrische Widerstandsänderung durch Druckeinwirkung auf ein biegsames Membran mit eingebetteten piezoresistiven Widerständen | Differenzdrucksensor Typ: ASHCROFT XLD P2 Meßbereich: 0 ... 1,0 mbar 0 ... 2,5 mbar 0 ... 10 mbar 0 ... 25 mbar 0... 60 mbar | Dresser Europe S.A Baesweiler |
| Sauerstoff | Messung der paramagnetischen Sustainibilität | Vollautomatische Gasanalysatoren mit vorgeschalteter Gasaufbereitung Typ: Servomex $\text{O}_2 < 25 \text{ Vol.}\%$ | Servomex Ltd. |
| Größenverteilung der Staubpartikel im Rauchgas | Fraktionierende Staubmessung nach dem Impaktionsverfahren mit 7 Trennstufen | Kaskadenimpaktor Typ: FIF 7 Material: TITAN Aerodynamischer Durchmesser d_{ae50} : 0...12,09 μm | Dr.Födisch Umweltmeßtechnik GmbH Kulkwitz |
| Staubkonzentration | isokinetsche Teilgasstrom - Absaugung mit gravimetrischer Bestimmung | Gravimat Typ: SHC-5 Meßbereich $< 2000 \text{ mg/ m}^3$ | SICK GmbH Optik- Elektronik Umweltmeßtechnik Reute |
| | Kontinuierliche Streulichtmessung eines isokinetisch abgesaugten Teilgasstromes | SIGRIST - Staub-Emissionsmeßgerät | SIGRIST-Photometer |
| | | Typ: | AG Ennethürgen (Schweiz) |
| | | Meßbereich: | |
| | | 0 ... 1000 $\text{mg/m}^3 \text{ PLA}$ | |
| | | | |
| Gehalt an HCl, CO ₂ , CO, H ₂ O, NO, NO ₂ ; SO ₂ , CH ₄ ; N ₂ O, | FTIR- Spektrenmessung | FTIR Typ: CEDOR 2 | SICK AG |



Bild 6.3-1: Photometer zur Bestimmung der relativen Staubkonzentration im Rauchgas



Bild 6.3-2: Gravimetrisches Stabmessgerät Gravimat SH5 im Einsatz vor Ort



Bild 6.3-3: FTIR- Analysator zur quantitativen Bestimmung der Gaskomponenten

6.4 Betriebsbedingungen der Kesselanlage

Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurden verschiedene Lastzustände am Kessel untersucht. Allerdings wurde zu keiner Zeit der Staub- und Gasmessungen vor Ort die Maximalleistung gefahren. Dies zeigen auch die geringen Rohgasstaubkonzentrationen im Bereich von unterhalb 200 mg/ Nm^3 . Interessant war vor allem das gute Verbrennungsverhalten des Kessels beim Übergang von der Bereitschafts- zur Feuerungsphase.

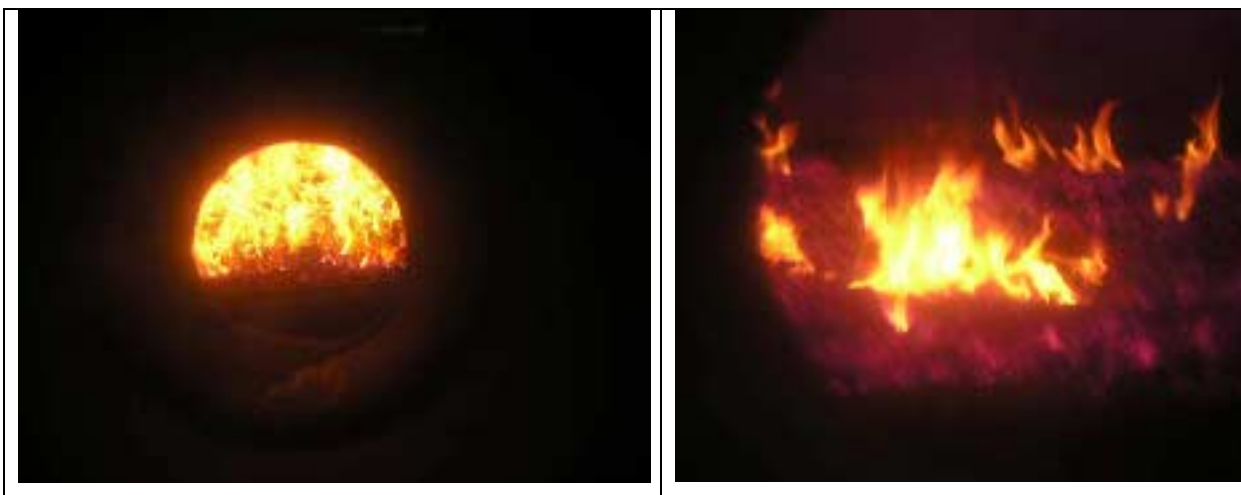


Bild 6.4-1: Flammenbilder bei normaler Feuerung und im Bereitschaftsmodus

Es waren generell sehr niedrige CO- Werte zu verzeichnen. Der Messtag am 18.03.2004 war durch ein stark intermittierendes Feuerungsverhalten geprägt. Die Anlage wurde zeitweise

ausgeschaltet. Hier wurden auch die Staubmessungen unterbrochen, die Gasmessungen wurden kontinuierlich fortgesetzt.

6.5 Betriebsüberwachung der Anlage und Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen

6.5.1 Einfahrverhalten des Abscheiders

Nach Durchführung der aerodynamischen Untersuchungen zum Druckverlust des Abscheidesystems und den Untersuchungen zum Energieverbrauch des Regenerierungssystems wurde der Abscheider in Betrieb gesetzt. Zur Bewertung der Ergebnisse der aerodynamischen und energetischen Untersuchungen wird auf Abschnitt 5.2 und 5.3 verwiesen.

Der Abscheider zeigte, wie schon in der ersten Betriebsphase, eine relativ starke Anfilterung auf. Der vorgegebene Betriebspunkt von 850 Pa bei 400 m³/h Gasdurchsatz konnte rasch erreicht werden (vgl. Bild 6.5-1).

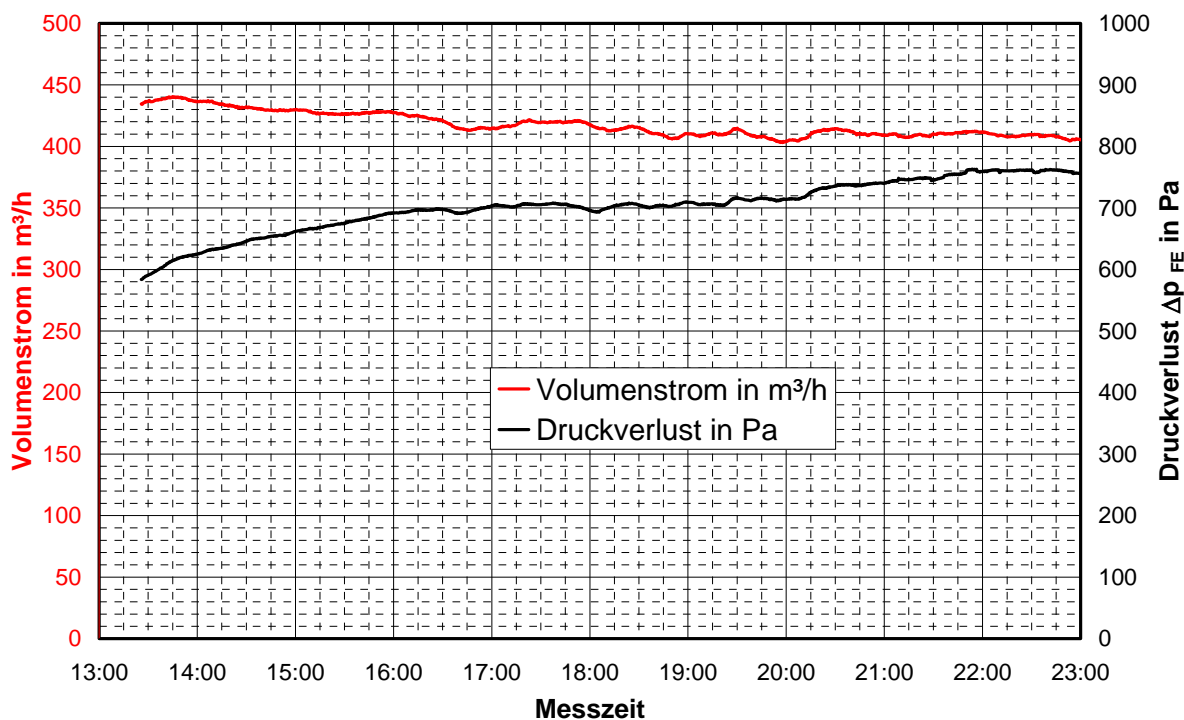


Bild 6.5-1: Einfahrverhalten der Filterelement in der ersten Betriebsphase bis zum Erreichen des vorgegebenen Betriebspunktes

Von den Einsatztemperaturen zeigte sich, dass die Rohgastemperaturen üblicherweise unterhalb von 160 °C liegen. Das Rauchgas kühlt sich im Abscheider und der nachgeschalteten Rohrleitung um etwa 10 K ab, so dass die Reingastemperaturen in einem Bereich von 145 bis 130 °C liegen. Dies ist niedriger als erwartet, liegt aber noch sicher über

dem Säure- Taupunkt. Die relativ niedrigen Temperaturen sind auch wieder ein Indiz für die nicht vollständige Auslastung des Kessels. Die Kesselleistung bei der Erprobung kann mit rund 70 % (außer intermittierendem Betrieb) angegeben werden.

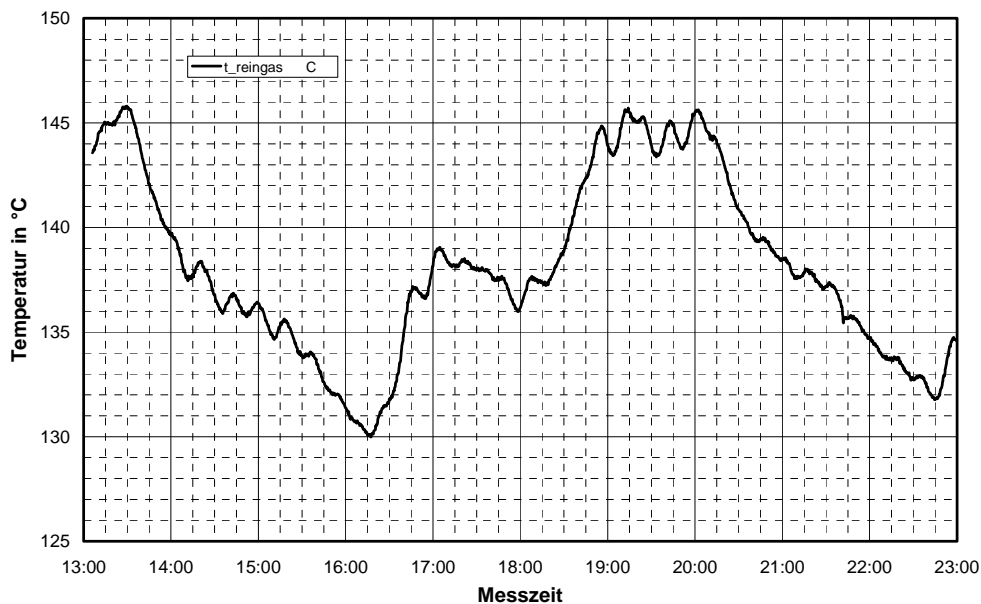


Bild 6.5-2: Temperaturverhalten des Abscheiders auf der Reingasseite bei der Inbetriebnahme

6.5.2 Dauererprobung

Ziel der Untersuchungen war insbesondere die Erprobung der Filteranlage im Dauerbetrieb mit kontinuierlicher Registrierung der Messwerte für die Filtrationsparameter Druckverlust und Volumenstrom, sowie der Staubkonzentrationen in Roh- und Reingas. Für die Messungen der Staubkonzentrationen wurden verschiedene Messverfahren eingesetzt, welche im Rahmen der umfangreichen gravimetrischen Messungen vor Ort kalibriert wurden. Anfangs gab es bei der Messung der Rohgaskonzentration Probleme in Bezug auf die Probenahme. Daher stehen hier keine Messwerte über die gesamte Erprobungsdauer zur Verfügung. In den Darstellungen von Bild 6.5-3 bis Bild 6.5-7 sind die Ergebnisse der Dauererprobung über der Betriebszeit der Versuchsanlage dargestellt. Während der Erprobung wurden die Filtrationsparameter variiert. Dies zeigt sich in den Unterschieden im Kurvenverlauf von Bild 6.5-3 und Bild 6.5-4. Es wurden am Abreinigungssystem verschiedene Grenzdruckverluste eingestellt um eine Optimierung des Filtrationsverhaltens zu ermöglichen. Allerdings kann festgestellt werden, dass die Staubkonzentrationen im Rohgas während der Anlagenerprobung relativ gering waren und die Staubfraktionen extrem fein. Damit konnten die Vorteile der Injektorsedimentation nicht so deutlich werden, trotzdem können auch hier Vorteile im Druckverlustverhalten festgestellt werden (vgl. Bild 6.5-4).

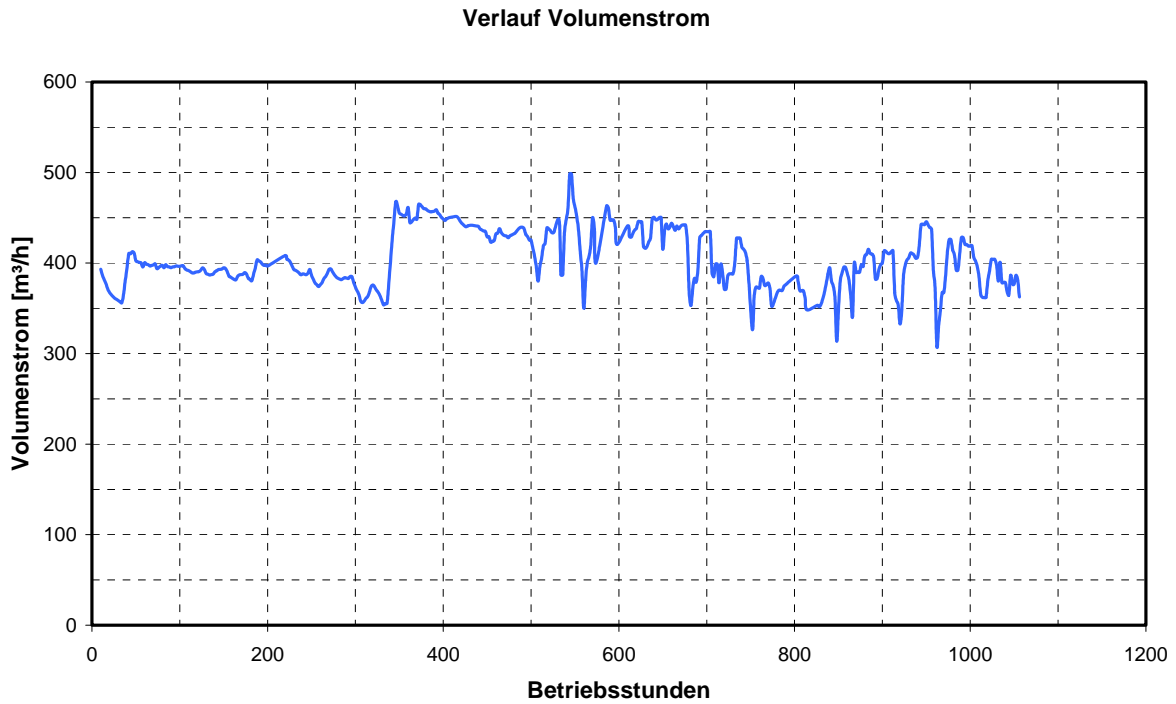


Bild 6.5-3: Verlauf des Gasvolumenstroms während der Anlagenerprobung

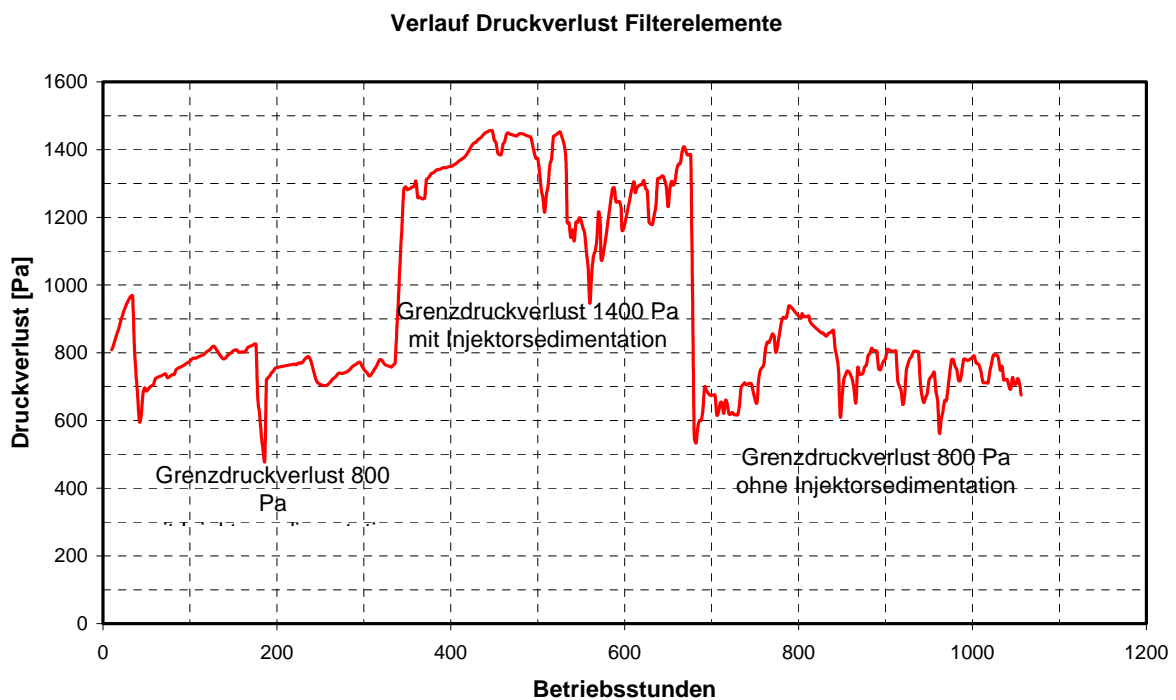


Bild 6.5-4: Verlauf des Druckverlustes der Filterelemente während der Anlagenerprobung

In Bild 6.5-5 und Bild 6.5-6 sind die Verläufe der Roh- und Reingasstaubkonzentrationen über der Betriebszeit dargestellt. Die Reingasstaubkonzentration liegt hier stabil und deutlich

im Bereich von 3 mg/m³. Nach etwa 400 Betriebsstunden ist hier ein leichter Anstieg der Staubkonzentration um 1 mg/m³ zu verzeichnen. Die Rohgasstaubkonzentration variiert sehr stark und liegt zwischen 100 und 600 mg/m³.

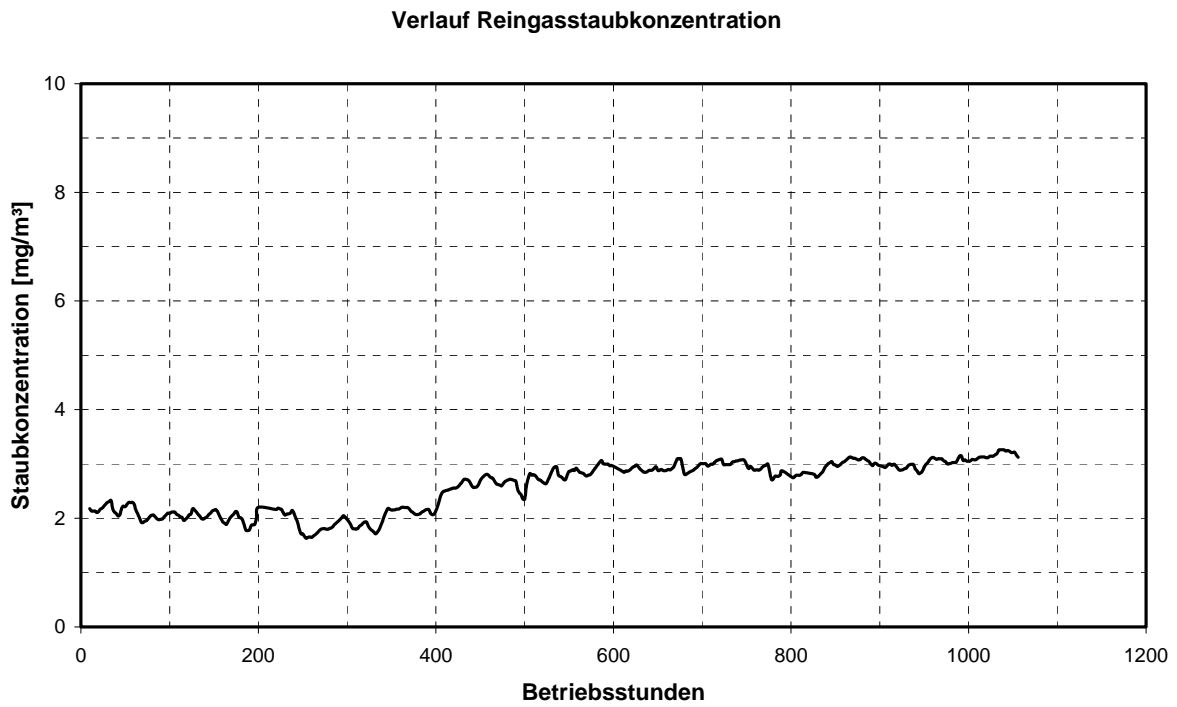


Bild 6.5-5: Verlauf der Reingasstaubkonzentration während der Anlagenerprobung

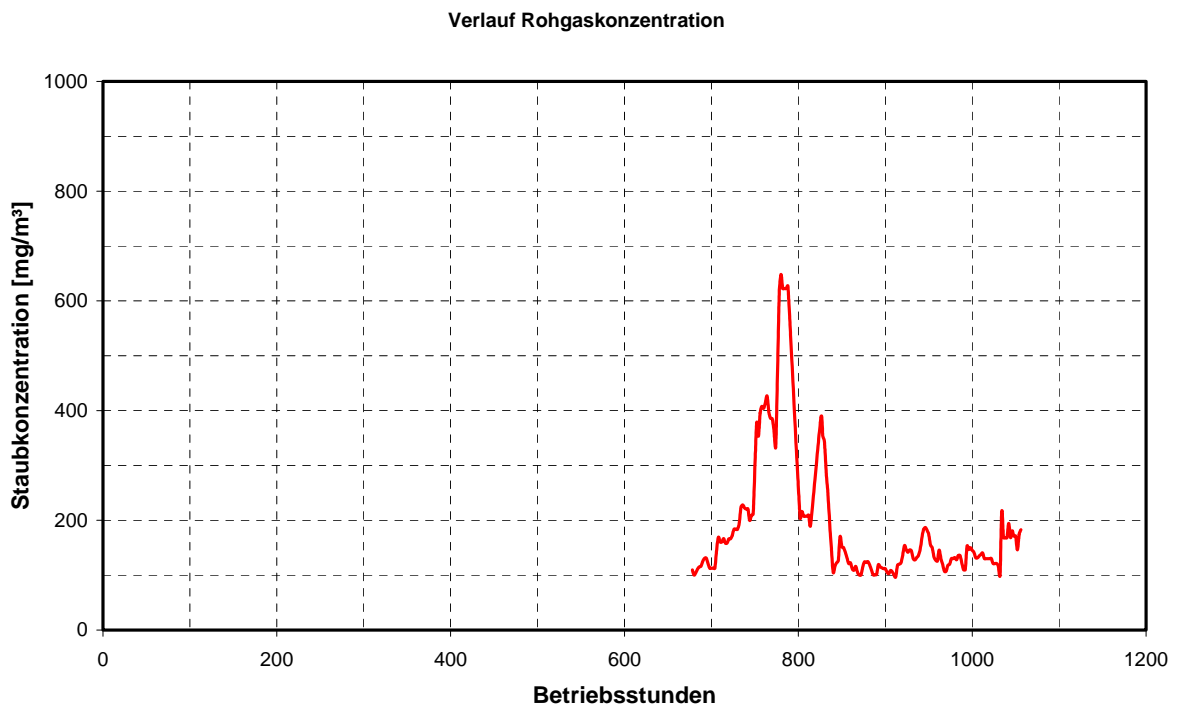


Bild 6.5-6: Verlauf der Rohgasstaubkonzentration während der Anlagenerprobung

Bild 6.5-6 zeigt den Verlauf der Temperatur im Reingas. Die Anlage wurde stabil mit Temperaturen oberhalb von 120 °C betrieben.

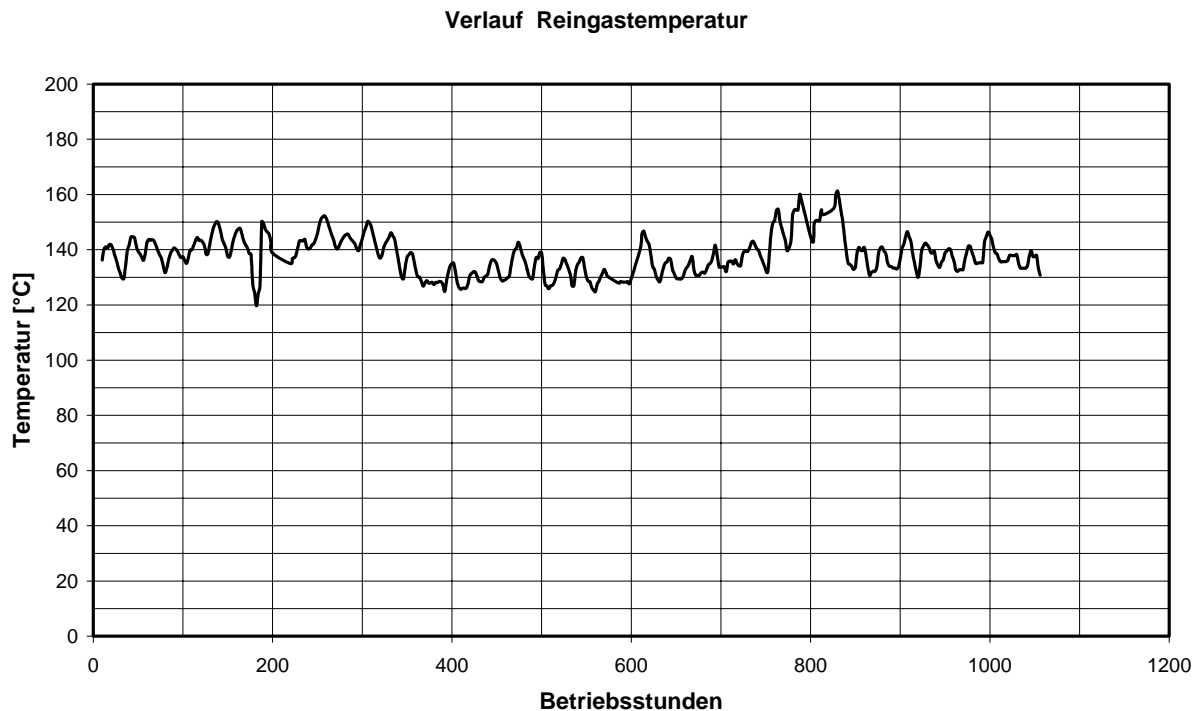


Bild 6.5-7: Verlauf der Reingastemperatur während der Anlagenerprobung

6.6 Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen

Die Messungen der Staubkonzentrationen beziehen sich vor allem auf die gravimetrische Bestimmung der Roh- und Reingasstaubkonzentration um den Abscheidegrad des Staubabscheiders zu bestimmen.

Die Messungen im Rohgas wurden mit einem beheizten Planfiltergerät der Fa. Gothe mit Durchmesser 150 mm durchgeführt. Für die Reingasmessungen steht das bewährte System Gravimat der Fa. Sick zur Verfügung. Die Filterpapiere und Sammler wurden vor und nach der Messung im Staublabor des ILK konditioniert und mittels Analysenwaage ausgewertet.

In Tabelle 6.6-1 sind die vorliegenden Ergebnisse zu den Rohgasstaubkonzentrationen zusammengefasst. Die angegebenen Werte repräsentieren dabei jeweils die Mittelwerte aus mindestens drei Einzelmessungen. Die Mess- und Berechnungsergebnisse zu den Einzelmessungen sind in Tabelle 6.6-3 bis Tabelle 6.6-11 enthalten. In Messreihe 4 und 5 wurde rohgasseitig mit dem Sigrist- Photometer abgesaugt und das die Messkammer verlassende Gas über den Planfilterkopf geleitet. Daraus wurde ein Kalibrierfaktor für die kontinuierlichen Staubmesswerte ermittelt. Entsprechend der Ergebnisse kann für den während der Messungen vorherrschenden Lastzustand eine Rohgasstaubkonzentration im Bereich von 70 bis 200 mg/Nm³ als typisch charakterisiert werden.

Tabelle 6.6-1: Rohgasstaubkonzentrationen in den Mess- Serien

| Messreihe | | Staubkonzentration im Rohgas in mg/m ³ i.N.tr. | Betriebszustand |
|------------|--|---|-----------------|
| 1 | | 133 | Normalbetrieb |
| 2 | | 73 | Intermittierend |
| 3 | | 119 | Intermittierend |
| 4 | | 103 | Normalbetrieb |
| 5 | | 92 | Normalbetrieb |
| Mittelwert | | 104 | |

In Tabelle 6.6-2 sind die Ergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen im Reingas des neuartigen Staubabscheidesystems zusammengefasst. Dabei zeigt sich, dass Staubkonzentrationen von 10 mg/ Nm³ in jedem Fall unterschritten werden. Insgesamt ist der sich hier darstellende Einsatzfall für Filternde Abscheider kritisch, da sich bei solch geringen Rohgasstaubkonzentrationen kein poröser Filterkuchen aufbauen kann, welcher ja eigentlich für die hocheffektive Abscheidung verantwortlich zeichnet.

Tabelle 6.6-2: Reingasstaubkonzentrationen in den Mess- Serien

| Messreihe | | Staubkonzentration im Reingas in mg/m ³ i.N.tr. | Betriebszustand |
|------------|--|--|-----------------|
| 1 | | 8,1 | Normalbetrieb |
| 2 | | 4,7 | Intermittierend |
| 3 | | 6,4 | Normalbetrieb |
| 4 | | 5,1 | Normalbetrieb |
| 5 | | 3,3 | Normalbetrieb |
| Mittelwert | | 5,5 | |

Aus den gemittelten Werten von Roh- und Reingasstaubkonzentration ergibt sich ein mittlerer Abscheidegrad von 95 %. Bei höheren Staubkonzentrationen verbessert sich der Abscheidegrad noch wesentlich und liegt dann meist oberhalb von 99 %. Entscheidend ist, was durch die Messungen gezeigt werden konnte, dass auch bei niedrigen Staubkonzentrationen im Rohgas und sehr feinen Partikeln eine ausreichend hohe Abscheideleistung erzielt werden kann, um eine Staubkonzentration von 10 mg/Nm³ im Reingas sicher zu unterschreiten.

Tabelle 6.6-3: Mess- und Berechnungsergebnisse von Rohgasstaubkonzentrationen – Messkampagne 1

| Messgröße | Dim. | Messg. 1.1 | Messg. 1.2 | Messg. 1.3 | Messg. 1.4 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 952 | 952 | 952 | 952 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| Mittl. Abgastemperatur | °C | 145,0 | 145,3 | 146,0 | 145,0 |
| stat. Druck | mbar | -19,0 | -19,0 | -19,0 | -19,0 |
| Mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 10,0 | 10,5 | 10,2 | 10,0 |
| Mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,78 | 0,773 | 0,775 | 0,777 |
| Mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,6 | 14,0 | 13,8 | 13,9 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 384 | 396 | 390 | 393 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 231 | 238 | 234 | 236 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 210 | 215 | 212 | 215 |
| Partikelförmige Emission | | | | | |
| Rohgasstaubkonzentration - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 105,2 | 190,3 | 149,1 | 88,7 |

Tabelle 6.6-4: Mess- und Berechnungsergebnisse von Rohgasstaubkonzentrationen – Messkampagne 2

| Messgröße | Dim. | Messg. 2.1 | Messg. 2.2 | Messg. 2.3 | Messg. 2.4 | Messg. 2.5 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 959 | 957 | 957 | 957 | 957 |
| Bezugsgrößen | | | | | | |
| Mittl. Abgastemperatur | °C | 147,0 | 148,0 | 149,0 | 147,0 | 144,0 |
| stat. Druck | mbar | -14,0 | -14,0 | -14,0 | -14,0 | -14,0 |
| Mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 8,0 | 14,0 | 11,7 | 10,6 | 12,4 |
| Mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,787 | 0,778 | 0,779 | 0,781 | 0,782 |
| Mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 14,0 | 14,1 | 14,0 | 13,9 | 14,0 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 396 | 399 | 396 | 393 | 396 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 240 | 241 | 238 | 236 | 240 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 222 | 211 | 213 | 214 | 213 |
| Partikelförmige Emission | | | | | | |
| Rohgasstaubkonzentration - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 76,6 | 57,6 | 77,5 | 83,6 | 74,6 |

Tabelle 6.6-5: Mess- und Berechnungsergebnisse von Rohgasstaubkonzentrationen – Messkampagne 3/ 4

| Messgröße | Dim. | Messg. 3.1 | Messg. 3.2 | Messg. 3.3 | Messg. 4.1 | Messg. 4.2 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 33 | 30 | 30 | 30 | 15 |
| Barometerstand | mbar | 953 | 953 | 952 | 957 | 951 |
| Bezugsgrößen | | | | | | |
| Mittl. Abgastemperatur | °C | 135,6 | 136,2 | 136,0 | 171,2 | 157,5 |
| Stat. Druck | mbar | -16,0 | -16,0 | -16,0 | -14,0 | -19,0 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,5 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,795 | 0,803 | 0,8 | 0,739 | 0,753 |
| Mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,2 | 13,0 | 13,4 | 14,8 | 14,4 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 373 | 368 | 379 | 418 | 407 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 231 | 227 | 234 | 239 | 238 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 209 | 206 | 212 | 217 | 215 |
| Partikelförmige Emission | | | | | | |
| Rohgasstaubkonzentration - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 172,8 | 93,0 | 92,3 | 107,0 | 100,1 |

Tabelle 6.6-6: Mess- und Berechnungsergebnisse von Rohgasstaubkonzentrationen – Messkampagne 5

| Messgröße | Dim. | Messg. 5.1 | Messg. 5.2 | Messg. 5.3 | Messg. 5.4 | Messg. 5.5 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 955 | 955 | 953 | 953 | 952 |
| Bezugsgrößen | | | | | | |
| Mittl. Abgastemperatur | °C | 166,4 | 190,7 | 197,9 | 168,1 | 160,7 |
| Stat. Druck | mbar | -19,0 | -19,0 | -19,0 | -19,0 | -19,0 |
| Mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 10,0 | 10,5 | 10,0 | 10,0 | 10,5 |
| Mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,742 | 0,7 | 0,691 | 0,737 | 0,746 |
| Mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,2 | 13,3 | 13,3 | 14,0 | 14,1 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 373 | 376 | 376 | 396 | 399 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 214 | 205 | 201 | 226 | 231 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 195 | 185 | 182 | 205 | 209 |
| Partikelförmige Emission | | | | | | |
| Rohgasstaubkonzentration - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 59,2 | 71,1 | 113,9 | 78,0 | 139,6 |

Tabelle 6.6-7: Mess- und Berechnungsergebnisse von Reingasstaubkonzentrationen ermittelt mit Gravimat SHC-5- Messkampagne 1

| Messgröße | Dim. | Messg. 1.1 | Messg. 1.2 | Messg. 1.3 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 952 | 952 | 952 |
| Bezugsgrößen | | | | |
| mittl. Abgastemperatur | °C | 150,0 | 146,0 | 143,3 |
| stat. Druck | mbar | -18,8 | -17,9 | -18,6 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,87 | 1,00 | 0,85 |
| mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 14,0 | 14,2 | 14,3 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 392 | 398 | 401 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 263 | 307 | 261 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 246 | 288 | 244 |
| Partikelförmige Emission | | | | |
| Reingasstaubkonzentration - Betriebszustand | mg/m ³ | 5,1 | 5,7 | 4,9 |
| - Normzustand, feucht | mg/m ³ i.N. | 7,7 | 7,4 | 7,6 |
| - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 8,2 | 7,9 | 8,1 |

Tabelle 6.6-8: Mess- und Berechnungsergebnisse von Reingasstaubkonzentrationen ermittelt mit Gravimat SHC-5- Messkampagne 2/ 3

| Messgröße | Dim. | Messg. 2.1 | Messg. 3.1 | Messg. 3.2 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 959 | 943 | 942 |
| Bezugsgrößen | | | | |
| mittl. Abgastemperatur | °C | 143,9 | 141,7 | 136,2 |
| stat. Druck | mbar | -25,2 | -17,8 | -18,0 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 8,0 | 15,0 | 15,0 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 1,02 | 0,97 | 0,94 |
| mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 14,4 | 13,9 | 15,6 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 404 | 390 | 437 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 317 | 288 | 316 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 291 | 245 | 269 |
| Partikelförmige Emission | | | | |
| Reingasstaubkonzentration - Betriebszustand | mg/m ³ | 2,9 | 5,6 | 3,8 |
| - Normzustand, feucht | mg/m ³ i.N. | 3,7 | 7,5 | 5,2 |
| - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 4,1 | 8,8 | 6,1 |

Tabelle 6.6-9. Mess- und Berechnungsergebnisse von Reingasstaubkonzentrationen ermittelt mit Gravimat SHC-5- Messkampagne 3

| Messgröße | Dim. | Messg. 3.3 | Messg. 3.4 | Messg. 3.5 | Messg. 3.6 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 924 | 936 | 940 | 940 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| mittl. Abgastemperatur | °C | 132,3 | 130,6 | 128,9 | 128,2 |
| stat. Druck | mbar | -18,0 | -18,2 | -18,5 | -18,4 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,99 | 0,97 | 0,95 | 0,96 |
| mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,7 | 14,6 | 14,8 | 14,4 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 384 | 409 | 416 | 404 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 291 | 305 | 304 | 299 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 247 | 260 | 259 | 254 |
| Partikelförmige Emission | | | | | |
| Reingasstaubkonzentration - Betriebszustand | mg/m ³ | 3,8 | 3,7 | 3,2 | 5,0 |
| - Normzustand, feucht | mg/m ³ i.N. | 5,0 | 5,0 | 4,4 | 6,8 |
| - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 5,8 | 5,1 | 5,1 | 7,9 |

Tabelle 6.6-10: Mess- und Berechnungsergebnisse von Reingasstaubkonzentrationen ermittelt mit Gravimat SHC-5- Messkampagne 4

| Messgröße | Dim. | Messg. 4.1 | Messg. 4.2 | Messg. 4.3 | Messg. 4.4 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 953 | 953 | 953 | 952 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| mittl. Abgastemperatur | °C | 134,4 | 137,0 | 137,5 | 138,2 |
| stat. Druck | mbar | -19,6 | -20,0 | -19,8 | -19,6 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 1,07 | 0,99 | 0,99 | 0,98 |
| mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,9 | 14,1 | 14,0 | 14,2 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 391 | 395 | 392 | 399 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 321 | 300 | 299 | 300 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 273 | 255 | 254 | 255 |
| Partikelförmige Emission | | | | | |
| Reingasstaubkonzentration - Betriebszustand | mg/m ³ | 2,6 | 4,1 | 3,6 | 3,0 |
| - Normzustand, feucht | mg/m ³ i.N. | 3,2 | 5,4 | 4,7 | 4,0 |
| - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 3,8 | 6,3 | 5,5 | 4,7 |

Tabelle 6.6-11: Mess- und Berechnungsergebnisse von Reingasstaubkonzentrationen ermittelt mit Gravimat SHC-5- Messkampagne 5

| Messgröße | Dim. | Messg. 5.1 | Messg. 5.2 | Messg. 5.3 | Messg. 5.4 |
|--|------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Messzeit | min | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Barometerstand | mbar | 955 | 955 | 953 | 953 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| mittl. Abgastemperatur | °C | 134,0 | 137,1 | 137,4 | 141,2 |
| stat. Druck | mbar | -19,0 | -18,7 | -19,0 | -18,3 |
| mittl. Feuchte bezogen auf trockenes Abgas | Vol.-% | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,0 |
| mittl. Dichte des Abgases - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,91 | 0,87 | 0,99 | 0,99 |
| mittl. Gasgeschwindigkeit an der Messstelle | m/s | 13,8 | 14,1 | 13,7 | 13,4 |
| Abgasvolumenstrom - Betriebszustand | m ³ /h | 388 | 397 | 383 | 377 |
| - Normzustand, feucht | m ³ /h i.N. | 273 | 266 | 292 | 271 |
| - Normzustand, trocken | m ³ /h i.N. | 232 | 225 | 249 | 230 |
| Partikelförmige Emission | | | | | |
| Reingasstaubkonzentration - Betriebszustand | mg/m ³ | 1,9 | 2,3 | 1,8 | 2,0 |
| - Normzustand, feucht | mg/m ³ i.N. | 2,7 | 3,5 | 2,3 | 2,8 |
| - Normzustand, trocken | mg/m ³ i.N. | 3,2 | 4,1 | 2,7 | 3,3 |

Damit kann festgestellt werden, dass das Abscheidesystem auch unter ungünstigen Filtrationsbedingungen sehr niedrige Emissionswerte garantiert. Dies gilt umso mehr, da es sich bei den durch die Feuerung freigesetzten Stäuben um feinste Partikel handelt, welche insgesamt schwierig abzuscheiden sind. Dies zeigen deutlich die durchgeführten Kaskaden-Impaktormessungen (vgl. 0). Diese weisen aus, dass der größte Massenanteil der Stäube im Rohgas unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ liegt. Eine genaue Zuordnung der Partikelgrößen ergab sich durch den Einsatz des Niederdruckimpaktors im Rahmen der Abschlussmessungen.

Durch die optische Analyse des Rohgasstromes mittels Streulichtmessgerät kann der zeitliche Verlauf der Rohgasstaubkonzentration verdeutlicht werden (vgl. Bild 6.6-1). Die Staubsitzen entstehen jeweils bei Aufgabe von frischem Brennstoff auf das Rost und der damit verbundenen Rostvorschubbewegung.

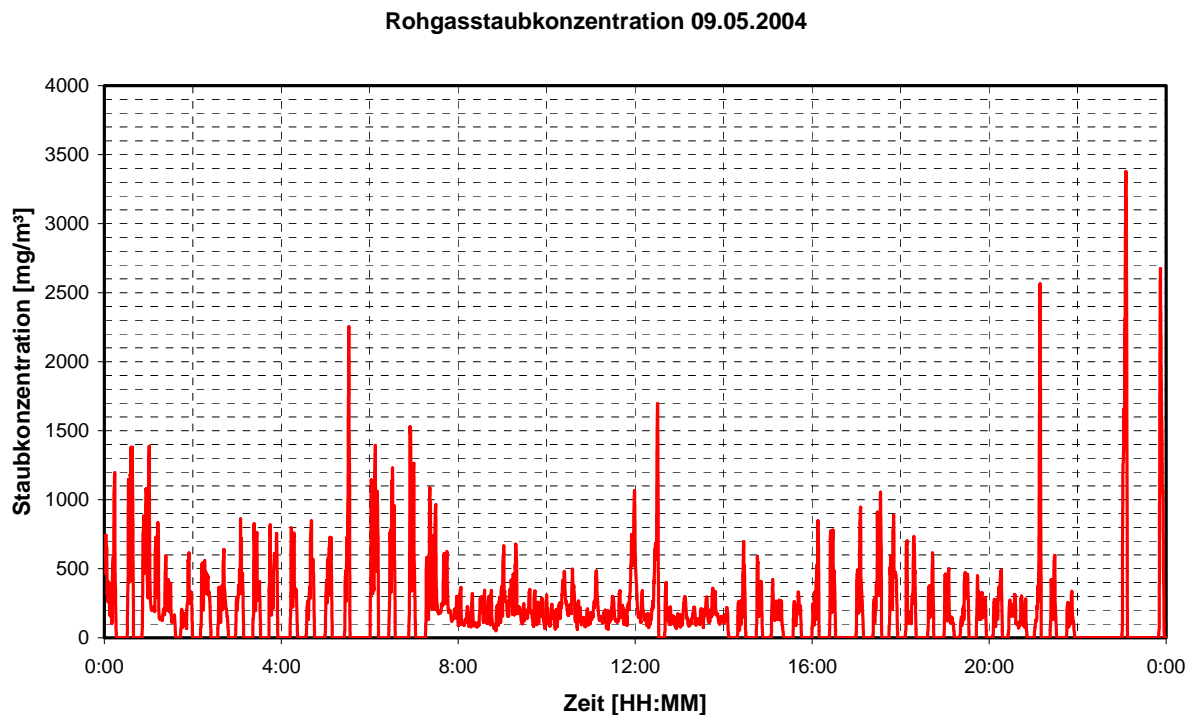


Bild 6.6-1: Staubsitzen im Rohgas bei den Rostvorschubbewegungen

6.7 Partikelgrößenverteilung

Zur Charakterisierung der Partikelgröße der Stäube in Roh- und Reingas wurden Messungen mit verschiedenen Kaskadenimpaktoren durchgeführt. Da die Messungen mit den 7-stufigen Impaktor FIF 7 nach VDI 2066 Bl. 5 keine Aussagen zur Partikelgrößenverteilung unterhalb von $0,5\ \mu\text{m}$ ermöglichten, wurden Messungen mit einem Niederdruckimpaktor nach Prof. Berner durchgeführt. Die dazu gehörigen Messprotokolle sind im Anhang enthalten. Bild 6.7-1 zeigt die ermittelten Partikelgrößenverteilung im Rohgas mit Dichtfunktion, sowie

Siebthrough and residue curve. Clearly recognizable the maximum in the density function at 0,2 µm.

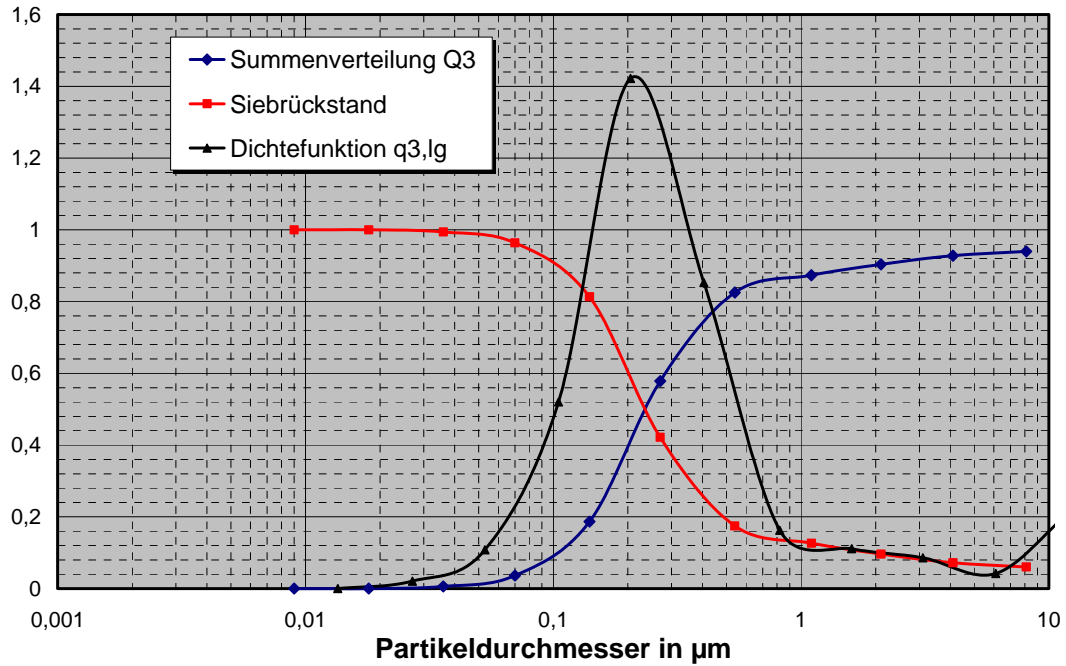


Bild 6.7-1: Partikelgrößenverteilungen für die erste Rohgasmessung

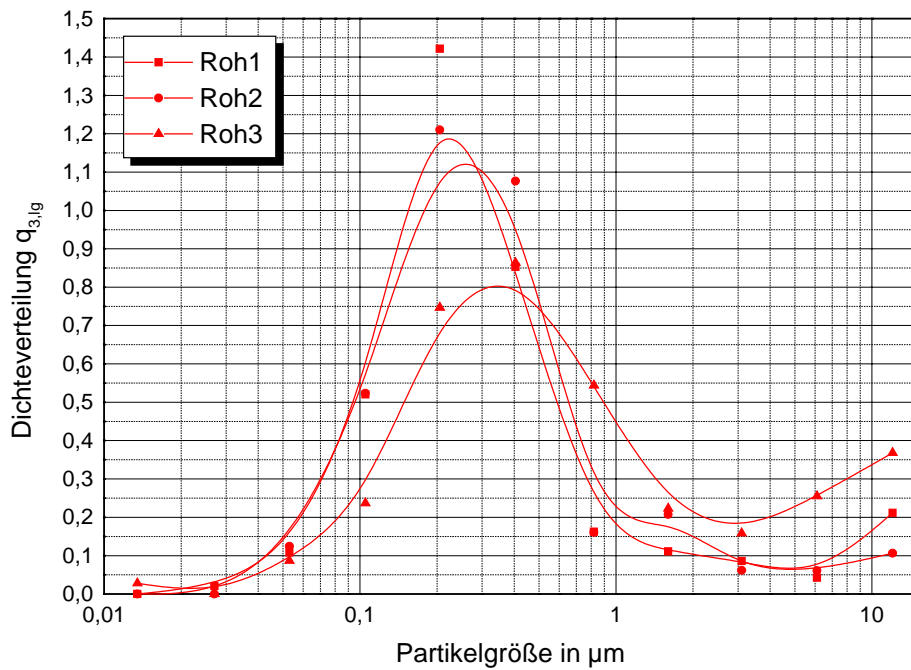


Bild 6.7-2: Partikelgrößenverteilungen der drei Rohgasmessungen im Vergleich

Bild 6.7-2 zeigt die Dichtefunktionen der drei durchgeführten Rohgas- Messungen im Vergleich. Dabei kann eine sehr gute Übereinstimmung der ersten beiden Kurven festgestellt werden. Die etwas ins größere reichende Verteilungsfunktion ist auch plausibel, da hier ein Anfahrvorgang mit in die Messung einbezogen wurden.

Eine etwas andere Situation ergibt sich bei der Betrachtung der Ergebnisse der Reingasmessungen gemäß Bild 6.7-3. Die Verteilungsfunktionen weichen relativ stark voneinander ab, es gibt kein so stark ausgeprägtes Maximum in der Verteilungsfunktion, es finden sich auch grobe Partikel. Dies resultiert aus den Staubdurchtritten am Filter. Die durchtretenden Partikel sind Agglomerate und dementsprechend zum Teil größer als die Rohgaspartikel und werden so über die bei den Reingasmessungen erheblich längere Messzeit mit erfasst.

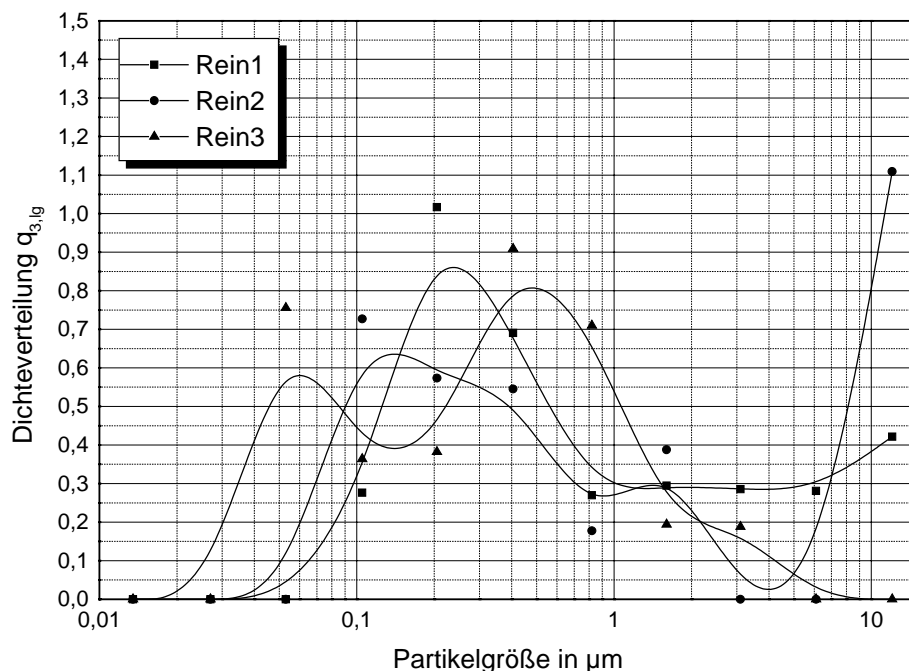


Bild 6.7-3: Partikelgrößenverteilungen der drei Reingasmessungen im Vergleich

Dies geht auch deutlich aus dem Vergleich der Partikelgrößenverteilungen von Roh- und Reingas in Bild 6.7-4 hervor.

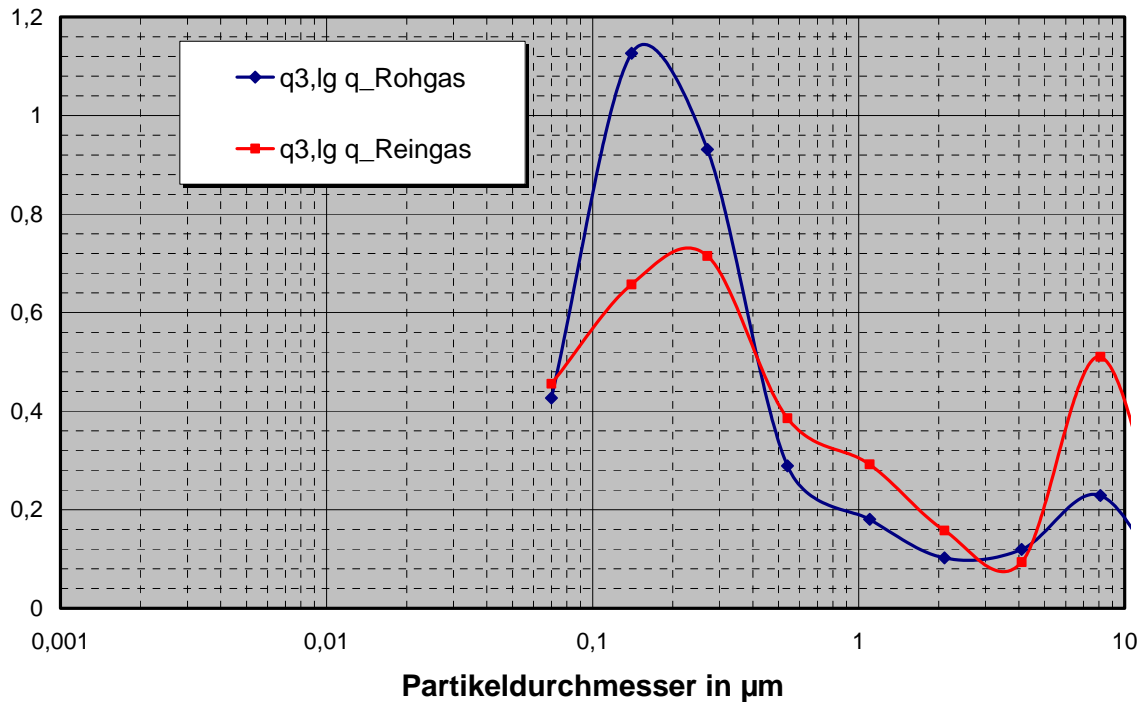


Bild 6.7-4: Vergleich der gemittelten Verteilungsfunktionen von Roh- und Reingas

6.8 Filterstaub und Staubinhaltsstoffe

6.8.1 Korngrößenverteilung der Bunkerstäube

Die Analysen der Bunkerstäube (vgl. Bild 6.8-1) zeigen auch eine entsprechende Feinheit der agglomerierten Stäube. Der mittlere Partikeldurchmesser der Bunkerstäube liegt in allen Betriebsphasen gleichmäßig bei rund 10 μm . In Tabelle 6.8-1 sind die Staubdichte und die statistischen Momente der Verteilungsfunktionen zusammengestellt.

Tabelle 6.8-1: Dichte und statistische Momente der Partikelgrößenverteilungen der Bunkerstäube in den einzelnen Erprobungsphasen

| Erprobungsphase Nr.: | Staubdichte ρ_s in g cm^{-3} | Partikelgröße x_{16} in μm | Partikelgröße x_{50} in μm | Partikelgröße x_{84} in μm |
|-------------------------|---|--|--|--|
| 1 | 2,84 | 3,13 | 10,12 | 20,23 |
| 2 | 2,62 | 3,21 | 9,39 | 19,04 |
| 3 | 2,68 | 3,11 | 9,22 | 18,08 |
| 4 | 2,62 | 5,58 | 15,12 | 27,49 |
| 5 | 2,62 | 4,20 | 12,13 | 24,75 |
| 6 | 2,93 | 3,49 | 9,3 | 19,88 |
| 7 | 3,07 | 4,03 | 10,19 | 10,26 |
| 8 | 3,07 | 3,91 | 10,22 | 21,10 |
| 9 | 2,81 | 3,48 | 9,70 | 21,17 |
| 10 | 2,81 | 4,15 | 13,75 | 25,40 |
| Mittelwert | 2,81 | 3,83 | 10,91 | 20,74 |

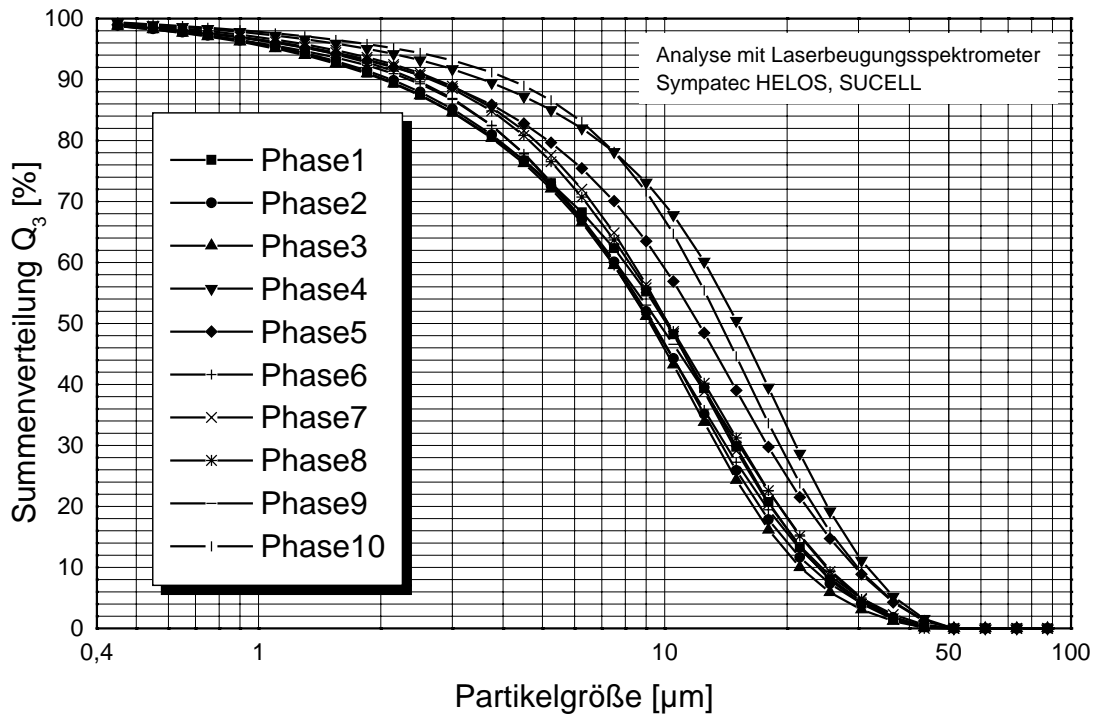


Bild 6.8-1: Partikelgrößenverteilungen der Bunkerstäube in den einzelnen Erprobungsphasen von durchschnittlich 6 Tagen

6.9 Staubinhaltsstoffe

Um Unterschiede im Flug-Staub der verschiedenen Brennstoff-Fractionen zu erkennen wurden im LfU Augsburg zwei Staubproben auf deren Inhaltsstoffe analysiert. Dabei zeigte sich, dass sich die Stäube erwartungsgemäß vorwiegend aus Chloriden und Sulfaten zusammensetzten. Signifikante Unterschiede im Konzentrationsniveau konnten zwischen den beiden Staubproben nicht festgestellt werden.

Tabelle 6.9-1: Ergebnisse des Labors des LfU Augsburg in Bezug auf die Staubinhaltsstoffe

| | | 3 | 4 |
|-------|-------|--------|--------|
| | | SP 01 | SP 02 |
| Cd | mg/kg | 139 | 140 |
| Chlor | mg/kg | | |
| Cl | mg/kg | 109000 | 107000 |
| Cr | mg/kg | 203 | 218 |
| Cu | mg/kg | 397 | 384 |
| Hg | mg/kg | 0.109 | 0.107 |
| Ni | mg/kg | 44.4 | 54.2 |
| Pb | mg/kg | 3800 | 3810 |
| S | mg/kg | 135000 | 134000 |
| Tl | mg/kg | 7.50 | 9.20 |
| Zn | mg/kg | 21000 | 21000 |

6.10 Ergebnisse der Gasmessungen

In Rahmen der zweiten Mess-Serie wurde mittels FTIR-Spektrometer eine bereite Palette von Gaskomponenten gemessen. In dieser Betriebsphase war kein permanenter Wärmebedarf zu verzeichnen, so dass sowohl Betriebs- als auch Bereitschaftszyklen messtechnisch erfasst werden konnten. Bild 6.10-1 zeigt einen Tagesgang für die wesentlichen Gaskomponenten. Dabei wird am Verlauf der NO_x-Konzentration deutlich, dass die stärkste Wärmeabnahme in den Vormittagsstunden bei Öffnung des Sibyllenbades liegt.

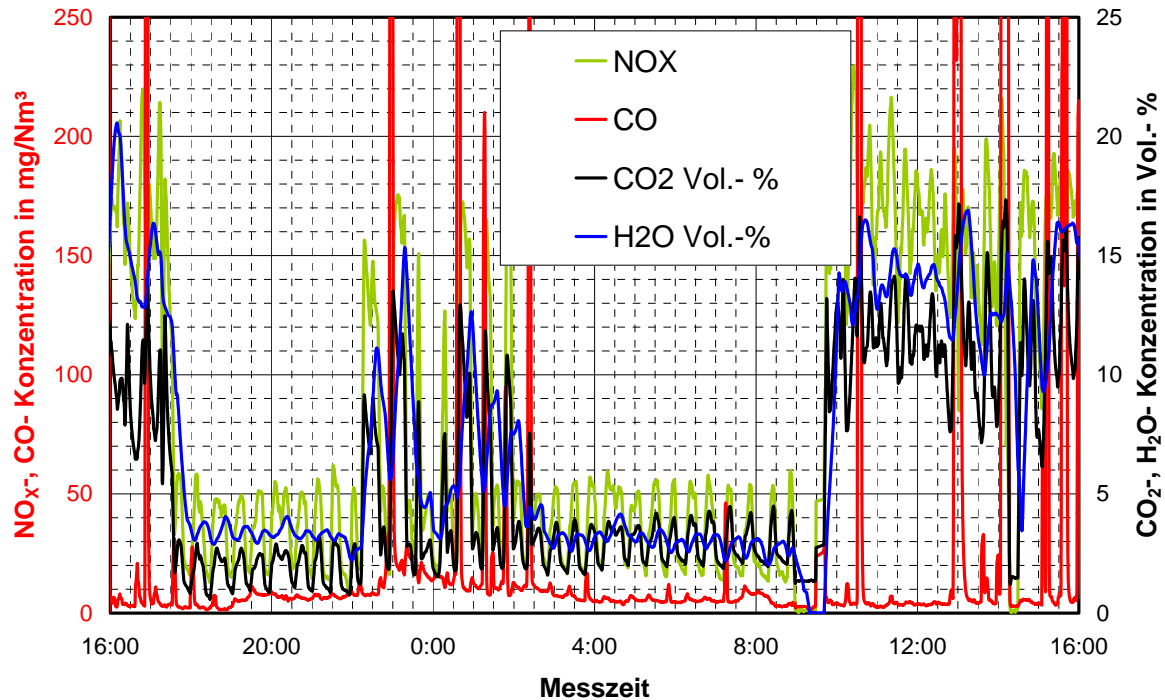


Bild 6.10-1: Tagesgang der Konzentrationswerte von NO_x , CO , CO_2 und H_2O bei geringer Wärmeabnahme

Bild 6.10-2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Gaskonzentrationen bei vollem Kesselbetrieb über einen Zeitraum von 4 – Halbstunden- Mittelwerten (Tabelle 6.10-1). Auffällig sind hier die sehr niedrigen CO -Werte, welche durch das offensichtlich sehr gute Verbrennungsverhalten des Kessels ermöglicht werden.

Die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der HCl - und SO_2 -Konzentrationen in Bild 6.10-4 verdeutlicht, dass ein sehr gleichmäßiges Verbrennungsverhalten mit geringen Emissionen realisiert wird.

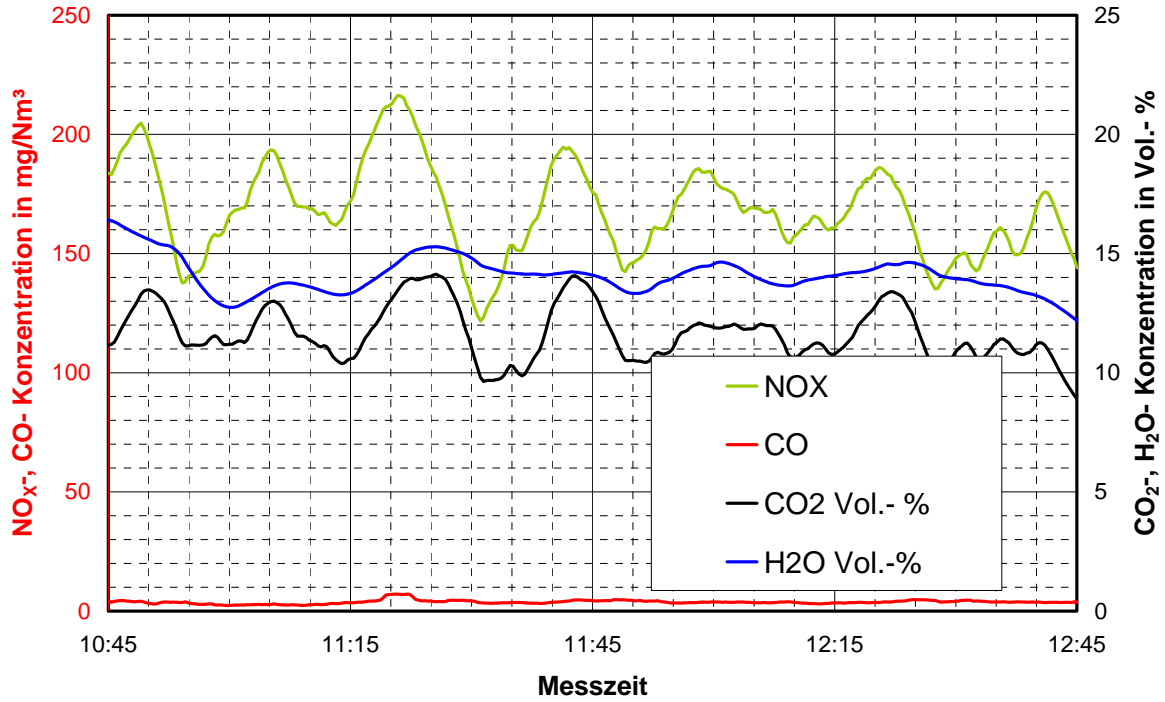


Bild 6.10-2: Zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen bei voller Leistung der Kesselanlage

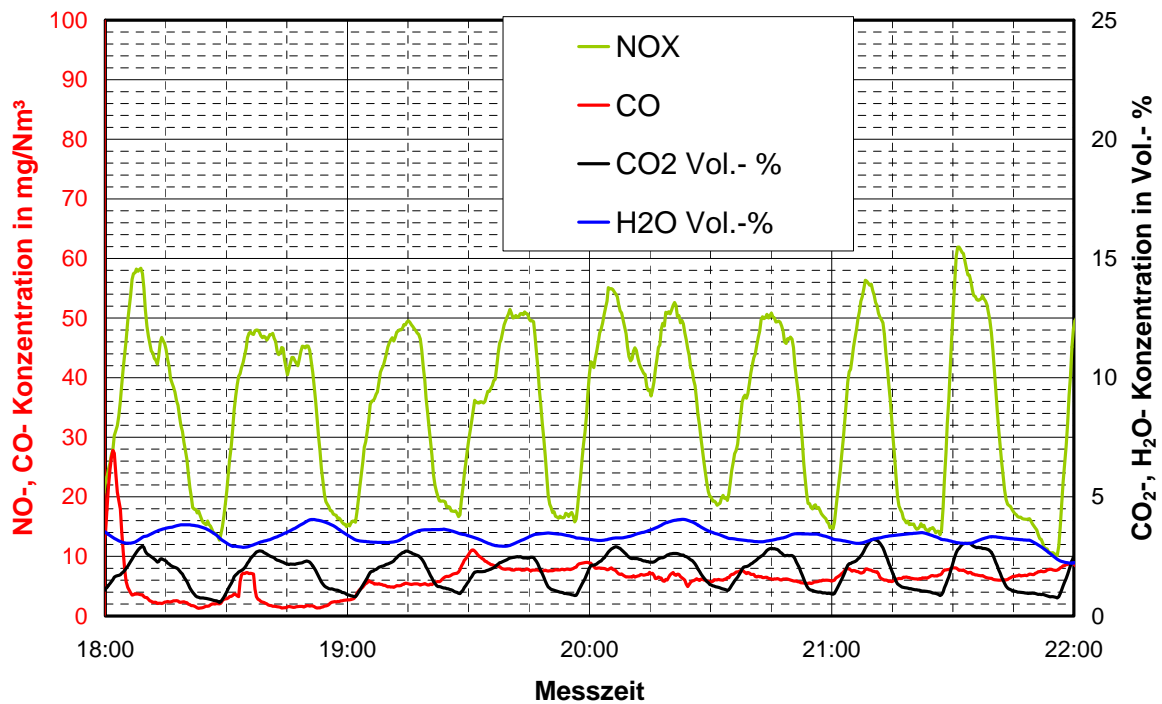


Bild 6.10-3: Zeitlicher Verlauf der Gaskonzentrationen bei Gluterhaltungsbetrieb Kesselanlage

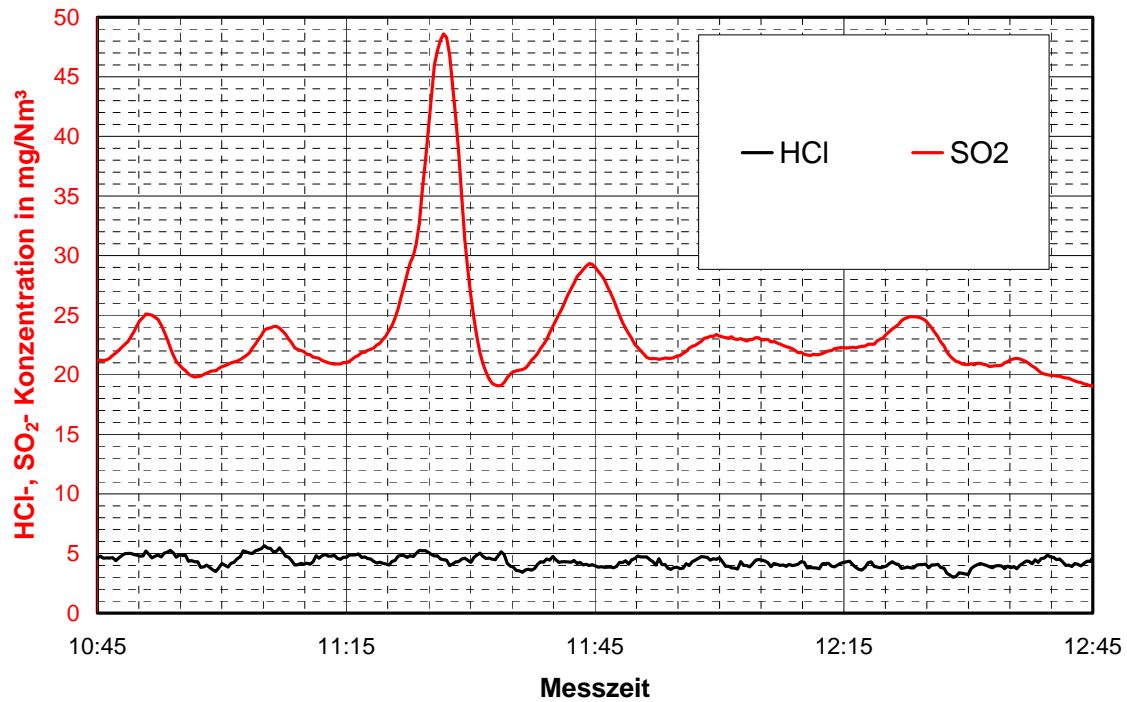


Bild 6.10-4: Zeitlicher Verlauf der HCl- und SO₂- Konzentrationen bei voller Leistung der Kesselanlage

Die Darstellung der Messwerte für den Schwachlastbetrieb (Gluterhaltung) in Tabelle 6.10-2 zeigt, dass auch in diesem Betriebszustand keine unkontrollierten Verschmelzungsvorgänge ablaufen - es werden nur geringe Emissionen freigesetzt.

Lediglich beim abrupten Herunterfahren der Kesselleistung (Abschalten des Saugzuges) werden Emissionsspitzen hervorgerufen.

Tabelle 6.10-1: Halbstundenmittelwerte für die gemessenen Gaskomponenten bei vollem Kesselbetrieb

| Messzeit | | Methan | Ammoniak | SO ₂ | NO | HCl | H ₂ O | NO ₂ | CO ₂ | CO | N ₂ O | NO _x |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| von | bis | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | Vol.-% | mg/Nm ³ | Vol.-% | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ |
| 18.03.2004 10:45 | 18.03.2004 11:15 | 0,0 | 2,2 | 22,0 | 112,1 | 4,7 | 13,5 | 0,1 | 11,8 | 3,1 | 0,0 | 171,9 |
| 18.03.2004 11:15 | 18.03.2004 11:45 | 0,0 | 2,2 | 27,5 | 113,9 | 4,4 | 14,8 | 0,1 | 12,3 | 4,3 | 0,0 | 174,7 |
| 18.03.2004 11:45 | 18.03.2004 12:15 | 0,0 | 2,1 | 22,6 | 107,5 | 4,2 | 13,7 | 0,1 | 11,3 | 3,7 | 0,0 | 164,9 |
| 18.03.2004 12:15 | 18.03.2004 12:45 | 0,0 | 2,0 | 21,6 | 103,9 | 4,1 | 13,2 | 0,1 | 11,2 | 3,9 | 0,0 | 159,4 |
| | Mittelwert | 0,0 | 2,1 | 23,4 | 109,3 | 4,3 | 13,8 | 0,1 | 11,6 | 3,8 | 0,0 | 167,7 |

Tabelle 6.10-2: Halbstundenmittelwerte für die gemessenen Gaskomponenten bei Schwachlast (Gluterhaltung)

| Messzeit | | Methan | Ammoniak | SO ₂ | NO | HCl | H ₂ O | NO ₂ | CO ₂ | CO | N ₂ O | NO _x |
|------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| von | bis | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | Vol.-% | mg/Nm ³ | Vol.-% | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ | mg/Nm ³ |
| 17.03.2004 18:00 | 17.03.2004 18:30 | 0,4 | 0,5 | 9,1 | 21,6 | 3,8 | 3,3 | 0,5 | 1,7 | 4,7 | 0,5 | 33,6 |
| 17.03.2004 18:30 | 17.03.2004 19:00 | 0,3 | 0,9 | 9,6 | 23,3 | 3,5 | 3,6 | 0,5 | 1,9 | 2,6 | 0,6 | 36,2 |
| 17.03.2004 19:00 | 17.03.2004 19:30 | 0,7 | 1,4 | 9,2 | 21,3 | 3,9 | 3,3 | 0,5 | 1,8 | 6,0 | 0,4 | 33,1 |
| 17.03.2004 19:30 | 17.03.2004 20:00 | 1,1 | 1,4 | 9,3 | 22,7 | 4,2 | 3,2 | 0,5 | 1,8 | 8,2 | 0,4 | 35,3 |
| 17.03.2004 20:00 | 17.03.2004 20:30 | 0,7 | 1,4 | 10,2 | 27,7 | 4,7 | 3,8 | 0,4 | 2,3 | 6,7 | 0,7 | 42,9 |
| 17.03.2004 20:30 | 17.03.2004 21:00 | 0,8 | 1,5 | 9,0 | 20,7 | 5,0 | 3,1 | 0,5 | 1,8 | 6,2 | 0,5 | 32,2 |
| 17.03.2004 21:00 | 17.03.2004 21:30 | 0,9 | 1,5 | 9,4 | 21,3 | 5,2 | 3,3 | 0,3 | 1,8 | 7,0 | 0,5 | 33,0 |
| 17.03.2004 21:30 | 17.03.2004 22:00 | 1,0 | 1,2 | 8,9 | 20,5 | 4,6 | 2,8 | 0,3 | 1,8 | 7,2 | 0,4 | 31,7 |
| | Mittelwert | 0,7 | 1,2 | 9,3 | 22,4 | 4,4 | 3,3 | 0,5 | 1,9 | 6,1 | 0,5 | 34,8 |

7 Außerbetriebnahme/ Festigkeit der Filterelemente

7.1 Demontage, Staubablagerungen im Rohgasraum

Nach Abschluss der Erprobungen und Messungen wurde zur Überprüfung der Filterelemente der Roh- und Reingasraum geöffnet und sowohl die Patronen als auch die Staubablagerungen visuell beurteilt. Bild 7.1-1 und Bild 7.1-2 zeigen den Zustand nach der Erprobung. Es fanden sich nur sehr geringe Staubablagerungen im Reingasraum, die Falten der Filterelemente waren nicht zugesetzt.



Bild 7.1-1: Blick auf Filterelemente durch Revisionsöffnung



Bild 7.1-2: Filterelement mit Abdeckblech und Heizelement/ Strömungsleiteinrichtung



Bild 7.1-3: Reingasraum mit geringen Staubspuren

7.2 Kontrolle der Filterelemente

Für die Kontrolle der Festigkeit der Filterelemente wurden diese ausgebaut (vgl. Bild 7.2-1).



Bild 7.2-1: Demontage eines Filterelementes; durchgeführter Spannungsanschluss für das Heizelement

Es zeigte sich auch hier, insbesondere im Kopfteil der Filterpatronen, dass die Falten nicht zugesetzt oder verklebt waren und durch den Abscheiderbetrieb gut regeneriert wurden. Allerdings waren in den Falten noch Stäube eingelagert, welche sich durch Abklopfen leicht entfernen ließen (vgl. Bild 7.2-4).

Nach dieser manuellen Reinigung waren die Patronen wieder völlig sauber.



Bild 7.2-2: Ausgebaute Patrone – Deckelrunde

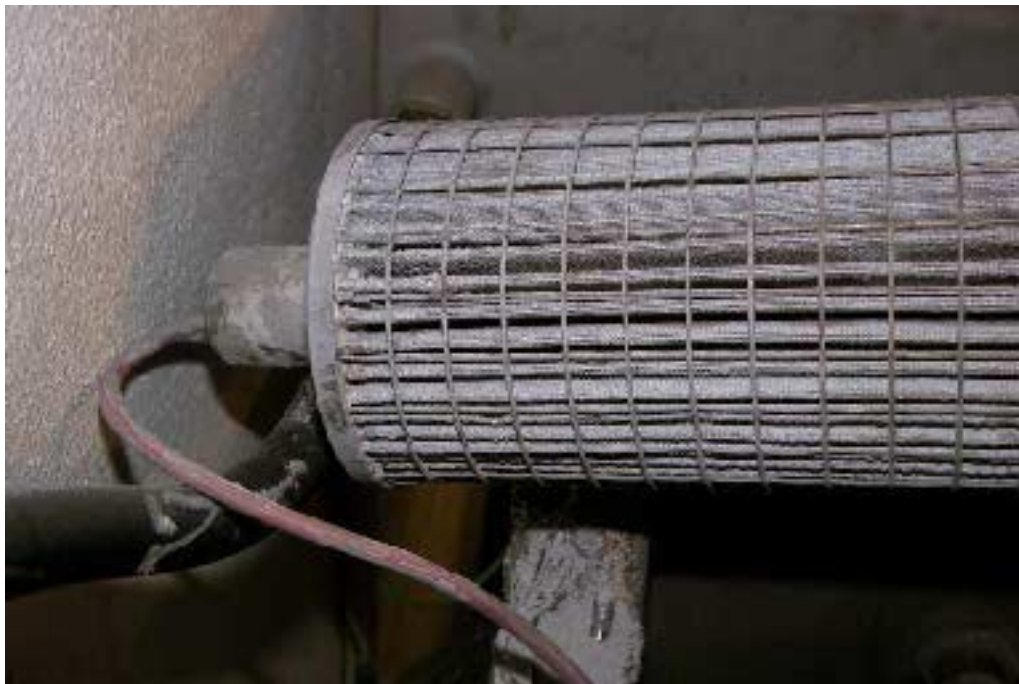


Bild 7.2-3: Ausgebaute Patrone – untere Runde



Bild 7.2-4: Abklopfen der Filterelemente – Staub löst sich völlig



Bild 7.2-5: Patrone nach erfolgter manueller Reinigung

7.2.1 Alterungsverhalten des Filtermaterials

Alle Oberflächenfiltermaterialien sind bei Einsatz, abhängig vom Entstaubungsfall, einem Alterungsverhalten unterworfen. Damit wird die bleibende Staubeinlagerung im Filtermaterial beschrieben, welche sich auch durch intensive Regenerierung nicht mehr entfernen lässt. Eine wichtige Kenngröße ist somit der Druckverlust in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz im Einsatzfall. Bild 7.2-6 zeigt die ermittelten Kennlinien für die durchgeführten Untersuchungsabschnitte. Dabei ist erkennbar, dass zwar eine Materialalterung, keinesfalls aber eine Verstopfung eingetreten ist. Für die eingesetzten Stäube ist somit eine sehr gute Regenerierung bis auf einen fixen Restdruckverlust möglich.

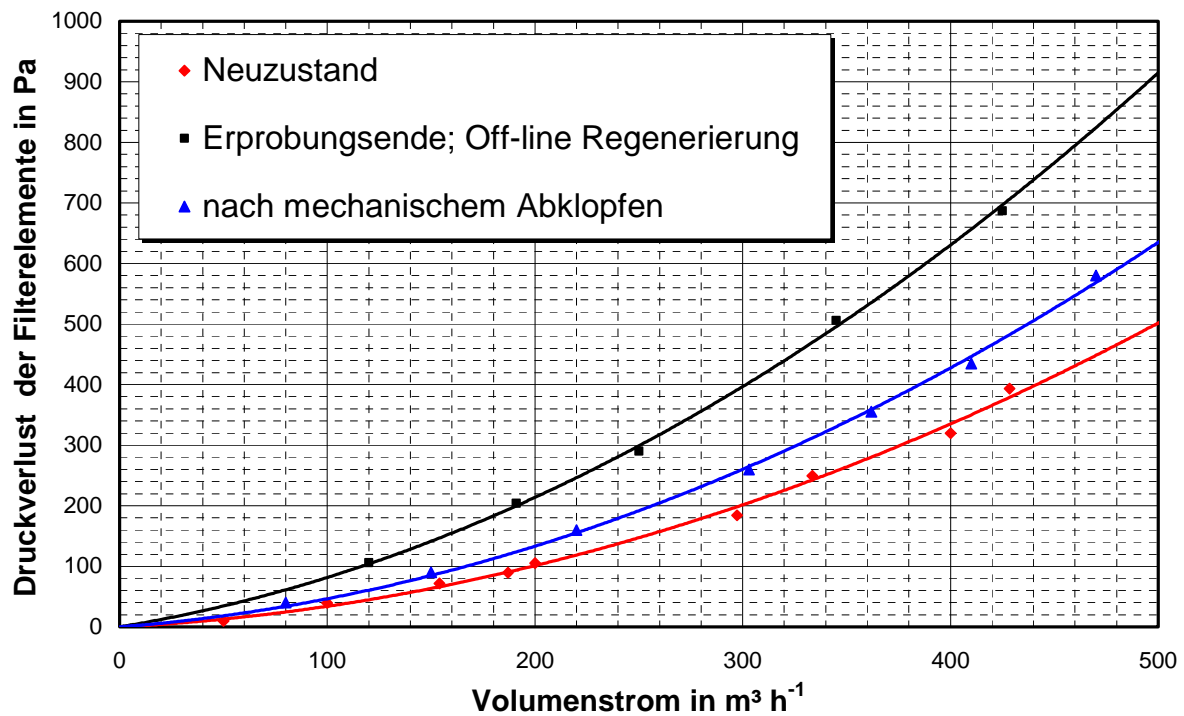


Bild 7.2-6: Druckverlustkennlinien vor und nach der Erprobung

8 Bewertung der Erprobungsergebnisse und Zusammenfassung

Nach Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsanlage im Heizhaus des Sibyllenbades Neualbenreuth wurden Erstmessungen - Betriebsüberwachung - Abschlussmessung und Bewertung des Verschleißes der Anlage realisiert. Die vorliegenden Ergebnisse mit Schwerpunkt auf den Staub- und Gasmesswerten wurden im vorliegenden Bericht als Übersicht zusammengefasst. Diese lassen folgende Schlüsse zu:

- Die Rohgaskonzentrationen während der Erprobung lagen relativ niedrig im Bereich von 70 bis 200 mg/Nm³.
- Mit der kontinuierlichen Überwachung durch ein Photometer wurden aber Staubspitzen im Bereich bis 1000 mg/m³ detektiert.
- Mittels Kaskadenimpaktor wurden Messungen der Partikelgrößenverteilungen in Roh- und Reingas durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die rohgasseitigen Stäube sehr fein (< 0,5 µm) sind.
- Der neuartige Abscheider mit Filterelementen aus Metallgewebe erzielt auch unter diesen ungünstigen Filtrationsbedingungen gute Abscheideleistungen, dabei liegen die Reingasstaubkonzentrationen unterhalb von 10 mg/Nm³.
- Durch die Abscheidung werden die Stäube agglomeriert und liegen als leicht aufschwebender, fließfähiger Staub mit einer mittleren Korngröße von 10 µm vor.
- Staubemissionen des Kessels werden vorwiegend bei der Beschickung induziert.
- Die gasförmigen Emissionen sind gering, HCl wird nur unwesentlich freigesetzt.
- Eine Analyse der eingesetzten Brennstoffe mit hohem Grünanteil im Vergleich zum Normalbrennstoff ergab keine wesentlichen Unterschiede in der Staubzusammensetzung.
- Die Filterelemente bewährten sich hinsichtlich der Festigkeit und Regenerierbarkeit.
- Auf Grund der Beheizung der Filterelemente kam es zu keinerlei irreversiblen Staubanbackungen an den Patronen. Der Filter-Widerstand blieb stabil, dadurch blieb der Filterbetrieb stets störungsfrei und die zusätzliche Heizenergie wurde weitgehend kompensiert.
- Bedingt durch die sehr niedrigen Rohgasstaubkonzentrationen und dem extrem feinen Rohgasstaub konnten die Vorteile der eingesetzten Injektorsedimentationseinrichtung nicht in vollem Umfang zur Wirkung kommen, es wurden jedoch trotzdem wirksam verbesserte Druckverlustcharakteristika erreicht.
- Das Filter ist für die Abscheidung von Feinststäuben gut geeignet.
- Der Filtermaterial-Zustand nach Beendigung der Maßnahme spricht für eine hervorragende Standzeit der Filterausführung.

- In Ausweitung der Ergebnisse muss jetzt an einen Dauer-Einsatz an ausgesprochen kleinen Kesselgrößen und an Anlagen mit besonders hohen Anforderungen an die Reingaswerte gedacht werden.
Die Rauchgasfilter müssen dem Kessel in einer kompakten und normierten Baueinheit beistellbar sein, entsprechend den kompakten Kleinfeuerungsanlagen und den finanziellen Möglichkeiten der Kleinfeuerungsanlagen-Betreiber.

9 Literatur

- [1] Richtlinie 96/62/EG vom 27.09.1996 über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 296/55)
- [2] Richtlinie 99/30/EG vom 22.04.1999 über Grenzwerte von Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickoxide, Partikel und Blei in Luft (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 163/4)
- [3] MAK- und BAT-Werte-Liste der Deutschen Forschungsgemeinschaft 2002
- [4] Röhricht, Chr.; Kiesewalter, S.:
Entwicklung einer wirtschaftlichen Prozesskette zur energetischen Nutzung von halm- und holzartiger Biomasse im Freistaat Sachsen, Abschlussbericht
<http://www.smul.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/fachinformationen/pflanzenproduktion/Nutzung/download/355.pdf>
- [5] Goessler, R. (Hrsg.), 2001:
Agrarmärkte in Zahlen. Europäische Union 2001. Tier- und Pflanzenproduktion. ZMP Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle, Bonn, S. 212 f.
- [6] Kaltschmitt, M., 2001:
Regenerative Energien. BWK 53, Nr. 4, S. 69-78
- [7] Nitsch, J.; Rösch, Ch.; Trieb, F.; Nast, M.; Pehnt, M.; Kopfmüller, J., 2001:
Schlüsseltechnologie Regenerative Energien. Teilbericht im Rahmen des HGF-Verbundprojekts: "Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland". Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Stuttgart, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Juli 2001
- [8] Palz, W., 2000:
Erneuerbare Energien im Jahr 2000. Konferenzband "Neue Arbeitsplätze durch Erneuerbare Energien". Bonn: Eurosolar Verlag, S. 8-11
- [9] Rapp, S., 2000:
Die Mobilisierung land- und forstwirtschaftlicher Arbeitsplätze durch den Aus- und Aufbau eines Holzenergiehandels. Konferenzband "Neue Arbeitsplätze durch Erneuerbare Energien", Bonn: Eurosolar Verlag, S. 50-55

- [10] Ruchser, M., 2000:
Leitfaden für die Errichtung von Holzenergieanlagen - Umsetzung, Wirtschaftlichkeit, Technologien. Forum für Zukunftstechnologien/EFO Energie Forum GmbH, Bonn
- [11] Baumbach, G. u. A.: +
Schadstoffemissionen gewerblicher und industrieller Holz-feuerungen; Ermittlung der Schadstoffemissionen und Verfahren zur Emissionsminderung. Universität Stuttgart, Bericht-Nr. 33-1995
- [12] Kaltschmitt, M.; Hackmann, H.:
Energie aus Biomasse. Springer-Verlag, Okt. 2000
- [13] Heidenreich, R.:
Untersuchungen zur Emission bei der Verbrennung von unterschiedlichen Getreidekörnern. Fachbericht ILK-B-33/01-997
- [14] Hasler, P.; Nussbaumer, T.:
Aerosole aus Biomassefeuerungen: Grundlagen, Eigenschaften und Abscheidung. 5. Holzenergie-Symposium 1998, Bundesamt für Energie, Bern, 1998, S. 45-74
- [15] Neidel, Reimer, List, u.a.:
Abschlußbericht „Rauchgasreinigung bei der Biomasse-Verbrennung“ ILK 1995
- [16] Korb, U.; Augart G.; List, M.; Fischer, A.; List, S.:
Erfahrungen bei der Abgasreinigung in Krematorien. Vortrag zum Dresdner Kolloquium „Filternde Abscheider“, 21.11.95
- [17] Ergebnisse der Betriebsuntersuchungen an einer Prototypanlage zur Abgasreinigung und der experimentellen Untersuchungen an einer Teilstromversuchsanlage in einem Krematorium (Abschlußbericht). ILK Dresden, ILK-AB-7/95-547
- [18] List, M.:
Abgasreinigung bei kleineren Feuerungs- und Verbrennungsanlagen. VDI-KUT-Jahrbuch 1996/97, S. 244-251
- [19] List, M.; Heidenreich, R.; List, S.:
Rauchgasreinigung bei kleineren Feuerungs- und Verbrennungsanlagen. 1. Rauchgaskolloquium der BTU Cottbus, 14.-15.9.98

10 Anhang

10.1 Mess- und Berechnungsergebnisse der Staubkonzentrationsmessungen im Rohgas

Tabelle 10.1-1: Messung am 10.03.2004 – Mess- Serie 1

| Pos. | Meßgröße | Dimension | VersuchsfILTER URBAS-Kessel Hackschnitzel | | | |
|---|--|---------------------------|--|----------|----------|----------|
| | | | M1.1 | M1.2 | M1.3 | M1.4 |
| 1 | Datum | | 10.03.04 | 10.03.04 | 10.03.04 | 10.03.04 |
| 2 | Meßbeginn | | 11:09 | 11:57 | 13:31 | 14:26 |
| 3 | Meßzeit | min | 30 | 22 | 30 | 30 |
| 4 | Barometerstand | hPa | 952 | 952 | 952 | 952 |
| Bezugsgrößen | | | | | | |
| 5 | Rohrleitungsquerschnitt | m ² | 0,00785 | 0,00785 | 0,00785 | 0,00785 |
| 6 | mittl. Abgastemperatur | °C | 155,0 | 152,0 | 148,0 | 150,0 |
| 7 | statischer Druck | Pa | -11,2 | -10,7 | -11,0 | -11,0 |
| 8 | Wassergehalt | % | 10,0 | 10,5 | 10,5 | 10,0 |
| 9 | Wasseranteil | kg/m ³ | 0,0812 | 0,0852 | 0,0852 | 0,0812 |
| mittl. Rauchgaszusammensetzung | | | | | | |
| 10 | O ₂ | Vol.-% | 10,0 | 12,0 | 11,0 | 11,0 |
| mittl. Dichte des feuchten Abgases | | | | | | |
| 11 | - Normzustand | kg/m ³ i.N.tr. | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| 12 | - Normzustand, feucht | kg/m ³ i.N. | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| 13 | - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,770 | 0,775 | 0,782 | 0,780 |
| 14 | Gasgeschwindigkeit an der Meßstelle | m/s | 14,30 | 14,20 | 14,50 | 14,60 |
| Abgasvolumenstrom | | | | | | |
| 15 | - Betriebszustand | m ³ /h | 404,3 | 401,5 | 410,0 | 412,8 |
| 16 | - Normzustand feucht | m ³ /h i.N. | 242,3 | 242,3 | 249,8 | 250,3 |
| 17 | - Normzustand trocken | m ³ /h i.N.tr. | 220,1 | 219,1 | 225,9 | 227,4 |
| Absaugparameter | | | | | | |
| 18 | Sammler- Nr. | - | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 19 | Leergewicht (unbestaubt) | mg | 762,52 | 716,16 | 729,56 | 727,72 |
| 20 | Vollgewicht (bestaubt) | mg | 856,10 | 935,81 | 874,30 | 812,56 |
| 21 | Staubmasse | mg | 93,58 | 219,65 | 144,74 | 84,84 |
| 22 | Sondendurchmesser | mm | 15 | 15 | 15 | 15 |
| 23 | Absaugvolumen i.N.tr | m ³ | 0,8895 | 1,1543 | 0,9711 | 0,9564 |
| Emissionswerte | | | | | | |
| 24 | - Normzustand trocken | mg/m ³ i.N.tr. | 105,2 | 190,3 | 149,1 | 88,7 |
| 25 | - Normzustand trocken bez. auf 11%O ₂ | mg/m ³ i.N.tr. | 95,6 | 211,4 | 149,1 | 88,7 |
| 26 | Staubmassenstrom | g/h | 23,2 | 41,7 | 33,7 | 20,2 |

Tabelle 10.1-2

Messung am 18.03.2004 – Mess- Serie 2

| Pos. | Meßgröße | Dimension | VersuchsfILTER URBAS-Kessel | | |
|---|--|---------------------------|-----------------------------|---------|---------|
| | | | Hackschnitzel | | |
| | | | M2.1 | M2.2 | M2.3 |
| 1 | Datum | | | | |
| 2 | Meßbeginn | | 09:38 | 10:57 | 11:50 |
| 3 | Meßzeit | min | 30 | 30 | 30 |
| 4 | Barometerstand | hPa | 959 | 958 | 957 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| 5 | Rohrleitungsquerschnitt | m ² | 0,00785 | 0,00785 | 0,00785 |
| 6 | mittl. Abgastemperatur | °C | 147,0 | 147,1 | 142,4 |
| 7 | statischer Druck | Pa | -11,2 | -10,7 | -10,7 |
| 8 | Wassergehalt | % | 10,0 | 10,5 | 10,5 |
| 9 | Wasseranteil | kg/m ³ | 0,0812 | 0,0852 | 0,0852 |
| mittl. Rauchgaszusammensetzung | | | | | |
| 10 | CO | mg/m ³ i.N. | 31,3 | 3,6 | 56,8 |
| 11 | NOx | mg/m ³ i.N. | 169,8 | 169,9 | 151,5 |
| 12 | O ₂ | Vol.-% | 12,3 | 9,4 | 10,3 |
| 13 | CO ₂ | Vol.-% | 8,7 | 11,6 | 10,7 |
| mittl. Dichte des feuchten Abgases | | | | | |
| 14 | - Normzustand | kg/m ³ i.N.tr. | 1,341 | 1,356 | 1,351 |
| 15 | - Normzustand, feucht | kg/m ³ i.N. | 1,292 | 1,303 | 1,299 |
| 16 | - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,785 | 0,792 | 0,798 |
| 17 | Gasgeschwindigkeit an der Meßstelle | m/s | 17,20 | 18,30 | 16,80 |
| Abgasvolumenstrom | | | | | |
| 18 | - Betriebszustand | m ³ /h | 486,3 | 517,4 | 475,0 |
| 19 | - Normzustand feucht | m ³ /h i.N. | 298,9 | 318,0 | 295,2 |
| 20 | - Normzustand trocken | m ³ /h i.N.tr. | 271,5 | 287,5 | 266,9 |
| Absaugparameter | | | | | |
| 21 | Sammler- Nr. | - | 1 | 2 | 3 |
| 22 | Leergewicht (unbestaubt) | mg | 767,60 | 745,92 | 762,08 |
| 23 | Vollgewicht (bestaubt) | mg | 839,52 | 820,07 | 816,55 |
| 24 | Staubmasse | mg | 71,92 | 74,15 | 54,47 |
| 25 | Sondendurchmesser | mm | 8 | 8 | 8 |
| 26 | Absaugvolumen i.N.tr | m ³ | 0,9674 | 0,9463 | 1,0041 |
| Emissionswerte | | | | | |
| 27 | - Normzustand trocken | mg/m ³ i.N.tr. | 74,3 | 78,4 | 54,3 |
| 28 | - Normzustand trocken bez. auf 11%O ₂ | mg/m ³ i.N.tr. | 85,5 | 67,5 | 50,7 |
| 29 | Staubmassenstrom | g/h | 20,2 | 22,5 | 14,5 |

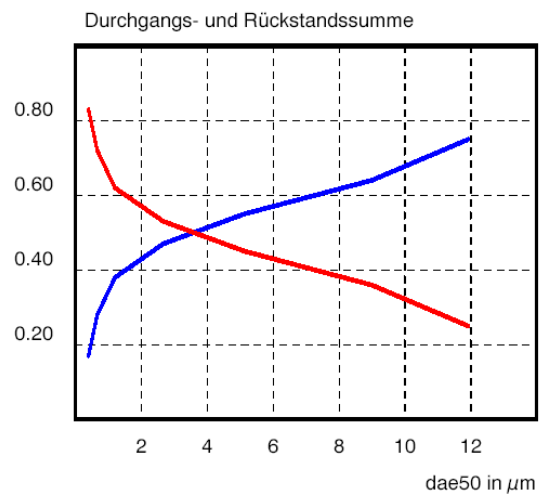
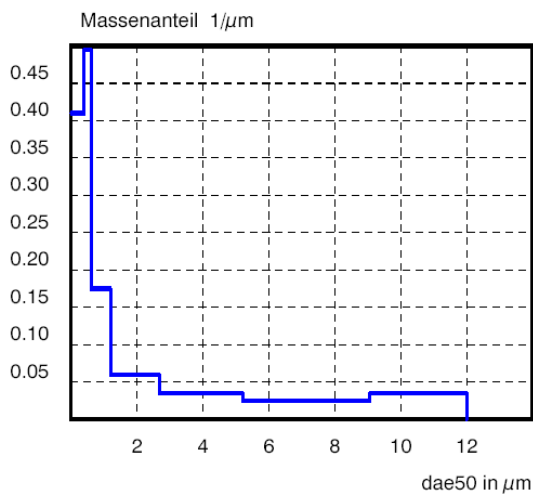
Tabelle 10.1-3 Messung am 18.03.2004 – Mess- Serie 3

| Pos. | Meßgröße | Dimension | VersuchsfILTER URBAS-Kessel Hackschnitzel | | |
|---|--|---------------------------|--|---------|---------|
| | | | M 3.1 | M 3.2 | M 3.3 |
| 1 | Datum | | | | |
| 2 | Meßbeginn | | 13:10 | 13:10 | 14:00 |
| 3 | Meßzeit | min | 30 | 30 | 30 |
| 4 | Barometerstand | hPa | 957 | 957 | 957 |
| Bezugsgrößen | | | | | |
| 5 | Rohrleitungsquerschnitt | m ² | 0,00785 | 0,00785 | 0,00785 |
| 6 | mittl. Abgastemperatur | °C | 145,0 | 145,0 | 145,0 |
| 7 | statischer Druck | Pa | -11,0 | -10,5 | -11,0 |
| 8 | Wassergehalt | % | 10,0 | 10,5 | 10,5 |
| 9 | Wasseranteil | kg/m ³ | 0,0812 | 0,0852 | 0,0852 |
| mittl. Rauchgaszusammensetzung | | | | | |
| 10 | CO | mg/m ³ i.N. | 299,2 | 56,3 | 33,6 |
| 11 | NOx | mg/m ³ i.N. | 120,3 | 148,0 | 155,0 |
| 12 | O ₂ | Vol.-% | 11,8 | 10,8 | 11,2 |
| 13 | CO ₂ | Vol.-% | 9,2 | 10,2 | 9,8 |
| mittl. Dichte des feuchten Abgases | | | | | |
| 14 | - Normzustand | kg/m ³ i.N.tr. | 1,342 | 1,348 | 1,346 |
| 15 | - Normzustand, feucht | kg/m ³ i.N. | 1,293 | 1,296 | 1,294 |
| 16 | - Betriebszustand | kg/m ³ | 0,789 | 0,791 | 0,790 |
| 17 | Gasgeschwindigkeit an der Meßstelle | m/s | 16,50 | 17,00 | 16,80 |
| Abgasvolumenstrom | | | | | |
| 18 | - Betriebszustand | m ³ /h | 466,5 | 480,7 | 475,0 |
| 19 | - Normzustand feucht | m ³ /h i.N. | 287,8 | 296,5 | 293,0 |
| 20 | - Normzustand trocken | m ³ /h i.N.tr. | 261,4 | 268,1 | 265,0 |
| Absaugparameter | | | | | |
| 21 | Sammler- Nr. | - | 4 | 5 | 6 |
| 22 | Leergewicht (unbestaubt) | mg | 759,53 | 754,63 | 749,56 |
| 23 | Vollgewicht (bestaubt) | mg | 837,30 | 854,55 | 828,12 |
| 24 | Staubmasse | mg | 77,77 | 99,92 | 78,56 |
| 25 | Sondendurchmesser | mm | 15 | 15 | 15 |
| 26 | Absaugvolumen i.N.tr | m ³ | 1,0609 | 1,0306 | 1,0737 |
| Emissionswerte | | | | | |
| 27 | - Normzustand trocken | mg/m ³ i.N.tr. | 73,3 | 97,0 | 73,2 |
| 28 | - Normzustand trocken bez. auf 11%O ₂ | mg/m ³ i.N.tr. | 79,7 | 95,1 | 74,7 |
| 29 | Staubmassenstrom | g/h | 19,2 | 26,0 | 19,4 |

10.2 Protokolle der Impaktormessungen

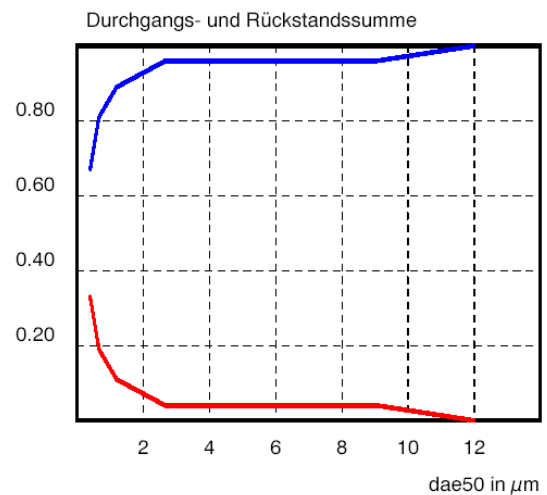
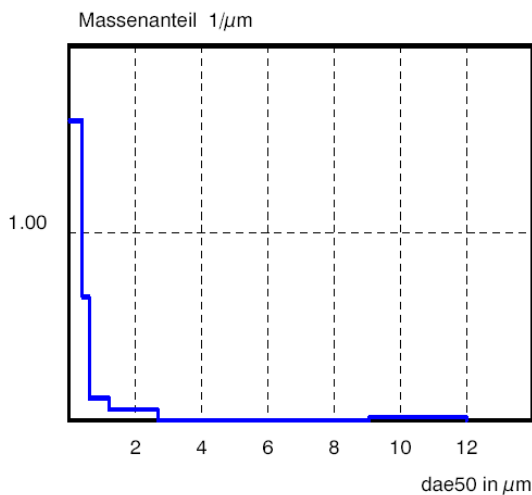
FRAKTIONIERENDE STAUBMESSUNG - Auswertung nach VDI 2066/BI. 5

| 1. Allgemeine Daten | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|-----------------------|-------------|---------|------------|-------------------|
| Meßort | : | Reingas | | | | | |
| Anlage | : | sybillenbad | | | | | |
| Datum | : | 10.03.1904 | | | | | |
| Meßzeit | : | 17:11 - 17:56 | | | | | |
| 2. Probennahme | | | | | | | |
| Luftdruck | : | 952.0 | mBar | Feuchte | : | 0.053 | kg/m ³ |
| stat. Druck | : | -18.0 | mBar | Dichte n. | : | 1.34 | kg/m ³ |
| Temperatur | : | 147.0 | °C | Dichte ptf. | : | 0.78 | kg/m ³ |
| Volumen. ptf | : | 3.09 | m ³ /h | mol. Masse | : | 29.2 | g/Mol |
| Volumen. n | : | 1.74 | m ³ /h | Viskosität | : | 2.20E-0005 | kg/m s |
| 3. Meßergebnisse | | | | | | | |
| Stufe | Intervall [µm] | dae50 [µm] | Masse [mg] | rel. M. | D-Summe | R-Summe | M-Ant. [1/µm] |
| 0 + 1 | > 11.9 | 11.9 | 3.0 | 0.25 | 0.75 | 0.25 | 0.00 |
| 2 | 9.0 - 11.9 | 9.0 | 1.2 | 0.10 | 0.64 | 0.36 | 0.03 |
| 3 | 5.2 - 9.0 | 5.2 | 1.1 | 0.09 | 0.55 | 0.45 | 0.02 |
| 4 | 2.7 - 5.2 | 2.7 | 1.0 | 0.08 | 0.47 | 0.53 | 0.03 |
| 5 | 1.2 - 2.7 | 1.2 | 1.0 | 0.08 | 0.38 | 0.62 | 0.06 |
| 6 | 0.6 - 1.2 | 0.6 | 1.2 | 0.10 | 0.28 | 0.72 | 0.18 |
| 7 | 0.4 - 0.6 | 0.4 | 1.3 | 0.11 | 0.17 | 0.83 | 0.49 |
| Endf. | 0.0 - 0.4 | 0.0 | 2.0 | 0.17 | 0.00 | 1.00 | 0.41 |
| Staubmasse : | | | 11.8 mg/Probe | | | | |
| Staubgehalt i.N. : | | | 9.0 mg/m ³ | | | | |



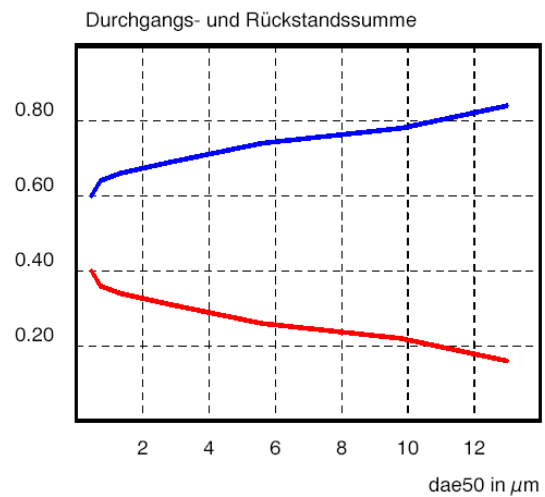
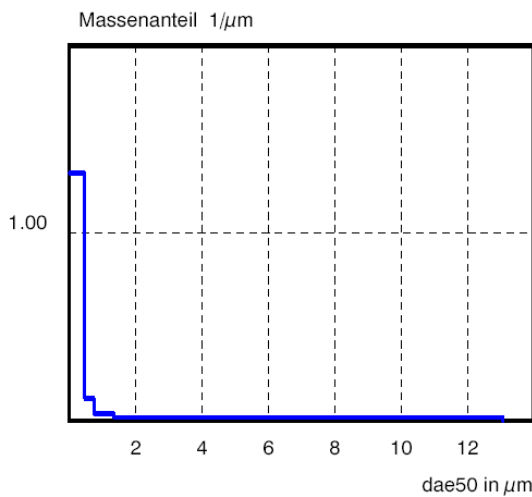
FRAKTIONIERENDE STAUBMESSUNG - Auswertung nach VDI 2066/Bl. 5

| 1. Allgemeine Daten | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|---------|------------|------------------|
| Meßort | : | Reingas | | | | | |
| Anlage | : | Sybillenabd | | | | | |
| Datum | : | 11.03.2004 | | | | | |
| Meßzeit | : | 08:55 - 09:25 | | | | | |
| 2. Probenahme | | | | | | | |
| Luftdruck | : | 952.0 | mBar | Feuchte | : | 0.053 | kg/m³ |
| stat. Druck | : | -18.0 | mBar | Dichte n. | : | 1.34 | kg/m³ |
| Temperatur | : | 147.0 | °C | Dichte ptf. | : | 0.78 | kg/m³ |
| Volumen. ptf | : | 3.05 | m³/h | mol. Masse | : | 29.2 | g/Mol |
| Volumen. n | : | 1.71 | m³/h | Viskosität | : | 2.20E-0005 | kg/m s |
| 3. Meßergebnisse | | | | | | | |
| Stufe | Intervall [µm] | dae50 [µm] | Masse [mg] | rel. M. | D-Summe | R-Summe | M-Ant. [1/µm] |
| 0 + 1 | > 12.0 | 12.0 | 0.0 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 9.1 - 12.0 | 9.1 | 0.1 | 0.04 | 0.96 | 0.04 | 0.01 |
| 3 | 5.2 - 9.1 | 5.2 | 0.0 | 0.00 | 0.96 | 0.04 | 0.00 |
| 4 | 2.7 - 5.2 | 2.7 | 0.0 | 0.00 | 0.96 | 0.04 | 0.00 |
| 5 | 1.2 - 2.7 | 1.2 | 0.2 | 0.07 | 0.89 | 0.11 | 0.05 |
| 6 | 0.6 - 1.2 | 0.6 | 0.2 | 0.07 | 0.81 | 0.19 | 0.13 |
| 7 | 0.4 - 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.15 | 0.67 | 0.33 | 0.66 |
| Endf. | 0.0 - 0.4 | 0.0 | 1.8 | 0.67 | 0.00 | 1.00 | 1.60 |
| Staubmasse : | | | | 2.7 mg/Probe | | | |
| Staubgehalt i.N. : | | | | 3.1 mg/m³ | | | |



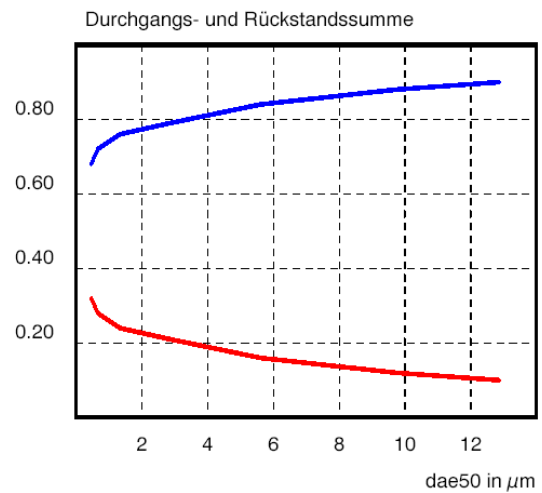
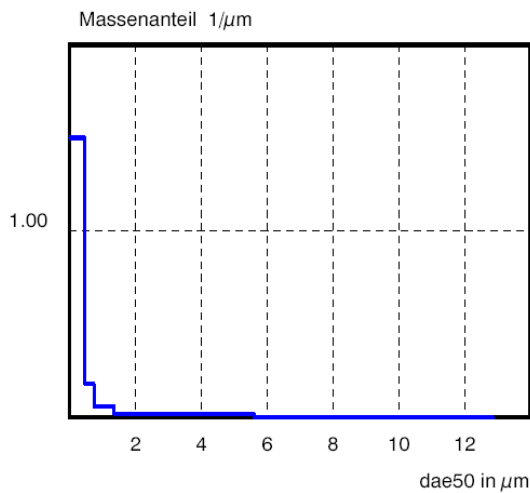
FRAKTIONIERENDE STAUBMESSUNG - Auswertung nach VDI 2066/Bl. 5

| 1. Allgemeine Daten | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|-------------------------|-------------|---------|------------|-------------------|
| Meßort | : | Rohgas | | | | | |
| Anlage | : | Sybillenbad | | | | | |
| Datum | : | 11.03.1904 | | | | | |
| Meßzeit | : | 12:56 - 13:07 | | | | | |
| 2. Probennahme | | | | | | | |
| Luftdruck | : | 952.0 | mBar | Feuchte | : | 0.053 | kg/m ³ |
| stat. Druck | : | -18.0 | mBar | Dichte n. | : | 1.34 | kg/m ³ |
| Temperatur | : | 147.0 | °C | Dichte ptf. | : | 0.78 | kg/m ³ |
| Volumen. ptf | : | 2.62 | m ³ /h | mol. Masse | : | 29.2 | g/Mol |
| Volumen. n | : | 1.47 | m ³ /h | Viskosität | : | 2.20E-0005 | kg/m s |
| 3. Meßergebnisse | | | | | | | |
| Stufe | Intervall [µm] | dae50 [µm] | Masse [mg] | rel. M. | D-Summe | R-Summe | M-Ant. [1/µm] |
| 0 + 1 | > 13.0 | 13.0 | 5.1 | 0.16 | 0.84 | 0.16 | 0.00 |
| 2 | 9.8 - 13.0 | 9.8 | 1.8 | 0.06 | 0.78 | 0.22 | 0.02 |
| 3 | 5.6 - 9.8 | 5.6 | 1.5 | 0.05 | 0.74 | 0.26 | 0.01 |
| 4 | 2.9 - 5.6 | 2.9 | 1.4 | 0.04 | 0.69 | 0.31 | 0.02 |
| 5 | 1.3 - 2.9 | 1.3 | 1.0 | 0.03 | 0.66 | 0.34 | 0.02 |
| 6 | 0.7 - 1.3 | 0.7 | 0.8 | 0.03 | 0.64 | 0.36 | 0.04 |
| 7 | 0.5 - 0.7 | 0.5 | 1.0 | 0.03 | 0.60 | 0.40 | 0.13 |
| Endf. | 0.0 - 0.5 | 0.0 | 19.2 | 0.60 | 0.00 | 1.00 | 1.32 |
| Staubmasse : | | | 31.8 mg/Probe | | | | |
| Staubgehalt i.N. : | | | 117.6 mg/m ³ | | | | |



FRAKTIONIERENDE STAUBMESSUNG - Auswertung nach VDI 2066/Bl. 5

| 1. Allgemeine Daten | | | | | | | |
|---------------------|-------------------|---------------|------------------------|-------------|---------|------------|-------------------|
| Meßort | : | Rohgas | | | | | |
| Anlage | : | Sybillenbad | | | | | |
| Datum | : | 11.03.1904 | | | | | |
| Meßzeit | : | 15:50 - 16:05 | | | | | |
| 2. Probenahme | | | | | | | |
| Luftdruck | : | 952.0 | mBar | Feuchte | : | 0.053 | kg/m ³ |
| stat. Druck | : | -18.0 | mBar | Dichte n. | : | 1.34 | kg/m ³ |
| Temperatur | : | 147.0 | °C | Dichte ptf. | : | 0.78 | kg/m ³ |
| Volumen. ptf | : | 2.65 | m ³ /h | mol. Masse | : | 29.2 | g/Mol |
| Volumen. n | : | 1.49 | m ³ /h | Viskosität | : | 2.20E-0005 | kg/m s |
| 3. Meßergebnisse | | | | | | | |
| Stufe | Intervall [µm] | dae50 [µm] | Masse [mg] | rel. M. | D-Summe | R-Summe | M-Ant. [1/µm] |
| 0 + 1 | > 12.9 | 12.9 | 3.2 | 0.10 | 0.90 | 0.10 | 0.00 |
| 2 | 9.7 - 12.9 | 9.7 | 0.7 | 0.02 | 0.88 | 0.12 | 0.01 |
| 3 | 5.6 - 9.7 | 5.6 | 1.2 | 0.04 | 0.84 | 0.16 | 0.01 |
| 4 | 2.9 - 5.6 | 2.9 | 1.7 | 0.05 | 0.79 | 0.21 | 0.02 |
| 5 | 1.3 - 2.9 | 1.3 | 0.9 | 0.03 | 0.76 | 0.24 | 0.02 |
| 6 | 0.7 - 1.3 | 0.7 | 1.3 | 0.04 | 0.72 | 0.28 | 0.06 |
| 7 | 0.5 - 0.7 | 0.5 | 1.4 | 0.04 | 0.68 | 0.32 | 0.18 |
| Endf. | 0.0 - 0.5 | 0.0 | 22.1 | 0.68 | 0.00 | 1.00 | 1.49 |
| Staubmasse : | | | 32.5 mg/Probe | | | | |
| Staubgehalt i.N. : | | | 87.1 mg/m ³ | | | | |



10.3 Messprotokolle der Niederdruckimpaktormessungen – Rohgasmessungen

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
| Anlage/Meßstelle: 1. Rohgasmessung Versuchsfilter | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 22.4 | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | 950 mbar | | | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur t_u | | 38 °C | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | 100 mm | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | 0,008 m ² | | | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeene t | | 150 °C | | | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | 34,2 % | | | | | | | | | | |
| Abgastempunkt | | 55 °C | | | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | 0,1260 kg/m ³ | | 15,52 | | Vol% | | | | | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeene p | | -200 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeene | | 13,8 m/s | | | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | 5 mm | | | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | 1,179 m ³ /h | | | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeene $p_{Ges} = p_{Bar}$ | | 94800 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand ρ_{oB} | | 0,752 kg/m ³ | | 0,746 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, ρ_{oNf} | | 1,245 kg/m ³ | | 1,235 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, ρ_{oNTr} | | 1,314 kg/m ³ | | | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | 1,199 | | | | | | | | | | |
| $K_p = p_{Ges}(Torr) * 100 \text{ kPa} / 750 \text{ Torr}$ | | 0,93 | | | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | 600 s | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | 0,197 m ³ | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | 0,112 m ³ | | | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter μm | Mittl. Fraktion μm | Düsen ϕ mm | Number of Nozzles | Leer | bestaubt | Δm mg | dQ_3 | Rückstand % | Q_3 % | $q_{3,lg}$ | |
| | | | | | mg | mg | | | | | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 90,2 | 91,2 | 1 | 0,060241 | 93,98% | 6,02% | 0,211578 | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,1 | 90,3 | 0,2 | 0,012048 | 92,77% | 7,23% | 0,042307 | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 90,4 | 90,8 | 0,4 | 0,024096 | 90,36% | 9,64% | 0,086001 | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,8 | 91,3 | 0,5 | 0,03012 | 87,35% | 12,65% | 0,110969 | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,9 | 91,7 | 0,8 | 0,048193 | 82,53% | 17,47% | 0,16249 | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 90,7 | 94,8 | 4,1 | 0,246988 | 57,83% | 42,17% | 0,853072 | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 90,7 | 97,2 | 6,5 | 0,391566 | 18,67% | 81,33% | 1,421786 | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,8 | 93,3 | 2,5 | 0,150602 | 3,61% | 96,39% | 0,520166 | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 90,9 | 91,4 | 0,5 | 0,03012 | 0,60% | 99,40% | 0,108113 | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,2 | 90,3 | 0,1 | 0,006024 | 0,00% | 100,00% | 0,020807 | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,9 | 90,9 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |

Summe der gesammelten Staubmasse: **16,60** mg

Konzentration im Betriebszustand: **84,48** mg/m³

Konzentration im Normzustand, trocken: **147,57** mg/m³

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|--|
| Anlage/Meßstelle: 2. Rohgasmessung Versuchsfilter | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 23.4 | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | 955 mbar | | | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur t_u | | 38 °C | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | 100 mm | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | 0,008 m ² | | | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeine t | | 158 °C | | | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | 34,2 % | | | | | | | | | | |
| Abgastempunkt | | 55 °C | | | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | 0,1260 kg/m ³ | | 15,52 | | Vol% | | | | | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeine p | | -200 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeine | | 13,8 m/s | | | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | 5 mm | | | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | 1,171 m ³ /h | | | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeine $p_{Ges} = p_{Bar}$ | | 95300 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand ρ_{oB} | | 0,742 kg/m ³ | | 0,736 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, ρ_{oNf} | | 1,245 kg/m ³ | | 1,235 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, ρ_{oNTr} | | 1,314 kg/m ³ | | | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | 1,199 | | | | | | | | | | |
| $K_p = p_{Ges}(Torr) * 100 \text{ kPa} / 750 \text{ Torr}$ | | 0,93 | | | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | 1200 s | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | 0,390 m ³ | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | 0,220 m ³ | | | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter μm | Mittl. Fraktion μm | Düsen ϕ mm | Number of Nozzles | Leer | bestaubt | Δm mg | dQ_3 | Rückstand % | Q_3 % | $q_{3,lg}$ | |
| | | | | | mg | mg | | | | | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 90,2 | 90,9 | 0,7 | 0,030303 | 96,97% | 3,03% | 0,10643 | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,3 | 90,7 | 0,4 | 0,017316 | 95,24% | 4,76% | 0,060805 | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 90,5 | 90,9 | 0,4 | 0,017316 | 93,51% | 6,49% | 0,061801 | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,3 | 91,6 | 1,3 | 0,056277 | 87,88% | 12,12% | 0,207334 | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,7 | 91,8 | 1,1 | 0,047619 | 83,12% | 16,88% | 0,160555 | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 90,9 | 98,1 | 7,2 | 0,311688 | 51,95% | 48,05% | 1,07654 | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 91,1 | 98,8 | 7,7 | 0,333333 | 18,61% | 81,39% | 1,210341 | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,8 | 94,3 | 3,5 | 0,151515 | 3,46% | 96,54% | 0,523318 | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 90,7 | 91,5 | 0,8 | 0,034632 | 0,00% | 100,00% | 0,124306 | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,5 | 90,5 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,2 | 90,2 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |

Summe der gesammelten Staubmasse: **23,10** mgKonzentration im Betriebszustand: **59,18** mg/m³Konzentration im Normzustand, trocken: **104,78** mg/m³

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------|-------------|-------------------|----------|-----------------|----------------|---------------------|-------------------|--|
| Anlage/Meßstelle: 3. Rohgasmessung VersuchsfILTER mit Anfahrverhalten | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 23.4 | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | 955 mbar | | | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur tu | | 35 °C | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | 100 mm | | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | 0,008 m ² | | | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeine t | | 163 °C | | | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | 34,2 % | | | | | | | | | | |
| Abgastempunkt | | 56 °C | | | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | 0,1322 kg/m ³ | | 16,28 | | Vol% | | | | | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeine p | | -200 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeine | | 13,2 m/s | | | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | 5 mm | | | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | 1,163 m ³ /h | | | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeine pGes = pBar | | 95300 Pa | | | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand rhoB | | 0,732 kg/m ³ | | 0,725 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, rhoNf | | 1,242 kg/m ³ | | 1,231 | | kg/m ³ | | | | | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, rhoNTr | | 1,314 kg/m ³ | | | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | 1,199 | | | | | | | | | | |
| Kp = pGes(Torr) * 100 kPa / 750 Torr | | 0,93 | | | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | 420 s | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | 0,136 m ³ | | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | 0,076 m ³ | | | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter µm | Mittl. Fraktion µm | Düsen φ mm | Number of Nozzles | Leer | bestaubt | Δm mg | dQ ₃ | Rückstand % | Q ₃ % | q _{3,lg} | |
| | | | | | mg | mg | | | | | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 90 | 92,6 | 2,6 | 0,104839 | 89,52% | 10,48% | 0,368214 | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,3 | 92,1 | 1,8 | 0,072581 | 82,26% | 17,74% | 0,254864 | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 90,6 | 91,7 | 1,1 | 0,044355 | 77,82% | 22,18% | 0,158304 | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,3 | 91,8 | 1,5 | 0,060484 | 71,77% | 28,23% | 0,222832 | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,5 | 94,5 | 4 | 0,16129 | 55,65% | 44,35% | 0,543817 | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 90,5 | 96,7 | 6,2 | 0,25 | 30,65% | 69,35% | 0,863475 | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 90,7 | 95,8 | 5,1 | 0,205645 | 10,08% | 89,92% | 0,746702 | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,1 | 91,8 | 1,7 | 0,068548 | 3,23% | 96,77% | 0,236759 | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 89,9 | 90,5 | 0,6 | 0,024194 | 0,81% | 99,19% | 0,086839 | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,3 | 90,3 | 0 | 0 | 0,81% | 99,19% | 0 | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,5 | 90,7 | 0,2 | 0,008065 | 0,00% | 100,00% | 0,027854 | |

Summe der gesammelten Staubmasse: **24,80** mg

Konzentration im Betriebszustand: **182,78** mg/m³

Konzentration im Normzustand, trocken: **328,14** mg/m³

10.4 Messprotokolle der Niederdruckimpaktormessungen – Reingasmessungen

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------|----------|-----|-------------------|-----------|----------------|-------------------|--|
| Anlage/Meßstelle: 1. Reingasmessung VersuchsfILTER | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 27.4 | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | | | 950 mbar | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur tu | | | | 38 °C | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | | | 100 mm | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | | | 0,008 m ² | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeine t | | | | 135 °C | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | | | 34,2 % | | | | | | | | |
| Abgastaupunkt | | | | 55 °C | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | | | 0,1260 kg/m ³ | | 15,52 | | Vol% | | | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeine p | | | | -200 Pa | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeine | | | | 13,8 m/s | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | | | 5 mm | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | | | 1,200 m ³ /h | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeine pGes = pBaro | | | | 94800 Pa | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand rhoB | | | | 0,780 kg/m ³ | | 0,773 | | kg/m ³ | | | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, rhoNf | | | | 1,245 kg/m ³ | | 1,235 | | kg/m ³ | | | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, rhoNTr | | | | 1,314 kg/m ³ | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | | | 1,199 | | | | | | | | |
| Kp = pGes(Torr) * 100 kPa / 750 Torr | | | | 0,93 | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | | | 3600 s | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | | | 1,200 m ³ | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | | | 0,712 m ³ | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter µm | Mittl. Fraktion µm | Düsen φ mm | Number of Nozzles | Leer | bestaubt | Δm | dQ ₃ | Rückstand | Q ₃ | q _{3,lg} | |
| | | | | | mg | mg | mg | | % | % | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 90,6 | 90,9 | 0,3 | 0,12 | 88,00% | 12,00% | 0,421463 | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,7 | 90,9 | 0,2 | 0,08 | 80,00% | 20,00% | 0,280917 | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 91,1 | 91,3 | 0,2 | 0,08 | 72,00% | 28,00% | 0,285522 | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,9 | 91,1 | 0,2 | 0,08 | 64,00% | 36,00% | 0,294733 | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,6 | 90,8 | 0,2 | 0,08 | 56,00% | 44,00% | 0,269733 | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 90,3 | 90,8 | 0,5 | 0,2 | 36,00% | 64,00% | 0,69078 | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 90,3 | 91 | 0,7 | 0,28 | 8,00% | 92,00% | 1,016686 | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,6 | 90,8 | 0,2 | 0,08 | 0,00% | 100,00% | 0,276312 | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 90,3 | 90,3 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,4 | 90,4 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,2 | 90,2 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |

Summe der gesammelten Staubmasse: 2,50 mg

Konzentration im Betriebszustand: 2,08 mg/m³

Konzentration im Normzustand, trocken: 3,51 mg/m³

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|------|----------------|----------|-----------------|----------------|---------------------|-------------------|--|
| Anlage/Meßstelle: 2. Reingasmessung VersuchsfILTER | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 27.4 | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | | | 954 mbar | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur tu | | | | 38 °C | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | | | 100 mm | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | | | 0,008 m² | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeene t | | | | 140 °C | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | | | 34,2 % | | | | | | | | |
| Abgastaupunkt | | | | 52 °C | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | | | 0,1089 kg/m³ | | 13,42 | | | | Vol% | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeene p | | | | -1800 Pa | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeene | | | | 13,5 m/s | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | | | 5 mm | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | | | 1,189 m³/h | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeene pGes = pBaro | | | | 93600 Pa | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand rhoB | | | | 0,766 kg/m³ | | 0,761 | | | | kg/m³ | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, rhoNf | | | | 1,253 kg/m³ | | 1,245 | | | | kg/m³ | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, rhoNTr | | | | 1,314 kg/m³ | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | | | 1,199 | | | | | | | | |
| Kp = pGes(Torr) * 100 kPa / 750 Torr | | | | 0,92 | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | | | 3600 s | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | | | 1,189 m³ | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | | | 0,693 m³ | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter µm | Mittl. Fraktion µm | Düsen φ mm | Number of Nozzles | Leer | | Δm mg | dQ ₃ | Rückstand % | Q ₃ % | q _{3,lg} | |
| | | | | | mg | bestaubt mg | | | | | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 89,7 | 90,3 | 0,6 | 0,315789 | 68,42% | 31,58% | 1,109114 | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,3 | 90,3 | 0 | 0 | 68,42% | 31,58% | 0 | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 90,4 | 90,4 | 0 | 0 | 68,42% | 31,58% | 0 | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,7 | 90,9 | 0,2 | 0,105263 | 57,89% | 42,11% | 0,387806 | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,6 | 90,7 | 0,1 | 0,052632 | 52,63% | 47,37% | 0,177456 | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 90 | 90,3 | 0,3 | 0,157895 | 36,84% | 63,16% | 0,545353 | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 89,7 | 90 | 0,3 | 0,157895 | 21,05% | 78,95% | 0,573319 | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,2 | 90,6 | 0,4 | 0,210526 | 0,00% | 100,00% | 0,727137 | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 90,5 | 90,5 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,7 | 90,7 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,8 | 90,8 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | |

Summe der gesammelten Staubmasse: 1,90 mg

Konzentration im Betriebszustand: 1,60 mg/m³

Konzentration im Normzustand, trocken: 2,74 mg/m³

Kaskadenimpaktormessung - AERAS-Niederdruck

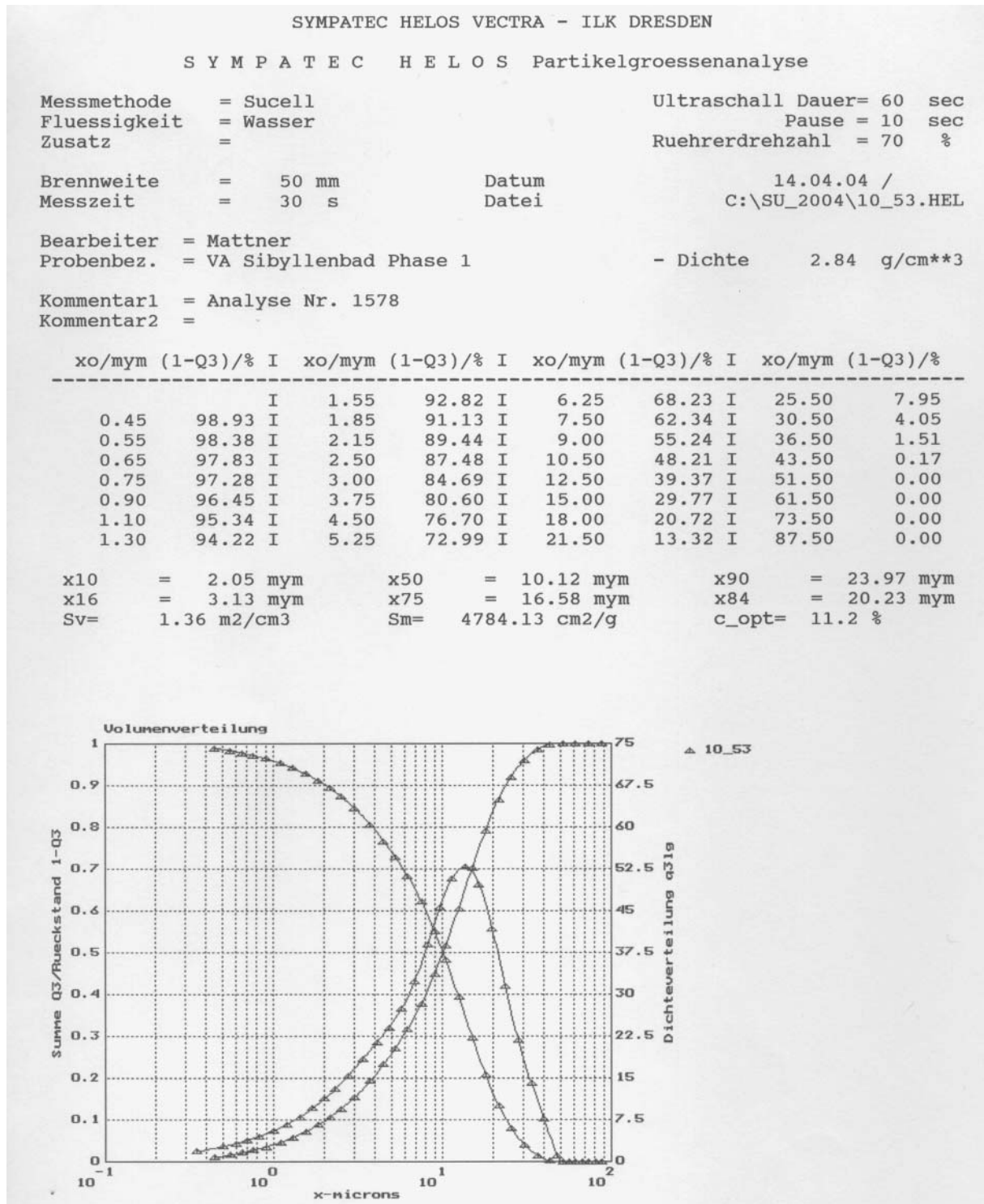
| Betrieb: Sibyllenbad | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|------------------|-------------------------|------------|----------------|----------|-----------------|----------------|---------------------|-------------------|--|--|
| Anlage/Meßstelle: 3. Reingasmessung VersuchsfILTER | | | | | | | | | | | | | |
| Datum: 28.4 | | | | | | | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | | | | | | | | | | | | |
| Barometerstand | | | | 952 mbar | | | | | | | | | |
| Umgebungstemperatur tu | | | | 38 °C | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalabmessung; D bzw. a x b | | | | 100 mm | | | | | | | | | |
| Rohr- bzw. Kanalquerschnitt A | | | | 0,008 m² | | | | | | | | | |
| mittl. Gastemperatur in der Meßebeene t | | | | 142 °C | | | | | | | | | |
| mittl. rel. Abgasfeuchte | | | | 34,2 % | | | | | | | | | |
| Abgastaupunkt | | | | 55 °C | | | | | | | | | |
| Wassergehalt Abgas | | | | 0,1260 kg/m³ | | 15,52 | | | | Vol% | | | |
| Über- bzw. Unterdruck in der Meßebeene p | | | | -1800 Pa | | | | | | | | | |
| Gasgeschwindigkeit in der Meßebeene | | | | 13,5 m/s | | | | | | | | | |
| Düsendurchmesser (isokinetik) | | | | 5 mm | | | | | | | | | |
| Absaugvolumenstrom (Betrieb) | | | | 1,181 m³/h | | | | | | | | | |
| Gesamtdruck in der Meßebeene pGes = pBaro | | | | 93400 Pa | | | | | | | | | |
| Gasdichte im Betriebszustand rhoB | | | | 0,755 kg/m³ | | 0,749 | | | | kg/m³ | | | |
| Gasdichte im Normzustand feucht, rhoNf | | | | 1,245 kg/m³ | | 1,235 | | | | kg/m³ | | | |
| Gasdichte im Normzustand trocken, rhoNTr | | | | 1,314 kg/m³ | | | | | | | | | |
| Gasdichte bei 20°C, 1013 hPa, tr | | | | 1,199 | | | | | | | | | |
| Kp = pGes(Torr) * 100 kPa / 750 Torr | | | | 0,92 | | | | | | | | | |
| Absaugzeit | | | | 4080 s | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Betrieb) | | | | 1,338 m³ | | | | | | | | | |
| Abgesaugte Luftmenge (Norm,trocken) | | | | 0,769 m³ | | | | | | | | | |
| Stufe Nr. | Cut Diameter µm | Mittl. Fraktion µm | Düsen φ mm | Number of Nozzles | Leer mg | bestaubt mg | Δm mg | dQ ₃ | Rückstand % | Q ₃ % | q _{3,lg} | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 16 | | 14,6 | 1 | | | | | | | | | |
| 10 | 8,1 | 12,05 | 5,1 | 6 | 91,1 | 91,1 | 0 | 0 | 100,00% | 0,00% | 0 | | |
| 9 | 4,1 | 6,1 | 2,2 | 20 | 90,9 | 90,9 | 0 | 0 | 100,00% | 0,00% | 0 | | |
| 8 | 2,1 | 3,1 | 1,2 | 33 | 90,9 | 91 | 0,1 | 0,052632 | 94,74% | 5,26% | 0,187844 | | |
| 7 | 1,1 | 1,6 | 0,7 | 46 | 90,5 | 90,6 | 0,1 | 0,052632 | 89,47% | 10,53% | 0,193903 | | |
| 6 | 0,54 | 0,82 | 0,67 | 16 | 90,4 | 90,8 | 0,4 | 0,210526 | 68,42% | 31,58% | 0,709824 | | |
| 5 | 0,27 | 0,405 | 0,52 | 16 | 91 | 91,5 | 0,5 | 0,263158 | 42,11% | 57,89% | 0,908921 | | |
| 4 | 0,14 | 0,205 | 0,42 | 25 | 90,7 | 90,9 | 0,2 | 0,105263 | 31,58% | 68,42% | 0,382213 | | |
| 3 | 0,07 | 0,105 | 0,34 | 65 | 90,6 | 90,8 | 0,2 | 0,105263 | 21,05% | 78,95% | 0,363568 | | |
| 2 | 0,036 | 0,053 | 0,31 | 127 | 90,2 | 90,6 | 0,4 | 0,210526 | 0,00% | 100,00% | 0,755652 | | |
| 1 | 0,018 | 0,027 | 0,29 | 262 | 90,3 | 90,3 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | | |
| -1 | 0,009 | 0,014 | 0,3 | 462 | 90,8 | 90,8 | 0 | 0 | 0,00% | 100,00% | 0 | | |

Summe der gesammelten Staubmasse: 1,90 mg

Konzentration im Betriebszustand: 1,42 mg/m³

Konzentration im Normzustand, trocken: 2,47 mg/m³

10.5 Protokolle der Partikelgrößenanalysen der Filterstäube (Bunker)



SYMPATEC HELOS VECTRA - ILK DRESDEN

SYMPATEC HELOS Partikelgroessenanalyse

Messmethode = Sucell Ultraschall Dauer= 60 sec
 Fluessigkeit = Wasser Pause = 10 sec
 Zusatz = Ruehrerdrehzahl = 70 %

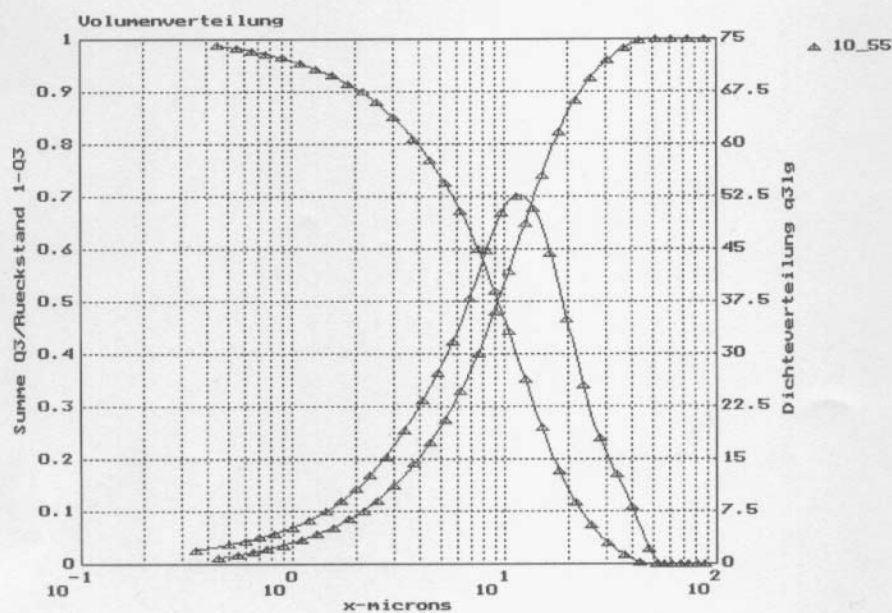
Brennweite = 50 mm Datum 14.04.04 /
 Messzeit = 30 s Datei C:\SU_2004\10_55.HEL

Bearbeiter = Mattner Revalid.Menue/Form./Funkt. /VAL
 Probenbez. = VA Sibyllenbad Phase 2 - Dichte 2.62 g/cm**3

Kommentar1 = Analyse Nr. 1579
 Kommentar2 =

| xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% | |
|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-----------------|------|
| | I | 1.55 | 93.04 I | 6.25 | 67.00 I | 25.50 | 7.32 |
| 0.45 | 98.86 I | 1.85 | 91.47 I | 7.50 | 60.11 I | 30.50 | 4.10 |
| 0.55 | 98.31 I | 2.15 | 89.87 I | 9.00 | 51.98 I | 36.50 | 1.80 |
| 0.65 | 97.76 I | 2.50 | 87.96 I | 10.50 | 44.28 I | 43.50 | 0.37 |
| 0.75 | 97.23 I | 3.00 | 85.19 I | 12.50 | 35.14 I | 51.50 | 0.00 |
| 0.90 | 96.43 I | 3.75 | 80.95 I | 15.00 | 25.90 I | 61.50 | 0.00 |
| 1.10 | 95.38 I | 4.50 | 76.72 I | 18.00 | 17.84 I | 73.50 | 0.00 |
| 1.30 | 94.34 I | 5.25 | 72.54 I | 21.50 | 11.66 I | 87.50 | 0.00 |

x10 = 2.12 mym x50 = 9.39 mym x90 = 23.03 mym
 x16 = 3.21 mym x75 = 15.34 mym x84 = 19.04 mym
 Sv= 1.38 m2/cm3 Sm= 5252.91 cm2/g c_opt= 21.4 %



SYMPATEC HELOS VECTRA - ILK DRESDEN

SYMPATEC HELOS Partikelgroessenanalyse

```

Messmethode      = Sucell                      Ultraschall Dauer= 60 sec
Fluessigkeit    = Wasser                      Pause = 10 sec
Zusatz          =                            Ruehrerdrehzahl = 70 %

Brennweite      = 50 mm                       Datum          14.04.04 /
Messzeit        = 30 s                       Datei          C:\SU_2004\10_58.HEL

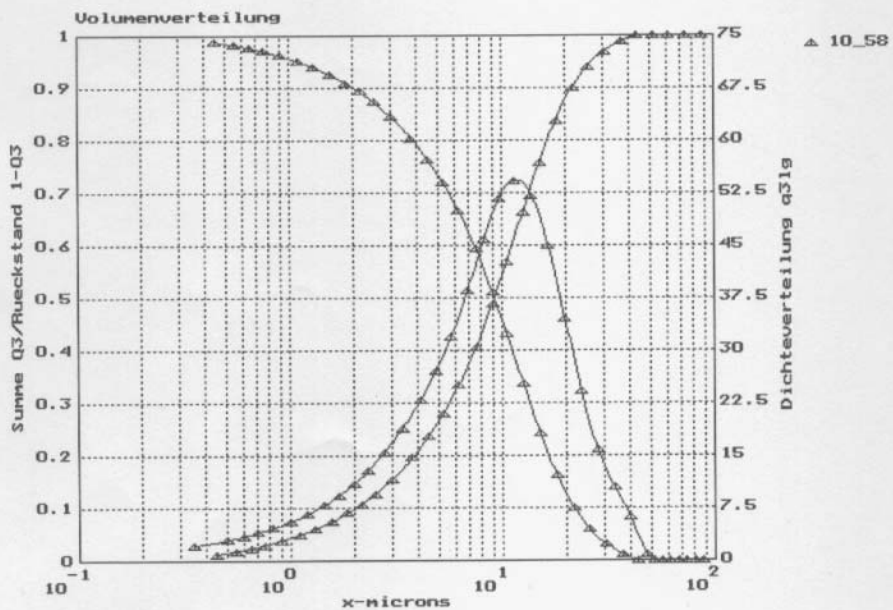
Bearbeiter      = Mattner
Probenbez.     = VA Sibyllenbad Phase 3       - Dichte       2.68 g/cm**3

Kommentar1     = Analyse Nr. 1580
Kommentar2     =
    
```

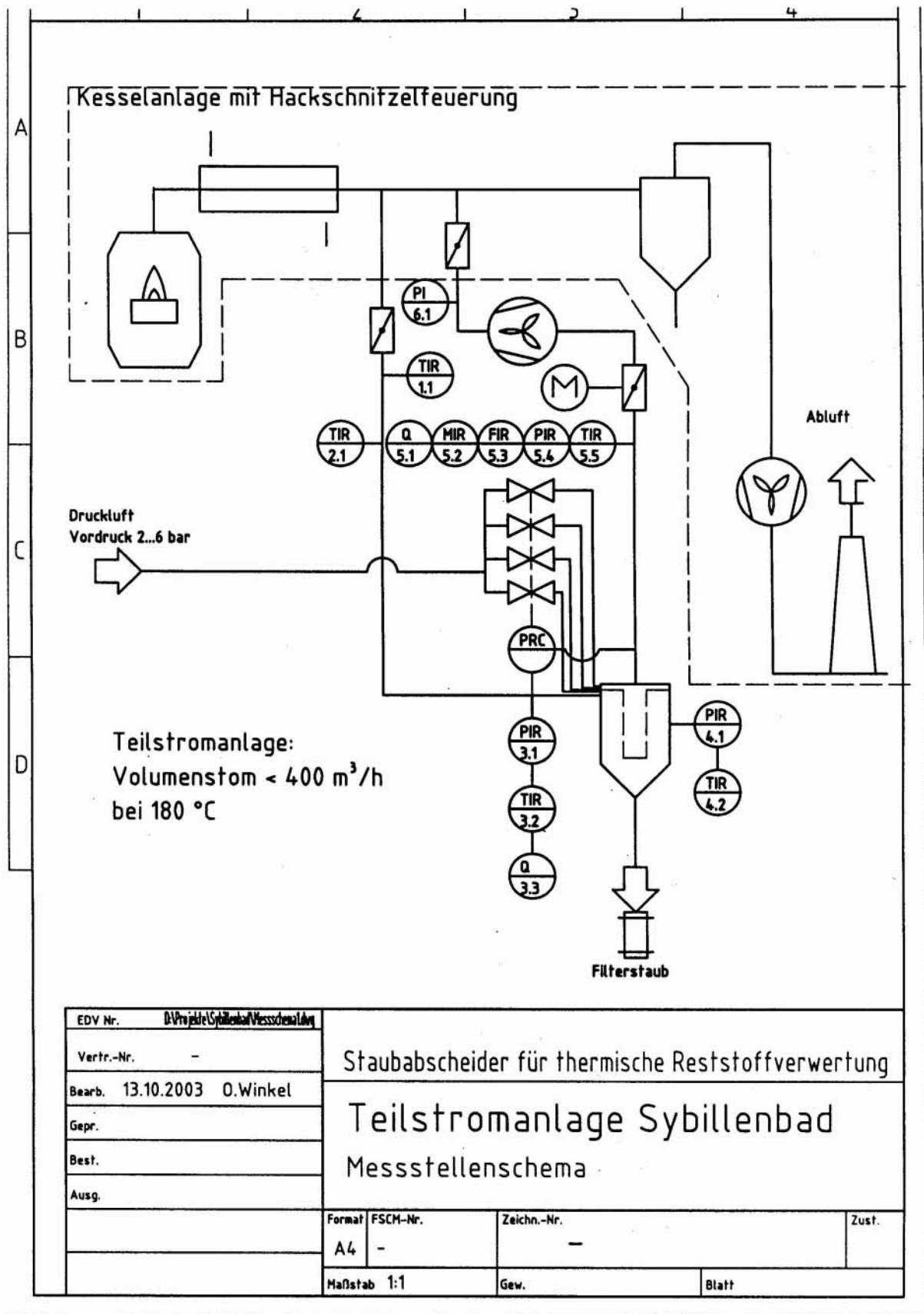
| xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% I | | xo/mym (1-Q3)/% | |
|-------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|-----------------|------|
| | I | 1.55 | 92.61 I | 6.25 | 66.55 I | 25.50 | 5.91 |
| 0.45 | 98.80 I | 1.85 | 90.97 I | 7.50 | 59.54 I | 30.50 | 3.07 |
| 0.55 | 98.21 I | 2.15 | 89.32 I | 9.00 | 51.19 I | 36.50 | 1.20 |
| 0.65 | 97.63 I | 2.50 | 87.38 I | 10.50 | 43.24 I | 43.50 | 0.13 |
| 0.75 | 97.06 I | 3.00 | 84.60 I | 12.50 | 33.81 I | 51.50 | 0.00 |
| 0.90 | 96.21 I | 3.75 | 80.40 I | 15.00 | 24.32 I | 61.50 | 0.00 |
| 1.10 | 95.09 I | 4.50 | 76.24 I | 18.00 | 16.15 I | 73.50 | 0.00 |
| 1.30 | 93.99 I | 5.25 | 72.09 I | 21.50 | 10.02 I | 87.50 | 0.00 |

```

x10  = 2.03 mym      x50  = 9.22 mym      x90  = 21.52 mym
x16  = 3.11 mym      x75  = 14.82 mym     x84  = 18.08 mym
Sv=   1.42 m2/cm3    Sm=  5296.33 cm2/g  c_opt= 20.6 %
    
```



10.6 Messstellenschema der Versuchsanlage



10.7 Messprotokolle zur Bestimmung des Druckluftverbrauches

| Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden | | | | | Seite: 1 von 1 | | |
|--|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| Messung des Druckluftverbrauches pro Impuls | | | | | | | |
| ohne Injektorsedimentation | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | Temp. [K]: | 306 | $d_{Düse}$ [mm]: | 8,0 | | | |
| Datum: 23.02.2004 | rel. Feuchte [%]: | 30 | Düsenanzahl: | 1 | | | |
| | ρ_{LUFT} [mbar]: | 1010 | V_{Kessel} [m ³]: | 0,0490 | | | |
| Ventil-Nr. | t_i [ms] | p_{R1} [kp/cm ²] | p_{R2} [kp/cm ²] | $m_{D,i}$ [g] | $\overline{m}_{D,i}$ [g] | $m_{D,i,korr.}$ [g] | $V_{D,i,N}$ [l] |
| 1 | 220 | 2,05 | 1,80 | 9,89 | | | |
| 2 | 220 | 2,05 | 1,80 | 9,89 | | | |
| 3 | 220 | 2,05 | 1,80 | 9,89 | | | |
| 4 | 220 | 2,05 | 1,80 | 9,89 | 9,89 | | 8,45 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 3,00 | 2,60 | 15,86 | | | |
| 2 | 220 | 3,00 | 2,70 | 11,85 | | | |
| 3 | 220 | 3,00 | 2,55 | 17,88 | | | |
| 4 | 220 | 3,00 | 2,55 | 17,88 | 15,87 | | 13,56 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 4,00 | 3,50 | 19,83 | | | |
| 2 | 220 | 4,00 | 3,50 | 19,83 | | | |
| 3 | 220 | 4,00 | 3,50 | 19,83 | | | |
| 4 | 220 | 4,00 | 3,50 | 19,83 | 19,83 | | 16,95 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 5,00 | 4,40 | 23,80 | | | |
| 2 | 220 | 5,00 | 4,50 | 19,78 | | | |
| 3 | 220 | 5,00 | 4,40 | 23,80 | | | |
| 4 | 220 | 5,00 | 4,40 | 23,80 | 22,79 | | 19,48 |

| Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden | | | | | Seite: 1 von 1 | | |
|--|---------------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|
| Messung des Druckluftverbrauches pro Impuls | | | | | | | |
| Bearbeiter: Heidenreich | | Temp. [K]: 306 | | d _{Düse} [mm]: 8,0 | | | |
| Datum: 23.02.2004 | | rel. Feuchte [%]: 30 | | Düsenanzahl: 1 | | | |
| | | p _{LUFT} [mbar]: 1010 | | V _{Kessel} [m³]: 0,0490 | | | |
| Ventil-Nr. | t _i [ms] | p _{R1} [kp/cm²] | p _{R2} [kp/cm²] | m _{D,i} [g] | m̄ _{D,i} [g] | m _{D,i,korr.} [g] | V _{D,i,N} [l] |
| 1 | 220 | 2,05 | 1,60 | 17,98 | | | |
| 2 | 220 | 2,05 | 1,65 | 15,94 | | | |
| 3 | 220 | 2,05 | 1,60 | 17,98 | | | |
| 4 | 220 | 2,05 | 1,60 | 17,98 | 17,47 | | 14,93 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 3,00 | 2,40 | 23,98 | | | |
| 2 | 220 | 3,00 | 2,45 | 21,94 | | | |
| 3 | 220 | 3,00 | 2,50 | 19,91 | | | |
| 4 | 220 | 3,00 | 2,50 | 19,91 | 21,43 | | 18,32 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 4,00 | 3,20 | 32,03 | | | |
| 2 | 220 | 4,00 | 3,20 | 32,03 | | | |
| 3 | 220 | 4,00 | 3,20 | 32,03 | | | |
| 4 | 220 | 4,00 | 3,20 | 32,03 | 32,03 | | 27,37 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 1 | 220 | 5,00 | 4,00 | 40,08 | | | |
| 2 | 220 | 5,00 | 4,00 | 40,08 | | | |
| 3 | 220 | 5,00 | 4,00 | 40,08 | | | |
| 4 | 220 | 5,00 | 4,00 | 40,08 | 40,08 | | 34,26 |

Prüfbericht zu Auftrag 040083

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
H1/3 Hr. Schmoeckel
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg
Tel. 5204

Auftragsdatum: 05.05.2004

Matrix:

Zielsetzung: Bestimmung von Chlor und Schwermetallen in
Brennstoff- und Staubproben

Anlage:

Verantwortliches Labor

Freigegeben von

(Referatsleitung)

Prüfbericht vom: 13.05.04

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

Tel. 0821 / 9071-5300
Fax. 0821 / 9071-5559
e-mail reifenhaeuser.werner@lfu.bayern.de

Auftragsnummer: 40083
 Auftraggeber: H1/3 Hr. Schmoeckel

Bayerisches Landesamt
 für Umweltschutz
 Zentrallabor - Referat Z5



Prüfbericht

Probeninformation

| Probenr. | Ext.-Probenr. | Probenahme | Eingang | Herkunft | Probenahmeort | Probenbezeichnung | Probenbemerkung |
|----------|---------------|------------|------------|----------|---------------|--|-----------------|
| 1 | BP 01 | | 05.05.2004 | Bayern | | Rohbrennstoff mit hohem Grünanteil | |
| 2 | BP 02 | | 05.05.2004 | Bayern | | Rohbrennstoff Holzschnitzel | |
| 3 | SP 01 | | 05.05.2004 | Bayern | | Staubprobe LfU Nr. 6 Filterstaub mit hohem Grünant | |
| 4 | SP 02 | | 05.05.2004 | Bayern | | Mischprobe 1-3 Filterstaub Normalbrennstoff | |

Auftragsnummer: 40083
 Auftraggeber: H1/3 Hr. Schmoeckel

Bayerisches Landesamt
 für Umweltschutz
 Zentrallabor - Referat Z5



Prüfbericht

Ergebnisse der anorganischen Parameter

| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | BP 01 | BP 02 | SP 01 | SP 02 |
| Cd | mg/kg | <2 | <2 | 139 | 140 |
| Chlor | mg/kg | 183 | <100 | | |
| Cl | mg/kg | | | 109000 | 107000 |
| Cr | mg/kg | 12.1 | <7 | 203 | 218 |
| Cu | mg/kg | 6.80 | 2.90 | 397 | 384 |
| Hg | mg/kg | 0.015 | 0.004 | 0.109 | 0.107 |
| Ni | mg/kg | 3.90 | <3 | 44.4 | 54.2 |
| Pb | mg/kg | 4.10 | <3 | 3800 | 3810 |
| S | mg/kg | <700 | <700 | 135000 | 134000 |
| Tl | mg/kg | <5 | <5 | 7.50 | 9.20 |
| Zn | mg/kg | 56.3 | 14.0 | 21000 | 21000 |

Auftragsnummer: 40083
 Auftraggeber: H1/3 Hr. Schmoeckel

Bayerisches Landesamt
 für Umweltschutz
 Zentrallabor - Referat Z5 

Prüfbericht

Ergebnisse der sonstigen Parameter

| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---|-------|-------|-------|-------|
| | | BP 01 | BP 02 | SP 01 | SP 02 |
| TS | % | 72.8 | 69.7 | 97.7 | 98.1 |

Die Proben wurden zunächst getrocknet und analysenfein gemahlen.
 In den Proben 1 und 2 wurde Chlor nach Verbrennungsaufschluß und Absorption in alkalischer Lösung ionenchromatographisch bestimmt.
 Die Bestimmung von Quecksilber wurde mit einem AMA-System („Automated Mercury Analyzer“) direkt aus dem Feststoff durchgeführt. Für die übrigen Elemente erfolgte eine semiquantitative Bestimmung aus dem Feststoff mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA).