



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Untersuchung von Abscheidern zur Emissionsminderung für Kleinf Feuerungsanlagen

unter der Leitung von

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerd Mauschitz
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Laminger

eingereicht an der Technischen Universität Wien

am Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften

von

Isabella Hornik

1026386 (066 490)

Kefergasse 20/2/8

1140 Wien

Wien, im Dezember 2017

Isabella Hornik

Danksagung

In erster Linie möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die große Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken. Weiteres möchte ich meinen Betreuern Ass. Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Gerd Mausnitz und Univ. Ass. Dipl.- Ing. Dr. techn. Thomas Laminger für die tolle Betreuung und Hilfe in allen Belangen während der Diplomarbeit danken.

Einen weiteren Dank möchte ich an die Kollegen der gesamten Arbeitsgruppe der Mechanischen Verfahrenstechnik der Technischen Universität Wien richten. Es war eine stets eine angenehme Arbeitsatmosphäre, mit fachlicher aber auch moralischer Unterstützung.

Kurzfassung

Im Jahre 2015 wurden die Grenzwerte für Emissionen von Kleinfeuerungsanlagen in Österreich gesenkt. In Zukunft werden diese Grenzwerte vermutlich immer weiter verschärft werden. Generell haben Emissionen von Partikeln einen großen Einfluss auf Mensch und Umwelt, da sie einerseits zu Eutrophierung und Acidifizierung von Gewässern und Böden führen, und andererseits die Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen nicht zu leugnen sind. Die Feinstaubbelastung kann zu schwerwiegenden Atemwegserkrankungen und Lungenschäden führen. Um den Schadstoffausstoß von Kleinfeuerungsanlagen zu reduzieren, sind geeignete Maßnahmen erforderlich. Eine dieser Maßnahmen ist die Installation von nachgeschalteten Entstaubungsanlagen um die partikuläre Fracht zu reduzieren. In den letzten Jahren wurden speziell für Kleinfeuerungsanlagen filternde Abscheider und elektrische Abscheider entwickelt und eingesetzt. Eine Vergleichbarkeit verschiedener Abscheider hinsichtlich Druckverlust, Abscheidegrad und Standzeit soll durch eine entsprechende Prüfung unter einheitlichen Bedingungen ermöglicht werden.

Ein entsprechender Normentwurf (DIN SPEC 33999) diente für diese Arbeit als Vorlage um verschiedene Abscheider zu untersuchen. Einerseits wurden filternde Abscheider und andererseits elektrische Abscheider getestet. Als Filtermaterial diente Dämmwolle und ein Glasfaservlies. Bei den elektrischen Abscheidern wurde eine Sägezahnelektrode und eine Wolframdrahtelektrode verwendet.

Ein Filtermittelprüfstand (VDI 3926 TYP 2) wurde modifiziert um die verschiedenen Abscheider unter definierten Bedingungen testen zu können. Dabei wurden verschiedene Filtermittelkenngrößen wie Fraktionsabscheidegrad, Druckverlust und Quality Faktor bestimmt. Als Testaerosole dienten ein künstlich erzeugter Ruß sowie ein Gemisch aus Ruß und Holzasche, jeweils in Luft dispergiert.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass elektrische Abscheider einen geringeren Abscheidegrad als filternde Abscheider haben, jedoch einen sehr geringen Druckverlust aufweisen. Für eine Nachrüstung von bestehenden Kleinfeuerungsanlagen sind daher Elektroabscheider eher geeignet, da hier unter anderem kein zusätzliches Gebläse im Kamin notwendig ist.

Abstract

In the year 2015 the standards of emissions for small-scale furnaces in Austria were lowered and in future the limit values will probably be further tightened. Generally, the emissions of particles have a strong impact on human beings and environment, because they further the eutrophication and acidification of soil and water and on the other hand they have effects on the health of humans and animals. The fine particulate air pollution stimulates the rise of respiratory diseases and pulmonary damages. The small-scale furnaces also further the emission of hazardous substances.

To reduce the exhaust emissions different measures are needed. One of them is the installation of downstream dedusting plants. Especially in the last years, different filtersystems for small scale furnaces were developed. To compare the pressure loss, deposition rate and service life in different systems, a testing device was rebuilt to test the several ways of exhaust control under uniform conditions.

A standard draft DIN SPEC 33999 was the template for this work. It was modified to test different filter systems. On the one hand filtering separators were used, on the other hand also two different electric separators, one a sawtooth electrode, one a wolfram electrode. For filtering we used either insulating material or glass fibre matting.

An existing test machine (VDI 3926 TYP 2) was modified to test different separators under defined conditions. The parameters for deposition rates, pressure loss and the quality factor were measured and calculated. As testing aerosol artificially generated soot was used, as well as a mix of soot and wood ashes.

The researches executed showed that electric separators have a slightly smaller deposition rate than filtering separators, but the pressure loss in electric systems is far smaller than in any other system.

So, for the upgrade of existing small scale furnaces electric separators are much more convenient, especially as there is no need for additional bellows in the chimney.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Emissionen	7
1.2	Feinstaub.....	11
1.3	Gesetzeslage in Österreich	14
1.3.1	Einsatz von Staubminderungseinrichtungen.....	18
1.4	Entstaubungstechniken	19
1.4.1	Fliehkraftabscheider (Zyklon).....	21
1.4.2	Elektroabscheider	22
1.4.3	Filternde Abscheider	26
1.4.4	Nassabscheider	33
1.5	Übersicht Kleinfeuerungsanlagen.....	35
1.5.1	Staubemissionen von Kleinfeuerungen.....	37
1.6	Staubabscheider für Kleinfeuerungsanlagen.....	38
2	Zielsetzung.....	41
3	Normentwurf DIN SPEC 33999 zur Beurteilung von Abscheidersystemen für Kleinfeuerungsanlagen.....	42
4	Aufbau und Komponenten des Prüfstandes.....	47
4.1	Messtechnik	49
4.1.1	Druckmessung.....	49
4.1.2	Scanning Mobile Particle Sizer	50
4.1.3	Rußgenerator.....	52
4.1.4	Staubgenerator	54
4.2	Untersuchte Abscheider	55
4.2.1	Filternde Abscheider	55
4.2.2	Elektroabscheider	57
4.3	Testaerosole.....	60
4.3.1	Ruß.....	60
4.3.2	Mischung Ruß und Holzasche als disperser Anteil im Trägergas.....	60
4.4	Versuchsdurchführung	62
4.5	Auswertung	65

Einleitung	6
4.5.1 Abscheidegrad	65
4.5.2 Quality-Faktor	65
5 Ergebnisse	67
5.1 Filternde Abscheider	67
5.1.1 Dämmmaterial	67
Testaerosol Ruß	67
Testaerosol Ruß-Holzasche-Mischung	72
5.1.2 Glasfaservlies	74
Testaerosol Ruß	74
Testaerosol Ruß-Holzasche-Mischung	79
5.2 Elektroabscheider	81
5.2.1 Sägezahnelektrode	82
5.2.2 Wolframdrahtelektrode	83
5.3 Diskussion der Ergebnisse	85
6 Zusammenfassung und Ausblick	87
7 Literaturverzeichnis	90
8 Abbildungsverzeichnis	94
9 Tabellenverzeichnis	97

1 Einleitung

Das Ziel der Arbeit war, die Beurteilung verschiedener Abscheider für Kleinfeuerungsanlagen in Bezug auf das Staubabscheideverhalten und dem dafür notwendigen Druckverlust. Diese Abscheider sollen das Einhalten der ständig sich verschärfenden Emissionsgrenzwerte von Kleinfeuerungsanlagen sicherstellen. Ein besonderes Augenmerk besteht bei der Beurteilung von verschiedenen Abscheidertechnologien auch auf der einfachen Nachrüstung von bereits bestehenden Kleinfeuerungsanlagen.

1.1 Emissionen

Die Begriffe Feinstaub und Emissionen, als auch Überlegungen zu deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, sind in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder in verschiedensten Medien kontrovers diskutiert worden. Gesundheitliche Auswirkungen sind bekannt, deswegen sind Grenzwerte in Gesetzen und Normen festgehalten, um eine dauerhafte Reduktion zu erreichen.

Unter Emission wird der Ausstoß von gasförmigen, flüssigen und/oder festen Stoffen aus der Erdoberfläche (Wasser, Luft oder Boden) durch deren Verursacher, der sogenannten Emitter (Emittenden = Sender), verstanden. Meist sind technische Anlagen beispielsweise Autos, Kraftwerke, Industriebetriebe als auch Feuerungsanlagen, die als Heizung oder zur Warmwasseraufbereitung dienen, die Emitter. Mit der Emission geht immer die Immission einher, da die emittierten Partikel/Schadstoffe einen Einfluss auf ihre Umwelt, insbesondere Menschen und Tiere, aber auch Gebäude sowie auf den Boden haben. Unter Immission wird die negative Auswirkung der Emission auf die Umwelt verstanden. Es müssen nicht immer feste Partikel sein die als Emissionen und Immissionen beschrieben werden, auch Geräusche in Form von Lärm und Strahlung können darunter verstanden werden.

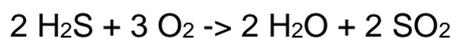
Die Abluft welche bei der Verbrennung von fossilen oder biogenen Brennstoff entsteht, kann hinsichtlich der Verunreinigungen in fünf große Schadstoffgruppen eingeteilt werden:

- Schwefeloxide (hauptsächlich SO₂, SO₃ und H₂SO₄)
- Stickstoffoxide (NO und NO₂, kurz NO_x genannt)
- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Flüchtige organische Verbindungen
- Staub, Aerosole

[1]

Schwefeloxide:

Schwefeloxid, insbesondere das hier hauptsächlich betrachtete Schwefeldioxid, entsteht vermehrt bei der Verbrennung, also der Oxidation, des in fossilen Brennstoffen enthaltenen Schwefels. Eine mögliche Reaktion ist

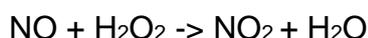


Schwefeldioxid (SO₂), ist ein farbloses, stechend riechendes, gut wasserlösliches Reizgas, dass vor allem zu Problemen im Atemwegsbereich, wie z.B. zu Reizungen der Nasen-, Mund- und Augenschleimhäute führt. Es stört den natürlichen Selbstreinigungsmechanismus des Atemtraktes und führt so neben Entzündungen der äußeren Atemwege auch zu Krankheiten wie Trachitis und Bronchitis, zur Veränderung der Lungenfunktion und sogar bis zum Erstickungstod. [2] SO₂ trägt zur sauren Deposition bei, und hat so einen Einfluss auf Gewässer und Böden. Ein zweiter umwelttechnischer Aspekt ist, dass SO₂ durch Reaktion mit Ammonium durch Aerosolbildung zu Feinstaubbelastung, insbesondere der PM_{2,5}-Fraktion, beiträgt.

70%-80% der auf der Erde entstehenden Schwefelemissionen, sind anthropogen, das heißt durch den Menschen verursacht. Die restlichen, durch natürliche Effekte entstehenden (=geogenen) Schwefelemissionen können beispielsweise durch Vulkane, aus Ozeanen oder durch Sümpfe in die Atmosphäre gelangen. Die für die Umwelt relevantesten Schwefelverbindungen neben SO₂ sind Schwefelwasserstoff (H₂S), Dimehtylsulfid (CH₃SCH₃), Kohlenstoffdisulfid (CS₂), Carbonylsulfid (COS) und Sulfat (SO₄²⁻).

Stickstoffoxide bzw. Nitrose Gase

Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) sind die beiden Stickstoffoxide die sich, da sie leicht ineinander überführbar sind, hinter dem Überbegriff NO_x verbergen. NO und NO₂ sind die beiden Stickstoffoxide, die unter atmosphärischen Bedingungen vorliegen, wobei NO zu 90% von Fahrzeugen emittiert wird, und in der Atmosphäre langsam zu NO₂ oxidiert. Es benötigt dafür einige Stunden nach untenstehender Reaktionsgleichung. Atmosphärisch liegen NO und NO₂ zu gleichen Teilen vor, da NO₂ große natürliche Emitter, wie beispielsweise Bakterien besitzt.



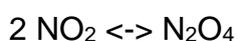
Stickstoffoxide tragen, in Kombination mit flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen, zur sommerlichen Ozonbildung bei. Weiters besitzen sie Auswirkungen auf unser Ökosystem. Sie können Pflanzen schädigen und zu Nekrosen, das bedeutet teilweises Absterben von Pflanzenteilen, als auch zu vorzeitigem Altern führen.

Stickstoffmonoxid

NO ist ein farbloses und giftiges, aber kaum wasserlösliches Gas mit einem ungepaarten Elektron und ist somit ein freies Radikal. Aufgrund der für Radikale untypischen langen Halbwertszeit von ca. 400s in biologischen Systemen kann es als bioaktives Molekül wirken. Die wesentlichen Einflüsse auf den Menschen führen zu Gefäßerweiterungen, die sich wiederum auf den Blutdruck auswirken. Es fungiert als Neurotransmitter und beeinflusst das Immun-System. [3] Reines NO besitzt keine Reizwirkung im humanen System, jedoch bildet es nach Aufnahme mit Hämoglobin, biologisch inaktives Methämoglobin.

Stickstoffdioxid

Auch NO₂ hat Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Stickstoffdioxid ist ein rotbraunes, schwer wasserlösliches Gas, dass im Gleichgewicht mit dem farblosen Tetraoxid N₂O₄ steht.



Im Gegensatz zu NO, ist NO₂ ein typisches Reizgas. Aufgrund der geringen Wasserlöslichkeit von Stickstoffdioxid kann es tief in die Lunge eintreten. Es kann mit

Wasser und alkalischen Lösungen Nitrite und Nitrate bilden. Bei kurzer Applikationszeit führt es zu einer reversiblen Veränderung der Lungenfunktion, bei langer Einwirkzeit ist eine erhöhte Anfälligkeit für Atemtrakterkrankungen bis hin zum Lungenödem ein typisches Krankheitsbild. Da NO_2 meist in Begleitung von anderen Schadstoffen auftritt ist ein exaktes Beschreiben des Krankheitsbildes und eine Differenzierung des alleinigen Einflusses schwierig festzustellen.

Stickstoffdioxid trägt zur Acidifizierung und Eutrophierung von Böden und Gewässern bei. Neben der sommerlichen Ozonbildung kann NO_2 Aerosole bilden und so auch zur Feinstaubbelastung beitragen. [4] [5] S. 535- 536 [6]

Kohlenstoffmonoxid

Kohlenstoffmonoxid entsteht bei unvollständiger Verbrennung von Kohlenstoff unter Sauerstoffmangel. Die Hauptverursacher sind der städtische Individualverkehr, aber auch Heizungen. Ein weiterer Emitter ist, bei globaler Betrachtung, die Methanoxidation bei Fäulnisprozessen. Beim Stadtverkehr wird CO hauptsächlich bei niedrigen Motorentemperaturen, im Leerlauf, gebildet. Sowohl durch bessere Motoren- und Katalysatortechnik als auch durch Modernisierung von Gebäudeheizungen konnten um die Jahrtausendwende große CO Minderungen erzielt werden. CO ist ein farbloses, geruchsloses und brennbares Gas. Bei Verbrennung wird dieses zu CO_2 oxidiert. Als Luftschadstoff ist CO aufgrund seiner toxischen Wirkung auf Mensch und Tier von großer Bedeutung. Es blockiert den Sauerstofftransport im Blut, da seine Affinität sich an Hämoglobin zu binden, um das 200 bis 300- fache größer ist, als die von Sauerstoff. Prinzipiell ist die Bindung von CO an das Eisenzentralatom des Hämoglobins reversibel, jedoch ist dafür aufgrund der deutlich höheren Affinität von CO ein relativ großer Sauerstoffüberschuss von Nöten, um eine Gleichgewichtsverschiebung in Richtung Sauerstoff zu erreichen. Alle Symptome die durch eine Kohlenstoffmonoxidvergiftung entstehen, lassen sich durch Sauerstoffmangel und durch Aufstau der metabolisch daraus gebildeten Kohlensäure im Körper erklären. Sie beginnen mit leichten Kopfschmerzen, Mattheit, Kurzatmigkeit aber auch Herzklopfen. Letzteres ist erklärbar, da der Körper versucht, den O_2 -Mangel durch erhöhte Pulsfrequenz auszugleichen, um so trotzdem eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Organe zu erreichen. Die Vergiftung führt über Schwindel und Bewusstheitseinschränkung über den Kreislauskollaps bis hin zu einer tiefen

Bewusstlosigkeit und zum Tod. Ob Kohlenstoffmonoxid auch Einfluss auf Vegetation und Materialien hat und dort Schädigungen erzeugt, ist noch nicht geklärt.

[5]S. 470-473, S. 531-534 [7]

Flüchtige organische Verbindungen

Leichtflüchtige organische Verbindungen (VOC engl. für volatile organic compounds) entstehen zu einem Großteil durch offenen Gebrauch von Lösungsmitteln als auch durch die Emission bei unvollständiger Verbrennung in Fahrzeugen. [5] Nach der WHO werden diese nach ihrem Siedepunkt bzw. der sich daraus ergebenden Flüchtigkeit eingeteilt. Diese Einteilung ist der nachstehenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Einteilung der flüchtigen organischen Verbindungen nach WHO [8]

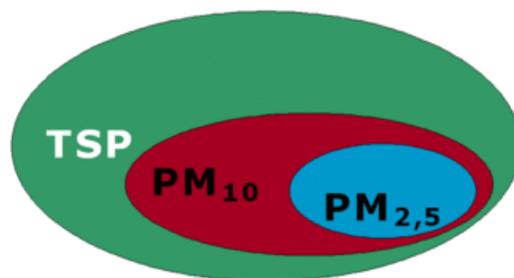
Beschreibung	Siedebereich
1. Very Volatile Organic Compound (VVOC)	< 0 bis 50... 100°C
2. Volatile Organic Compound (VOC)	50...100 bis 240...260 °C
3. Semi Volatile Organic Compound (SVOC)	240...260 bis 380...400°C
4. Organic compound associated with particle matter or particulate organic matter (POM)	>380 °C

1.2 Feinstaub

Da aus gesundheitlicher Sicht nicht nur die Zusammensetzung des Staubes, sondern auch die Größe der Staubkörner eine wesentliche Rolle spielt, werden diese in Unterkategorien unterteilt. Eine relevante Fraktion des Gesamtstaubes (TSP) stellen die Partikeln dar, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 10 µm beträgt (PM10 als „Feinstaub“ bezeichnet) bzw. Partikeln, deren aerodynamischer Durchmesser weniger als 2,5 µm beträgt (PM 2,5)

[9] [10]

In Abbildung 1 ist eine schematische Mengeneinteilung ersichtlich, wobei TSP für die englische Bezeichnung – Total Suspended Particles – des Schwebstaubes steht und die Überbezeichnung für alle luftgetragenen Partikel ist. PM10 und PM2,5 steht wie oben schon erwähnt für die englische Bezeichnung Partikel Matter- Feinstaub. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist der Feinstaub mit 2,5µm in der Fraktion mit 10µm enthalten, die wiederum ein Teil der Gesamtstaubmenge ist.



Mengenverteilung von Staub (TSP, PM10 und PM2,5)

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mengenverteilung von TSP, PM 10 und PM 2,5 [11]

Bei Staub kann zwischen primären und sekundär gebildeten Partikeln unterschieden werden, wobei erstere direkt beispielweise aus Schornsteinen oder durch Aufwirbelung von Straßenstäuben emittiert werden. Sekundäre Partikeln hingegen entstehen durch Reaktion von Gasen in der Atmosphäre. [12]

Feinstaub hat, je nach aerodynamischer Partikelgröße des Aerosols, unterschiedlichen Einfluss auf Mensch und Umwelt. Je kleiner die Partikeln, desto weiter können sie in den menschlichen Organismus eindringen. Sie wirken, wenn sie fein genug sind, kardiopulmonal, manche können bis ins Cerebrum vordringen. Partikel größer als 10 µm werden beim Einatmen durch die oberen Atemwege abgeschieden. Sie wirken nur im Nasen- und Rachenbereich und werden durch Selbstreinigung sekretiert.

In der Norm EN 481 wird die Partikelgröße der Aerosole nach ihren Wirk-, bzw. Abscheidebereichen im Menschen definiert. Der Massenanteil der durch Mund und Nase eingeatmet wird, wird als einatembare Fraktion bezeichnet. Der Anteil davon der nicht über den Kehlkopf vordringt, das heißt davor schon abgeschieden wird, wird extrathorakale Fraktion genannt. Der Massenanteil der Partikeln die den Kehlkopf passieren können, nennt man thorakale Fraktion. Als alveolengängige Fraktion wird jene Fraktion bezeichnet, die bis in die nichtcilierten Bereiche, also bis in die Alveolen vordringt. Prinzipiell ist zu beachten, dass nur ein Teil der gesamten in der Umgebungsluft befindlichen Schwebstoffe in der Nähe von Nase und Mund eingeatmet wird. Zur besseren Vergleichbarkeit wird eine Konvention in der Norm getroffen. Laut Norm wird die Probennahme der einatembaren Menge über folgende Gleichung 1 beschrieben.

$$E_1 = 50 (1 + \exp[-0,06D]) \quad (1)$$

Wobei E_1 der Prozentsatz der Schwebstoffe mit dem Aerodynamischen Durchmesser D [μm] ist. Die Formel (1) wird nur auf Daten mit $D < 100 \mu\text{m}$ angewandt. Die so rechnerisch ermittelten Daten sind in Abbildung 2 ersichtlich. Es ergibt sich für die thorakale Fraktion eine kumulierte Normalverteilung mit dem Medianwert von $11,64 \mu\text{m}$ mit einer geometrischen Standardabweichung von $1,5 \mu\text{m}$ und für die alveolengängige Fraktion ergibt sich nach der kumulierten Lognormalverteilung ein Medianwert von $4,25 \mu\text{m}$ mit einer geometrischen Standardabweichung von $1,5 \mu\text{m}$. [13]

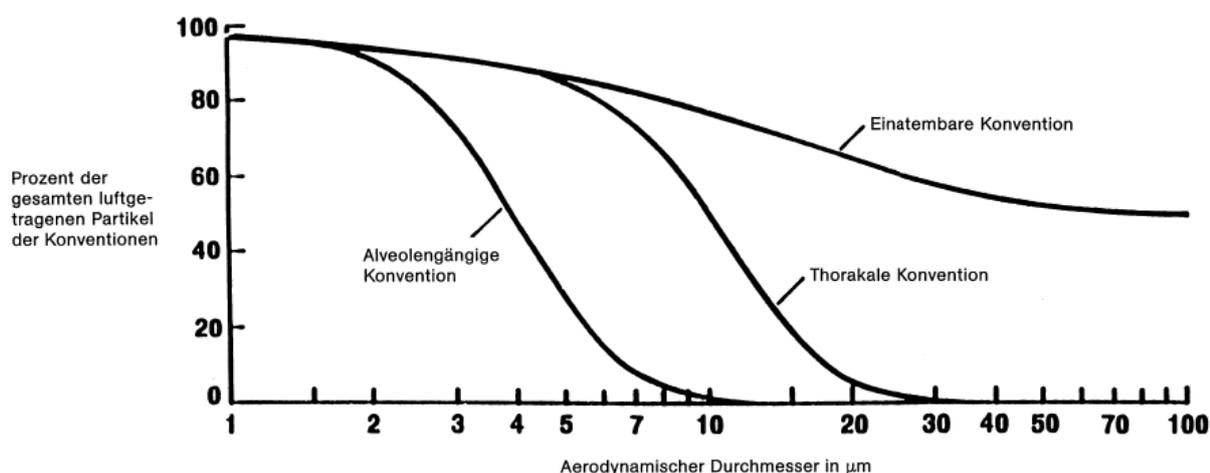


Abbildung 2: Die einatembare, thorakale und alveolengängige Konvention in Prozent der gesamten luftgetragenen Partikeln [13]

Einige Industriestäube und deren zugehöriges Größenspektrum ist in Abbildung 3 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass Feuerungsstäube im Falle von Flugasche nach Verbrennung eine Korngrößenverteilung von ca. $0,2 \mu\text{m}$ bis $80 \mu\text{m}$ aufweist.

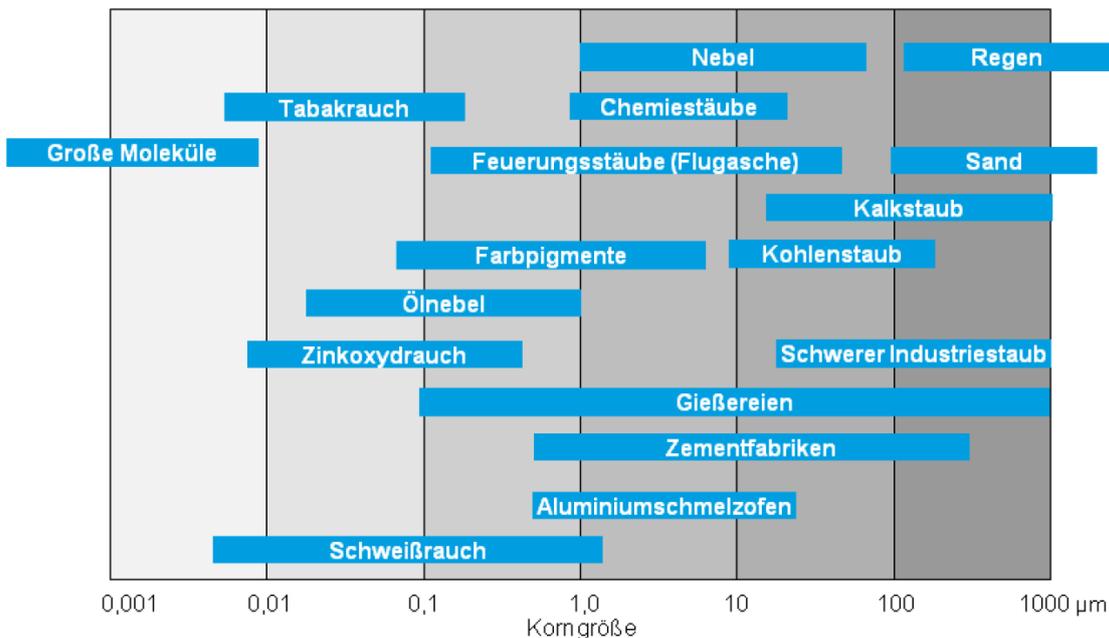


Abbildung 3: Industriestäube mit den zugehörigen Korngrößenspektren zwischen 0,1 µm bis 1000 µm. [14]

1.3 Gesetzeslage in Österreich

Verschiedene Feuerungssysteme stoßen je nach Alter und Art unterschiedliche Mengen an Emissionen aus.

Um eine nachhaltigere Energiegewinnung zu erreichen wurde in der EU Ökodesign-2009/125/EG Richtlinien entwickelt. Eine Richtlinie besagt, dass energieverbrauchsrelevante Produkte durch produktspezifische Verordnungen konkretisiert und bindend gemacht, energieeffizienter gestaltet werden müssen. Hauptziel ist die Verbesserung von energieverbrauchenden Produkten hauptsächlich durch Minderung des Verbrauches, um somit einen Beitrag zur Emissionsminderung in der EU, und somit auch das Erreichen der europäischen Klimaschutzziele zu bewirken. Die Vermeidung der Emissionen, als auch die Reduktion der Verbrauchsgegenstände, wie beispielsweise Glühbirnen, Warmwasser, als auch Brennstoff, soll durch Vermeidung übermäßiger Kosten erreicht werden.

In Österreich selbst gibt es das Klimaschutzgesetz (KSG, BGBl. I Nr. 106/2011) das sektorale Höchstmengen an Emissionen für die Jahre 2013- 2020 festlegt. Österreich ist legislativ verpflichtet eine Verringerung von 16% gegenüber 2005 für die nicht in den Emissionshandel beteiligten Sektoren zu erreichen, ansonsten kann ein

Vertragsverletzungsverfahren durch die Europäische Kommission durchgeführt werden. Es gibt 2 Gremien in Österreich die diese Umsetzung begleiten. Diese sind das nationale Klimaschutzkomitee und der nationale Klimaschutzbeirat. Ihre Vertreter stammen aus dem Bund, den Ländern und von den Sozialpartnern. Auch nehmen Mitglieder aus den Parlamentsparteien, der Wissenschaft und von Umweltorganisationen an den Komitees teil. Es wird jedes Jahr ein Fortschrittsbericht nach §6 des Klimaschutzgesetzes veröffentlicht.

Dieser Bericht soll den aktuellen Stand zur Einhaltung der Treibhausgas Emissionsziele zeigen und dokumentieren.

Tabelle 2 zeigt die im Jahr 2016 veröffentlichten Treibhausgasemissionen vom Kalenderjahr 2014. Diese Werte, eingeteilt in den entstehenden Sektoren, sind den Bezugswerten aus dem Jahr 2005 und den erreichten Sektorenzielen gegenübergestellt. Durch Differenzbildung werden die Abweichung gegenüber dem Ziel und der tatsächliche Ausstoß ermittelt. Wobei bei den angegebenen Werten, die ohne den Emissionshandel erhaltenen Werte dargestellt sind. Es ist erkennbar, dass nur ein Sektor, der der Abfallwirtschaft, das Ziel nicht erreicht hat, die Werte sind jedoch deutlich geringer als im Bezugsjahr 2005.

Tabelle 2: Österreichische Treibhausgasemissionen 2005 und 2014 im Vergleich in Mio t CO₂ Äquivalent [15]

Sektor	Stand		Sektoren Ziel	Differenz
	2005	2014	2014	2014
Energie und Industrie	6,53	5,86	6,9	-1,0
Verkehr	24,55	21,68	22,3	-0,6
Gebäude	12,54	7,60	9,7	-2,1
Landwirtschaft	8,12	7,97	8,0	0,0
Abfallwirtschaft	3,43	3,10	3,0	+0,1
Fluorierte Gase	1,80	2,01	2,2	-0,2
Gesamt	56,96	48,22	52,1	-3,9

Auch in Österreich gibt es Gesetze und Verordnungen, je nach Bundesland unterschiedliche, die eine Emissionsminderung vorschreiben bzw. bewirken. Die Zulassung von Kleinfeuerungsanlagen in Österreich obliegt den Ländern. Es gibt eine Vereinbarung von allen 9 Bundesländern gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungsanlagen, in dem einheitlichen Bestimmungen für Gesamtösterreich zugestimmt wurden. Die derzeitigen Emissionsgrenzwerte für Kleinfeuerungsanlagen liegen, abhängig von der Art der Feuerungsanlage als auch von der Beschickungsmethode, in folgenden Tabellen (Tabelle 3 und Tabelle 4), vor. Diese Tabellen sind der Vereinbarung [16] entnommen worden.

Tabelle 3: Emissionsgrenzwerte für Kleinfeuerungsanlagen [16]

Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinfeuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken (2011)

Teil A - Emissionsgrenzwerte

Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe mit händischer Beschickung

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Staub [mg/MJ]
Holzbrennstoffe (Raumheizgeräte)	händisch	≤400 kW	1.100	150	80	60
Holzbrennstoffe (Zentralheizgeräte)	händisch	≤400 kW	500	150	50	50
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	händisch	<50kW	1.100	300	50	60
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	händisch	≥50 kW	500	300	30	60
Fossile Brennstoffe	händisch	<50kW	1.100	100	80	50
Fossile Brennstoffe	händisch	≥50 kW	500	100	30	50

Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe mit automatischer Beschickung

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Staub [mg/MJ]
Holzpellets (Raumheizgeräte)	automatisch	≤400 kW	500	150	30	50
Holzpellets (Zentralheizgeräte)	automatisch	≤400 kW	250	150	30	40
Sonstige Holzpellets	automatisch	≤400 kW	250	150	30	50
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	automatisch	≤400 kW	500	300	30	60

* Bei Teillastbetrieb mit 30% der Nennwärmeleistung kann der CO-Grenzwert um 50% überschritten werden.

Kleinfeuerungen für feste Brennstoffe mit händischer Beschickung (Gültigkeit ab 01.01.2015)

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Staub [mg/MJ]
Holzbrennstoffe (Raumheizgeräte)	händisch	≤400 kW	1.100	150	50	35
Holzbrennstoffe (Zentralheizgeräte)	händisch	≤400 kW	500	100	30	30
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	händisch	<50kW	1.100	300	50	35
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	händisch	≥50 kW	500	300	30	35
Fossile Brennstoffe	händisch	<50kW	1.100	100	80	35
Fossile Brennstoffe	händisch	≥50 kW	500	100	30	35

Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte für Kleinf Feuerungsanlagen 2 [16]

Kleinf Feuerungen für feste Brennstoffe mit automatischer Beschickung (Gültigkeit ab 01.01.2015)

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Staub [mg/MJ]
Holzpellets (Raumheizgeräte)	automatisch	≤400 kW	500	100	30	25
Holzpellets (Zentralheizgeräte)	automatisch	≤400 kW	250	100	20	20
Sonstige Holz brennstoffe	automatisch	≤400 kW	250	100	30	30
Sonstige standardisierte biogene Brennstoffe	automatisch	≤400 kW	500	300	20	35

* Bei Teillastbetrieb mit 30% der Nennwärmeleistung kann der CO-Grenzwert um 50% überschritten werden.

Kleinf Feuerungen für flüssige Brennstoffe

Brennstoff	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Rußzahl []
Standardisierte biogene Brennstoffe	alle	≤400 kW	20	120	6	1
Fossile Brennstoffe	alle	≤400 kW	20	35	6	1

Feuerungsanlagen für gasförmige Brennstoffe

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Beschickung	Nennwärmeleistung [kW]	CO [mg/MJ]	NO _x [mg/MJ]	OGC [mg/MJ]	Staub [mg/MJ]
Erdgas (atmosphärischer Brenner)	alle	≤400 kW	20	30	-	-
Erdgas (Gebläse brenner)	alle	≤400 kW	20	30	-	-
Flüssiggas (atmosphärischer Brenner)	alle	≤400 kW	35	40	-	-
Flüssiggas (Gebläse brenner)	alle	≤400 kW	20	40	-	-

* Der NO_x-Grenzwert darf für Durchlauferhitzer, Vorratswasserheizer und Raumheizgeräte mit atmosphärischem Brenner um höchstens 100 % überschritten werden.

Ein genereller Trend, zwischen den Emissionswerten der händischen und der automatischen Beschickung, ist erkennbar. Es zeigt sich, dass die Kohlenstoffmonoxidwerte und die gasförmigen organischen Bestandteile (OGC) bei Handbeschickung der Brennstoffzufuhr doppelt so hoch ausfallen dürfen, als bei der automatischen Beschickung. Die Werte für den Stickstoffoxid-Gehalt als auch für den Staubgehalt sind bei den unterschiedlichen Beschickungsmethoden gleich. Weiters sieht man zwischen der Tabelle 3 und der Tabelle 4, dass hinsichtlich der Staubemissionen zwischen den Jahren 2011 und 2015 eine Reduktion um nahezu der Hälfte stattgefunden hat. In dieser Österreichischen Verordnung sind auch Mindestwirkungsgrade der unterschiedlichen Feuerungsanlagen angeführt. Für Feuerungsanlagen in Innenräumen, wie Herde und Raumheizgeräte, sind Mindestwirkungsgrade ab 70%, in manchen Fällen auch 80%, gefordert.

Tabelle 5: Prüfintervalle von bestehenden Kleinf Feuerungsanlagen [17]

Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken (2011)

Teil D - Prüfintervalle bei bestehenden Kleinf Feuerungen

Einfache Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Nennwärmeleistung [kW]	Brennstoffwärmeleistung [kW]	Prüfintervall
Alle Brennstoffe	alle	-	innerhalb von 4 Wochen ab Inbetriebnahme
Gasförmige Brennstoffe	<26 kW	-	alle 4 Jahre
Standardisierte biogene oder fossile Brennstoffe	<50 kW	-	alle 2 Jahre
Standardisierte biogene oder fossile Brennstoffe (Warmwasserbereiter)	≥26 kW	-	alle 2 Jahre
Nicht standardisierte biogene Brennstoffe	<50 kW	-	jährlich
Nicht standardisierte biogene Brennstoffe (Warmwasserbereiter)	≥26 kW	-	jährlich
Alle Brennstoffe	≥50 kW	-	jährlich
Alle Brennstoffe (Blockheizkraftwerke)	-	alle	jährlich

Dem Verfügungsberechtigten wird ein Prüfbericht gemäß den Regeln der Technik zur Verwahrung bis zumindest zur nächsten Überprüfung ausgehändigt.

Umfassende Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken

Brennstoff (Feuerungsanlage)	Nennwärmeleistung [kW]	Brennstoffwärmeleistung [kW]	Prüfintervall
Nicht standardisierte biogene Brennstoffe	≤400 kW	-	innerhalb von 4 Wochen ab Inbetriebnahme
Alle Brennstoffe	>400 kW	-	innerhalb von 4 Wochen ab Inbetriebnahme
Alle Brennstoffe (Blockheizkraftwerke)	alle	-	innerhalb von 4 Wochen ab Inbetriebnahme
Alle Brennstoffe (Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerke)	-	≥1 MW ≤2MW	alle 5 Jahre
Alle Brennstoffe (Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerke)	-	>2 MW	alle 3 Jahre

Dem Verfügungsberechtigten wird ein Prüfbericht gemäß den Regeln der Technik zur Verwahrung bis zumindest zur nächsten Überprüfung ausgehändigt.

In den Jahren, in denen eine umfassende Überprüfung durchgeführt wird, ist eine einfache Überprüfung nicht erforderlich.

In Tabelle 5 sind die vom Gesetzgeber nötigen Kontrollen von bestehenden Kleinf Feuerungsanlagen erkennbar. Abhängig von der Nennwärmeleistung, als auch dem Brennstoff ergeben sich unterschiedliche Kontrolltermine. Prinzipiell muss eine Kontrolle innerhalb von 4 Wochen nach der ersten Inbetriebnahme erfolgen. Bei nicht standardisierten Brennmaterialien muss eine jährliche Abnahme erfolgen. Bei standardisiertem Brennmaterial ist eine zweijährige Kontrolle nötig, wohingegen bei der Verbrennung von Erdgas als Brennstoff in Niederösterreich eine Überprüfung nur alle 4 Jahre nötig ist. In Wien ist nach der Wiener Kehrverordnung 2016 eine jährliche Kehrung durch den Rauchfangkehrer notwendig um lebensbedrohliche Kohlenmonoxidgehalte auszuschließen.

1.3.1 Einsatz von Staubminderungseinrichtungen

Zur Einhaltung der strengen Emissionsgrenzwerte von Kleinf Feuerungen (insbesondere für alte, bestehende Anlagen) werden nachgeschaltete Abscheider unumgänglich. Erste Systeme für Kleinf Feuerungen (<30kW) sind seit einigen Jahren in Entwicklung bzw. am Markt erhältlich. Eine standardisierte Beurteilung ist derzeit noch nicht gesetzlich vorgeschrieben.

Zum Testen und Beurteilen von solchen Abscheidern (siehe auch Kapitel 1.6) wurde in Deutschland ein Normentwurf DIN SPEC 33999 von 12.2014 (Emissionsminderung -

Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen) vorgeschlagen.

Diese beschreibt den Aufbau der zu verwendenden Prüfstrecke als auch der Messmethoden um vergleichbare Messergebnisse von unterschiedlichen Prüfinstitutionen zu gewährleisten. Die DIN SPEC 33999 wird in Kapitel 3 näher behandelt.

1.4 Entstaubungstechniken

Um die gesetzlichen Emissionsgrenzwerte zu erreichen, existieren verschiedene Entstaubungstechniken die in der Praxis zum Einsatz kommen. Da in der Regel das Abbrandverhalten der Kleinf Feuerungsanlagen nicht verändert werden kann, müssen nachgeschaltete Entstauber die Reduktion der Staubemissionen übernehmen.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Entstaubung um eine Phasentrennung mit meist einer festen, seltener aber auch flüssigen disperse Phase, und einer gasförmigen fluiden Phase, der Luft. Je nachdem welche als die wichtigere Phase bezeichnet wird, kann zwischen einer Gewinnung bzw. Rückgewinnung der dispersen Phase oder der Reinhaltung bzw. Reinigung der Luft unterschieden werden. [18]

Da bei Kleinf Feuerungsanlagen die Reinhaltung bzw. die Reinigung der Abgasluft im Vordergrund steht, wird nur auf zweitere eingegangen.

Abgesehen von der Phasenzusammensetzung ist auch die Partikelgröße für die Entstaubungstechnik relevant. Je kleiner die Partikeln werden, desto schwieriger wird ihre Abtrennung, da die für die Abtrennung relevante Masse um die 3. Potenz des Durchmessers schrumpft, aber die Strömungskräfte nur um eine bis zwei Potenzen stärker werden. In weiterer Folge, werden die Partikeln je winziger sie sind leichter mitgeschleppt und verblasen. Deswegen kommen auch andere Mechanismen der Abscheidung in der Entstaubungstechnik zur Anwendung. In der Praxis findet man 5 unterschiedliche Verfahren – Schwerkraftabscheider, Fliehkraftabscheider, Naßabscheider, Filter und elektrische Abscheider. [19]

Einige unterschiedliche technische Verfahren zur Staubabscheidung, inklusive deren zugehörigen Abscheidegrade in Abhängigkeit von der Korngröße sind in Abbildung 4 dargestellt.

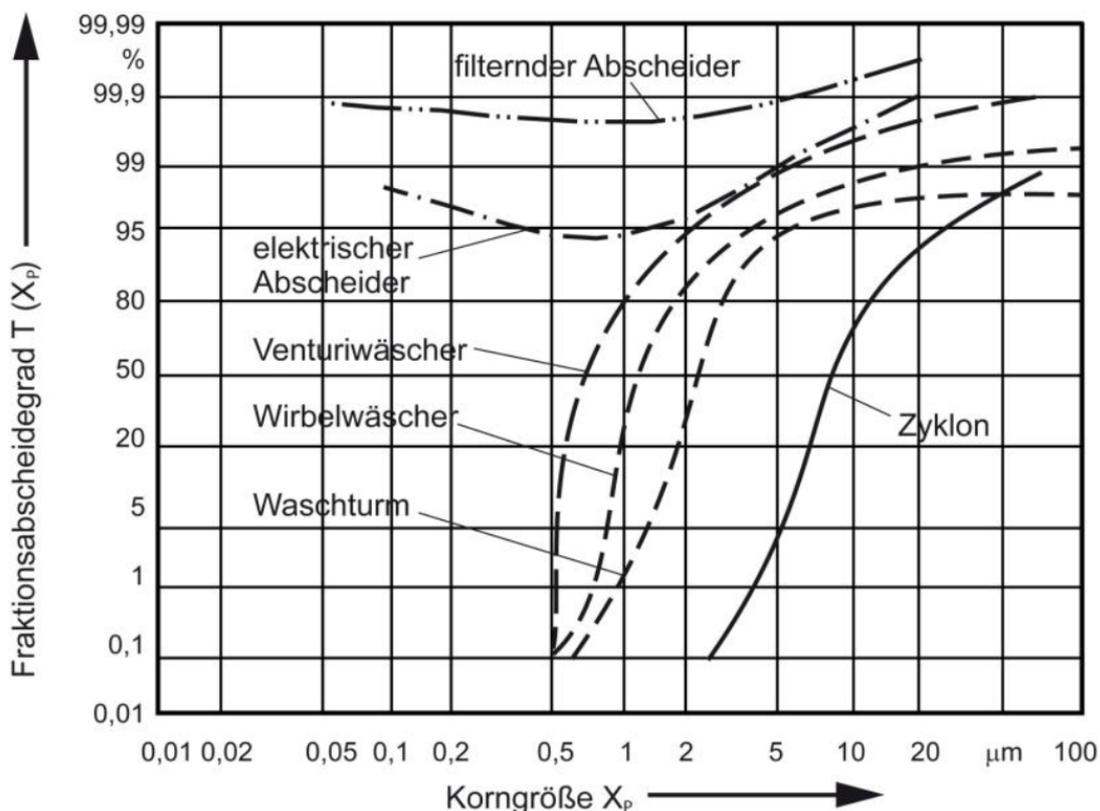


Abbildung 4: Fraktionsabscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider in Abhängigkeit von der Korngröße [5]

Es ist ersichtlich, dass filternde Abscheider den besten Abscheidegrad von über 99,6% besitzen. Möchte man größere Teilchen (z.B. $>10 \mu\text{m}$) abscheiden, wären Zentrifugalabscheider auch geeignet.

Für die Wahl des Abscheiders ist nicht nur die Korngröße der abzuscheidenden Partikeln von Bedeutung, sondern auch die Kenntnis von Rohgasstaubgehalt, der erzielbare Reingasstaubgehalt als auch Druckverlust und Temperatur der verwendeten Gasströme. Diese unterschiedlichen Kenndaten sind für die in den nächsten Kapiteln nachfolgenden Abscheider in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ersichtlich.

Tabelle 6: Wichtige Kenndaten für unterschiedliche Abscheider zur Auswahl für den zu Verwendenden Abscheider. [14]

Kenndaten	Zentrifugal- kraftabscheider	Nassab- scheider	Elektrische Abscheider	Filtrations- abscheider
Hohe Abscheidegrade im Korngrößenbereich in μm	> 10	> 0,1	> 1	> 0,5
Rohgasstaubgehalt in g/m^3	< 1.000	< 10	< 50	< 100
Erzielbarer Reingasstaubgehalt in mg/m^3	100 – 200	50 – 100	< 50	< 20
Druckverlust in Pa	500 – 3.000	100 – 1.000	30 – 400	600 – 2000 (VDI, 3677)
Max. Gastemperatur in $^{\circ}\text{C}$	450	300	450	260
Durchsatz in m^3/h	3.000 – 200.000	3.000 – 100.000	10.000 – 300.000	1.000 – 100.000

Eine Vorauswahl für die Verwendung eines bestimmten Abscheiders kann nach Kenntnis der Anwendung mit Abbildung 4 und Tabelle 6 getroffen werden.

1.4.1 Fliehkraftabscheider (Zyklon)

Der Gaszyklon ist aufgrund seines einfachen Aufbaus einer der am häufigsten eingesetzten Abscheider. Er kommt ohne bewegliche Teile aus, eine Eigenschaft die ihn wartungsarm und betriebssicher macht. [18] Aufgrund der geringeren Abscheidegrade im Feinstaubbereich eignet sich dieser Abscheider als Vorabscheider. Somit entlastet er andere nachgeschaltete Entstauber. Durch die Zentrifugalbeschleunigung werden die Partikeln durch ihre Massenträgheit zur Zylinderwand gedrückt und in spiralförmigen Bahnen unter Wirkung der Gravitationskraft in Richtung Auslassöffnung gefördert. Von der Auslassöffnung gelangen die abgeschiedenen Teilchen in den Bunker bzw. in ein Fallrohr zu einem Bunker, wo der Staub dann gesammelt wird.

Das gereinigte Abgas, wie in Abbildung 5 ersichtlich ist, wird nach oben durch das Tauchrohr aus dem Zyklon ausgetragen. In der Grenzschicht, zwischen primären und sekundären Wirbeln, können durch die Instabilität dieser, feine Partikel in den Reingasstrom gelangen und mit diesem aus den Zyklon ausgetragen werden.

Es kann prinzipiell eine endliche Verbesserung des Gesamtentstaubungsgrades erreicht werden, indem die Eintrittsgeschwindigkeit des Rohgases in den Zyklon erhöht wird, dies ist jedoch nur bis zu einem bestimmten Wert möglich, da sonst die Turbulenz zu groß wird. Durch Erhöhung der Eintrittsgeschwindigkeit in den Zyklon steigt der Druckverlust in diesem.

Bei Zyklonen sind daher die Zentrifugalkraft und im geringem Ausmaß die Gravitationskraft für die Abscheidung der Partikel maßgebend.

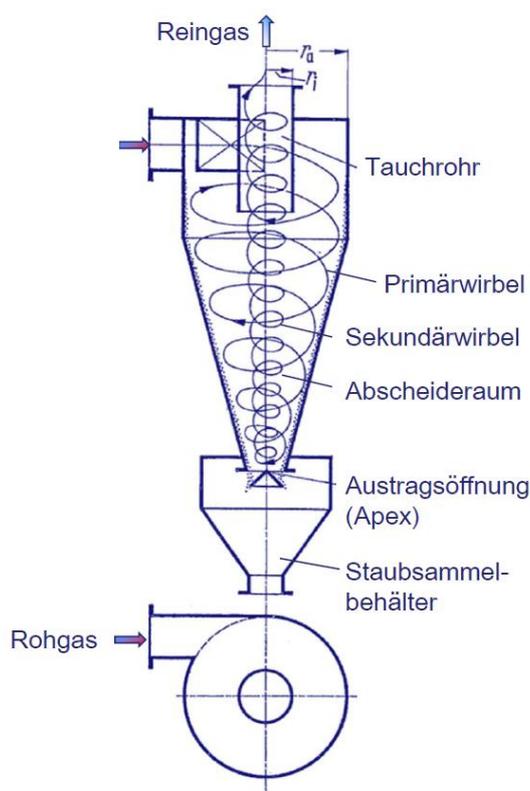


Abbildung 5: Zyklon inklusive Stromlinienverlauf [20]

1.4.2 Elektroabscheider

In dieser Form des Abscheiders wird die Abscheidung von Partikeln durch die elektrische Ladung in einem elektrischen Feld vollzogen. Gut lässt sich diese Methode für feine Partikel verwenden. Weiters ist sie eine bevorzugte Reinigungsmethode für große Abgasmengen mit hoher Temperatur.

Die elektrische Feldstärke wird nach Gleichung 2 beschrieben.

$$F_E = n_s \cdot e \cdot E_a \tag{2}$$

Wobei F_E die Kraft im elektrischen Feld in n, e die elektrische Ladung in C und E_a die elektrische Feldstärke in V/m ist.

Ein prinzipieller Aufbau eines Rohrelektroabscheiders ist der Abbildung 6 zu entnehmen.

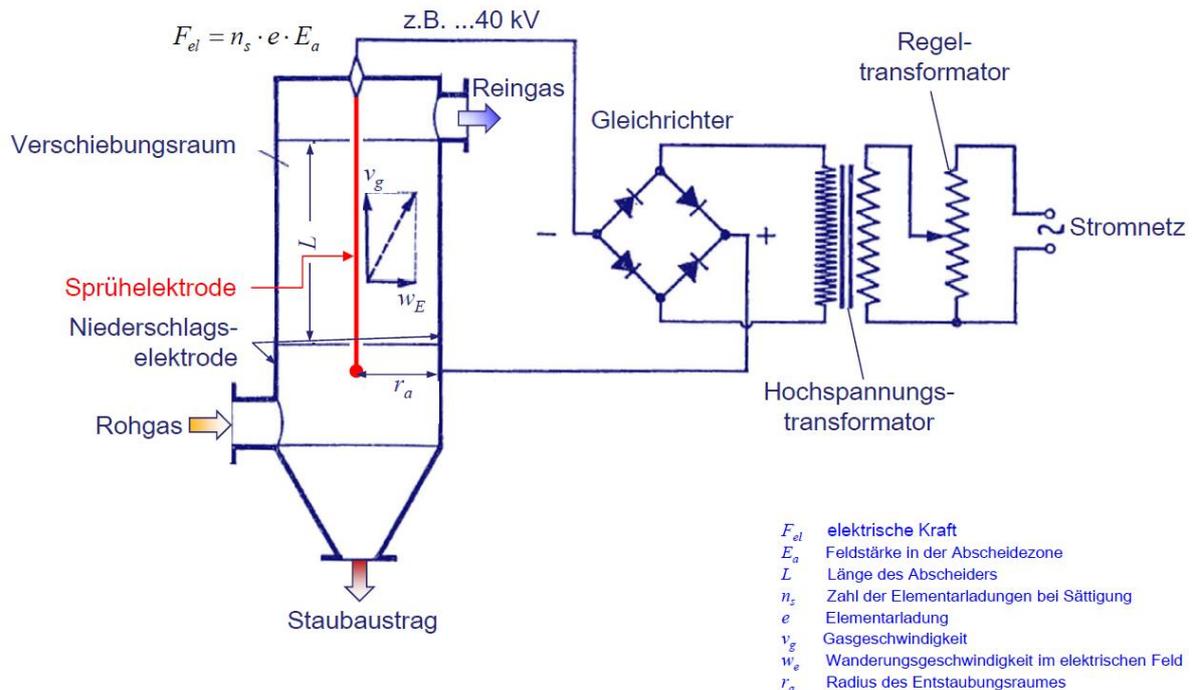


Abbildung 6: Aufbauschema eines Elektroabscheiders

Der Abscheidvorgang erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst erfolgt eine Aufladung der abzuscheidenden Partikeln mit elektrischen Ladungen, anschließend erfolgt Schritt 2, bei der die Partikeln an der Niederschlagselektrode abgeschieden werden. Im 3. Schritt erfolgt das Anhaften an der Niederschlagselektrode und einer Schichtbildung. Im 4. und letzten Schritt ist die Entfernung der abgeschiedenen Partikeln zu nennen.

Teilchenaufladung

Die Aufladung erfolgt in einem elektrischen Gleichspannungsfeld mit einer Feldstärke von 20 - 100 kV, da die natürliche Ladung der Teilchen, die durch Zerkleinerung oder Reibung entstehen würden, viel zu schwach ist, um eine Abtrennung im Elektroabscheider zu erreichen. Die Rohrwand, welche geerdet sein muss, ist bei negativer Korona die Niederschlagselektrode, die Kathode ist die sogenannte Sprühelektrode, die u.a. aus einem Draht oder einem länglichen Plättchen besteht.

Wegen der Krümmung der Sprühelektrode nimmt dort in der Nähe die Feldstärke sehr hohe Werte an. In dieser aktiven Zone bekommen die freien Elektronen so starke Beschleunigungen, dass sie eine Ionisation der Gasmoleküle auslösen. Diese Spannung, die solche Beschleunigungen hervorruft, wird Koronaeinsatzspannung genannt. Die Gasionen die im Korona-Bereich ionisiert werden, können sowohl positiv als auch negativ geladen sein. Beide Ladungen führen zu einer lawinenartigen Kettenreaktion der noch nicht geladenen Gasmoleküle und Partikeln. Durch die Anziehung der negativen Ladungen von der Niederschlagselektrode entsteht zwischen Sprühdraht und Niederschlagselektrode eine negative Raumladung die wieder die Feldstärke nahe der Sprühelektrode schwächt. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die angelegte Koronaspaltung nicht zu groß ist, da sonst die Gefahr eines Funkenüberschlags zwischen den beiden Elektroden gegeben ist und das elektrische Feld durch diese sogenannte Überschlagsspannung zusammenbricht. Der Auflademechanismus ist neben der Feldstärke auch von der Partikelgröße und den elektrischen Partikeleigenschaften abhängig.

Teilchentransport

Die geladenen Partikeln wandern orthogonal zur Strömungsrichtung zur Niederschlagselektrode. Elektrisch neutrale Teilchen werden mittels Gasreibung durch den negativen Ladungstransport mitgerissen zur Niederschlagselektrode. Prinzipiell hat ein Elektroabscheider die beste Abscheideeffizienz je näher er an der Durchschlagsgrenze arbeitet. Jedoch muss auf Funkenüberschläge oder Lichtbogenbildung geachtet werden. Es gibt auch eine positive Koronaentladung jedoch ist diese deutlich schlechter hinsichtlich der erreichbaren Abscheidegrade, da die Überschlagsspannung in etwa der Hälfte, der negativen Koronaeinsatzspannung entspricht.

Anhaften und Schichtbildung

Bei Trocken-Elektroabscheider entstehen lockere Staubschichten meistens zwischen 1 mm bis 10 mm. Der Zusammenhalt in der Staubschicht erfolgt durch elektrostatische Kräfte, und bei sehr feinen Partikeln wirken zusätzlich noch die Van der Waals Kräfte.

Der Staudruck, der durch den elektrischen Wind erzeugt wird und von der Art des Staubes, der Gaszusammensetzung als auch der Temperatur abhängig ist, führt zu einer Komprimierung der abgeschiedenen Staubschicht. Eine komprimierte Schicht lässt sich in weiterer Folge besser abreinigen. Wenn die elektrischen Widerstände zu gering sind fließen die Elektronen zu schnell durch die Erdung ab. Wirkt der abgeschiedene Staub auf der Niederschlagselektrode isolierend, kann es zu einem Rücksprühen der schon abgeschiedenen Staubpartikeln in des Gas-Volumenstrom kommen.

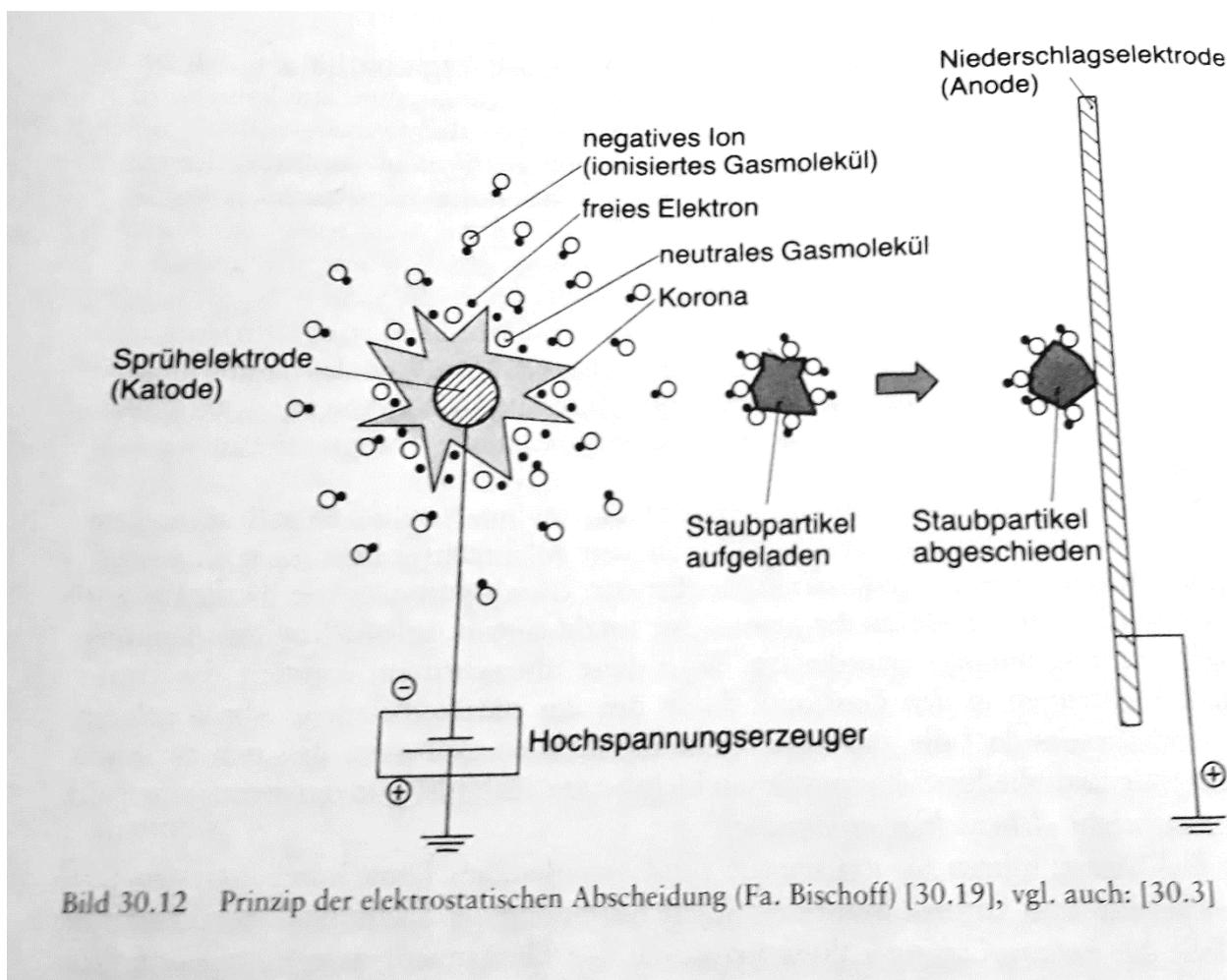


Abbildung 7: Prinzip der elektrostatistischen Abscheidung [5] S. 582

Entfernung der Staubschicht

Um eine dauerhafte gute Abreinigung zu erzielen, muss eine regelmäßige Entfernung der Staubschicht von der Niederschlagselektrode erfolgen. Im trockenen Zustand kann diese durch einfaches Klopfen mechanisch entfernt werden. Der Staub kann dann durch auffangen in einem Staubbunker entfernt werden.

Hier wird nur auf die Funktionsweise der trocken betriebenen Elektroabscheider eingegangen. Prinzipiell ist auch eine Anwendung als nasser Elektroabscheider, Kondensations-Nass-Elektroabscheider als auch als Ionisationswäscher möglich. Außerdem gibt es zwei unterschiedliche Bauweisen von Elektroabscheidern, Rohrabscheider und Plattenabscheider.

[1] S. 61-77 [5] S. 580-588.

1.4.3 Filternde Abscheider

Filternde Abscheider können, wie in Abbildung 4 erkennbar ist, relativ hohe Abscheidegrade von über 99,5% erzielen. Der Anwendungsbereich für diese Abscheider steigt ständig, weil auch die Anforderungen hinsichtlich einer hohen Staubabscheidung ständig steigen.

Das zu reinigende Gas wird durch ein poröses Medium geleitet, in welchem die dispergierten Feststoffteilchen aufgrund unterschiedlicher Mechanismen, zurückgehalten werden (siehe Abbildung 8).

Für hohe Anströmgeschwindigkeiten und für gröbere Partikel $>1 \mu\text{m}$ überwiegt der Trägheitseinfluss. Bei Umströmung der Fasern folgen Teilchen nicht in den Stromlinien des Gases, sondern werden aufgrund ihrer Trägheit in Richtung Faseroberfläche abgelenkt werden. Wenn ein Teilchen die Faseroberfläche berührt, kann es mittels Haftkräften gebunden. Sollte ein Teilchen doch den Gasstromlinien folgen kann es auch aufgrund seiner Größe und seiner Geometrie von der Faser zurückgehalten werden (Sperreffekt). Ein weiterer Effekt, der Diffusionseffekt spielt bei sehr kleinen Partikeln und niedrigen Anströmgeschwindigkeiten eine große Rolle. Die Flugbahnen der Partikeln werden hierbei vor allem durch die Brown'sche Molekularbewegung beeinflusst. [14] [1]

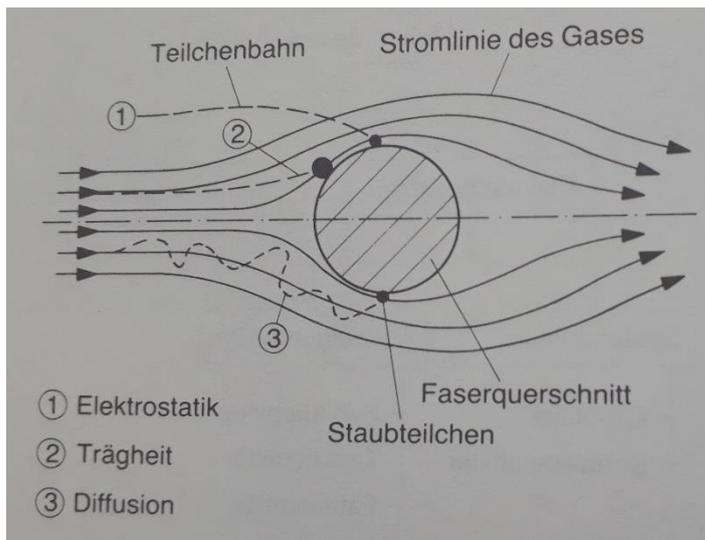


Abbildung 8 : Abscheidemechanismen in der Tiefenfiltration [1] S 42

Zur besseren Übersicht sind die nachstehend beschriebenen filternden Abscheider in Abbildung 9 klassifiziert.

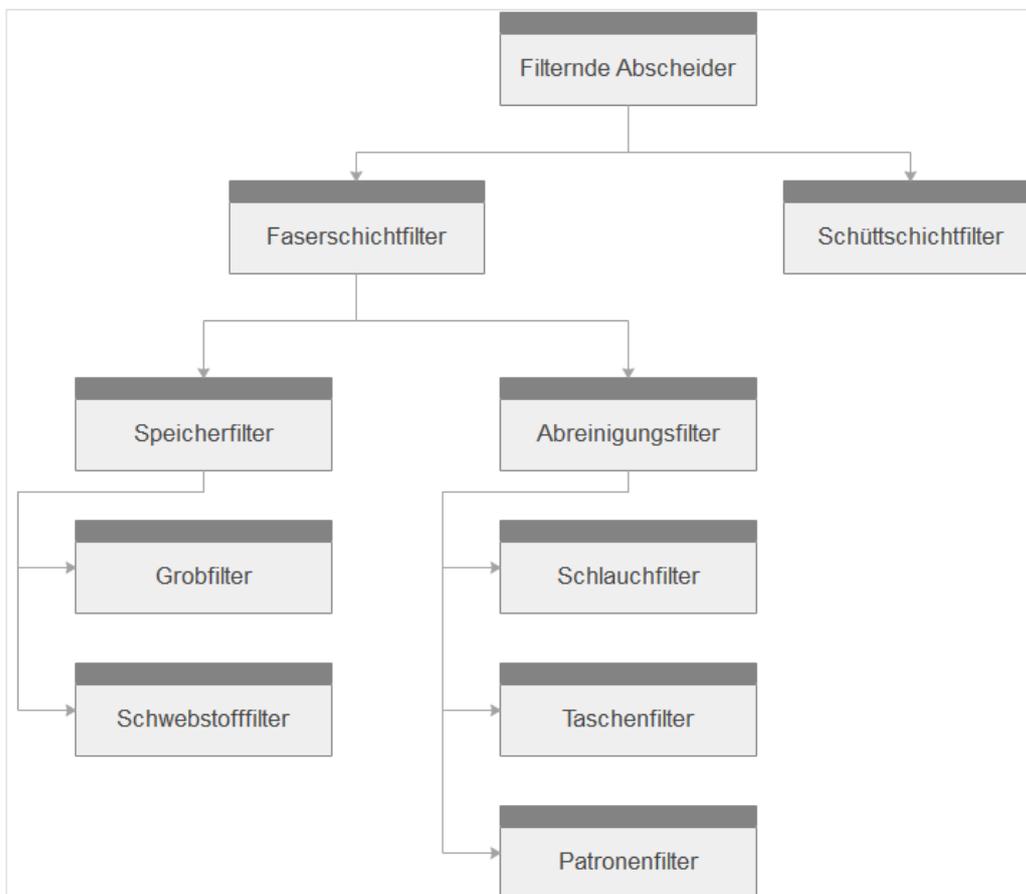


Abbildung 9: Einteilung filternder Abscheider [1] S 41.

Schüttschichtfilter

Eine Unterkategorie der filternden Abscheider beschreibt Schüttschichtfilter. Hierbei wird das poröse körnige Filtermedium von dem Abgas durchströmt. Diese Schüttschicht kann aus Materialien unterschiedlicher Größe bestehen. Beispiele für Schüttschichtmaterialien sind Kies, Sand, Tongranulat. Abhängig vom eingesetzten Material ist der Einsatz bei Abscheidung von heißen Stäuben und Abgasen, chemisch aggressiven oder klebrigen Stäuben. Weiteres finden sie Anwendung bei Gefahr von Glimmbränden. Durch das Schüttschichtmaterial hat man Einfluss auf die chemische und mechanische Beständigkeit, die Temperatur- und die Druckbeständigkeit des Filters.

Man kann zwischen Festbett-Schüttschichtfiltern mit ruhender Schüttung, Wirbelschichtfiltern und Wanderbettfiltern unterscheiden. Die beiden letzteren beiden besitzen eine bewegte Schüttschicht.

Eine schematische Darstellung eines Festbettfilters ist Abbildung 10 zu entnehmen.

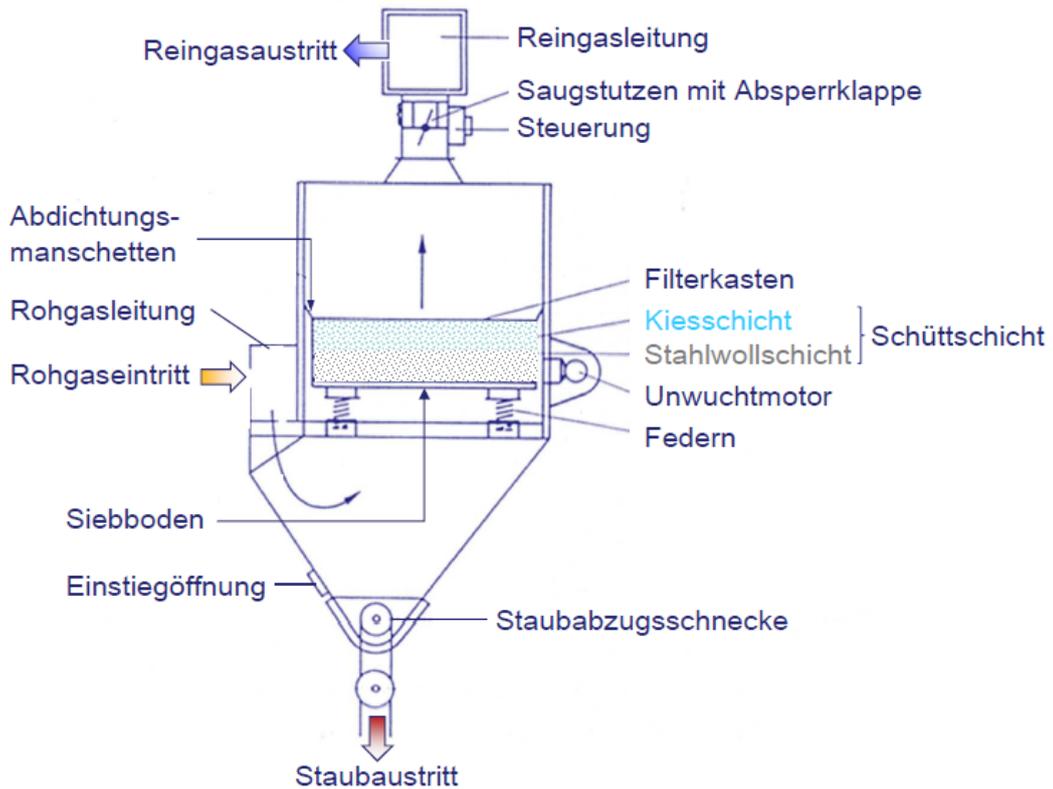


Abbildung 10: Schütttschichtfilter mit Festbett [20]

Bei Schütttschichtfiltern besteht das Filtermedium aus einer Schütttschicht. Diese Schütttschicht kann fest in der Anlage (Abbildung 10) oder beweglich (Abbildung 11) verbaut sein.

Ein Schütttschichtfilter mit bewegter Schütttschicht ist in Abbildung 11 erkennbar.

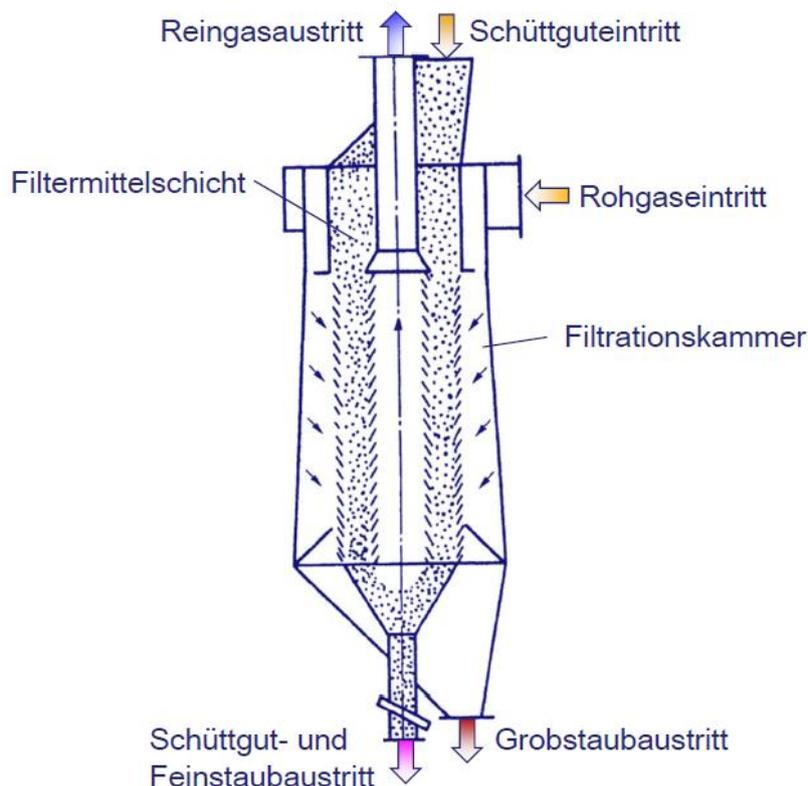


Abbildung 11: kontinuierlich betriebener Schüttschichtfilter

Die Abscheidung erfolgt als Tiefenfiltrationsprozess, durch Adsorption an der Oberfläche des körnigen Filtermaterials.

Abreinigungsfilter

Abreinigungsfilter werden bei höheren Staubkonzentrationen im Rohgas bis ca. 200g/m^3 verwendet. Die Abscheidung erfolgt durch Einlagerung der Partikeln im Filtermittellinneren durch Verstopfung und anschließenden Kuchenaufbau an der Oberfläche des Filtermittels durch den Siebeffekt. Durch die Wirkungsweise des Tiefen- und des Oberflächenfilters kann eine Verbesserung der Abscheidung, unter Zunahme des Druckverlustes erreicht werden. In regelmäßigen Intervallen, wird das Filtermittel regeneriert. Jedoch kann bei dieser Regeneration keine vollständige Regenerierung des Filtermediums erreicht werden, da nie alle abgeschiedenen Partikeln entfernt werden können. Somit nimmt der Restdruckverlust (=Druckverlust unmittelbar nach einer Abreinigung) mit zunehmender Zeit bzw. Zyklusanzahl zu.

Die nach der kurzen Tiefenfiltrationsperiode entstehende Staubschicht erhöht deutlich den Abscheidegrad, jedoch macht der zunehmende Druckverlust ein regelmäßiges Abreinigen des Filtermediums unumgänglich.

Ein Filtrationszyklus beginnend mit der Filtrationsphase, wo der Volumenstrom von außen nach innen geht und anschließender Abreinigungsphase ist in Abbildung 12 dargestellt. Bei dieser Art der Abreinigung (PulsJet) erfolgt der Stromverlauf der partikelfreien Druckluft entgegengesetzt, der des Filtrationsverlaufes, von innen nach außen des Schlauchfilters. Durch die schlagartige Bewegung des Filtermediums beim Umschalten von Abreinigungsphase zur Filtrationsphase können Staubpartikel, die sich im Filtermittel befinden, in Richtung Reingasseite durchgedrückt werden. Das kann zu einer erhöhenden Partikelkonzentration zu Beginn des neuen Filtrationszyklus führen. [21] [20]

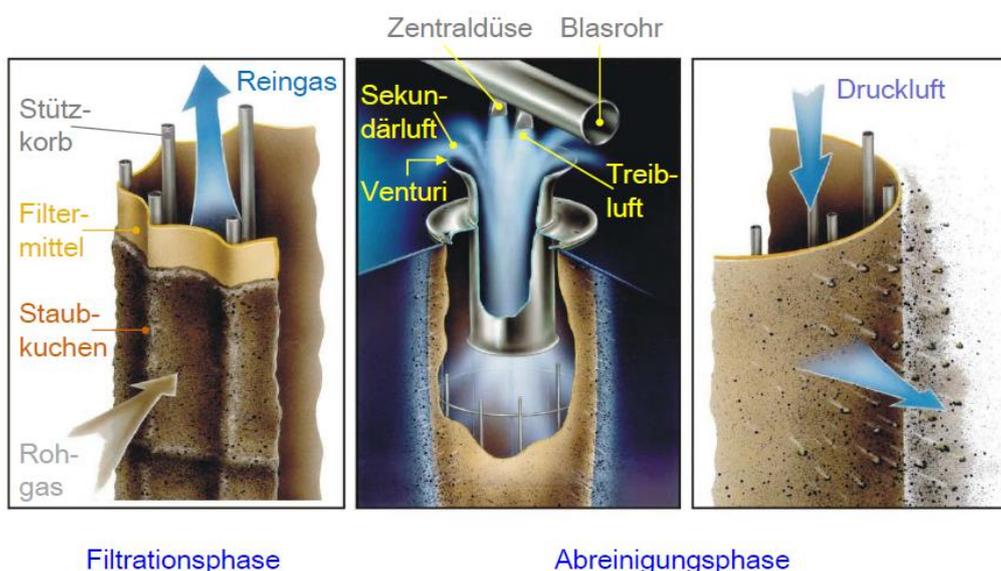


Abbildung 12: Funktionsprinzip des Abreinigungsfilters [20]

Speicherfilter

Speicherfilter werden vorzugsweise für Anwendungen mit geringer Staubkonzentration im Rohgas bzw. einer niedrigen Reingaskonzentration eingesetzt. Sie können aus unterschiedlich dicken Faserschichten aufgebaut sein, die eine sehr große innere Kollektoroberfläche aufweisen. Die Partikel gelangen aufgrund ihrer Trägheitskräfte und ihrer diffusiven Bewegung in das Filtermaterial und verstopfen dort von innen beginnend die Poren des Mediums. Das Prinzip der Abscheidemechanismus des Speicherfilters ist in Abbildung 13 erkennbar.

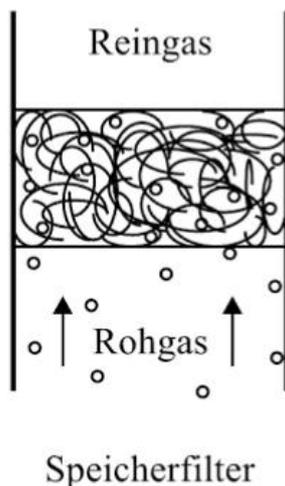


Abbildung 13: Funktionsprinzip des Speicherfilters [22]

Bei Faserspeicherfiltern ist typischer Weise keine Reinigung des Filtermaterials vorgesehen. Deswegen werden diese, bei Erreichen eines bestimmten maximalen Druckverlustes des Filtermediums gegen ein neues getauscht und das alte entsorgt. Anschließend kann der Filter wieder betrieben werden. Speicherfilter werden im Gegensatz zu abreinigbaren Filtern nur diskontinuierlich betrieben.

Das Betriebsverhalten von filternden Abscheidern ist von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig. Der Aufbau der Filteranlage, die Betriebsweise der Anlage, Art und Aufbau des Filtermediums und die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Trägergases sind nur einige Faktoren die sich auf das Betriebsverhalten, den Abscheidegrad und den Druckverlust des Systems auswirken.

Die Vielzahl der unterschiedlichen Einflüsse auf das Betriebsverhalten von filternden Abscheidern ist in Abbildung 14 graphisch festgehalten.

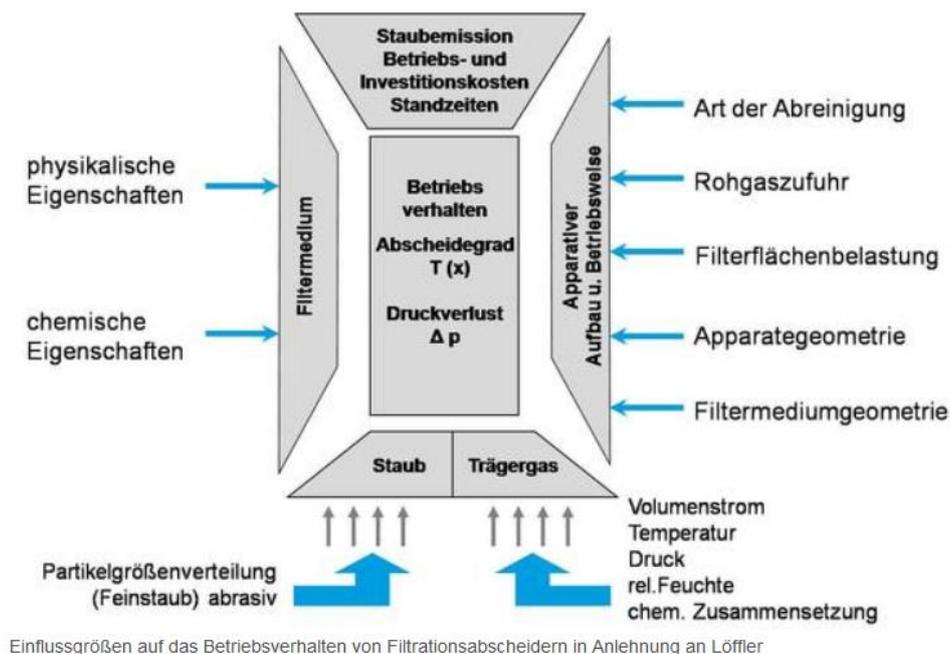


Abbildung 14: Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten von Filtrationsabscheidern. [14]

1.4.4 Nassabscheider

Relativ feine Feststoffpartikeln, im μm Bereich können aus Gasen abgetrennt werden, indem sie an Flüssigkeiten gebunden werden. Diese Flüssigkeit, die sogenannte Waschflüssigkeit, kann im Kreislauf betrieben, regeneriert und mehrmalig verwendet werden. Waschflüssigkeiten können in Tropfenform, in Flüssigkeitsnetzen und in Form einer Flüssigkeitsschicht vorliegen. Es können, abhängig von der Wahl des Waschmittels, nicht nur Feststoffe, sondern auch gasförmige Bestandteile aus dem Rohgas entfernt werden. Die Abtrennung erfolgt durch eine Kombination von Abscheidung und Absorption. Die Nassabscheider sind in der technischen Fachliteratur auch unter dem Begriff Wäscher bekannt. Neben dem klassischen Waschturm, dargestellt in Abbildung 15, gibt es auch Nasszyklone. Zur besseren Abscheidung werden die Waschtürme mit Füllkörpern oder Kolonnenböden versehen, jedoch muss dabei auf die steigende Verstopfungsgefahr geachtet werden. Weiteres muss bei Füllung der Kolonne darauf geachtet werden, dass eine gute Gasdispersion, erfolgen und somit möglichst kleine Bläschen in der Waschlösung, entstehen.

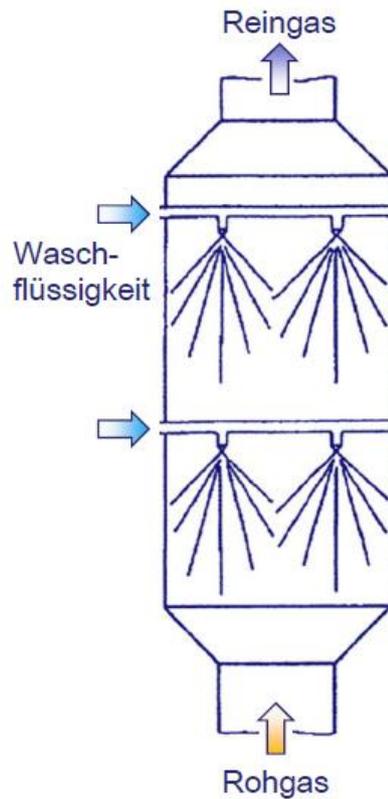


Abbildung 15: typischer Waschturm [20]

Das Rohgas wird in die Anlage eingebracht, die Waschflüssigkeit dispergiert die Partikeln, ähnlich wie Regen, und wäscht diese aus. Die Waschflüssigkeit wird aufgefangen und regeneriert. Wenn es unzureichend nachgeschaltene Tröpfenfänger gibt, kann Waschflüssigkeit im Reingasstrom enthalten sein.

Bei Nassabscheidern sollte auch der Wasserverbrauch, der Druckverlust und der Energieverbrauch beachtet werden. [19] S. 114-115 [20]

1.5 Übersicht Kleinf Feuerungsanlagen

Kleinf Feuerungen sind technische Einrichtungen bis zu einer Brennstoffwärmeeistung von 350 kW, die zum Zwecke der Gewinnung von Nutzwärme für die Raumheizung oder zur Warmwasserbereitung Brennstoffe in einer Feuerstätte verbrennen. [23]

Der Einsatz an Kleinf Feuerungsanlagen ist in unterschiedlichen Motivationen begründet. Einerseits die Gemütlichkeit und die angenehme Wärme die vom Ofen ausgeht, neben der lokalen Ressourcenverwendung aber auch die steigenden Kosten von fossilen Brennstoffen sind Gründe, warum vermehrt auf nachwachsende Rohstoffe wie Holz zurückgegriffen wird. Neben der Ästhetik und der Unabhängigkeit vom Strom und Gas Versorgung der Umweltaspekt des CO₂- Ausstoßes im Vordergrund des Interesses.

Bei Kleinf Feuerungsanlagen werden mehrere Leistungsbereiche bzw. Anwendungen unterschieden:

- Der Kachelofen ist eine massiv gemauerte Anlage mit einer guten Wärmespeicherkapazität von bis zu 24h, mit einer Leistungsabgabe von 1,6-11kW bei einer Speicherkapazität von 12h.
- Ein Warmluftofen der sich gut als Zusatzheizung oder Heizung für Ferienwohnungen eignet. Er besitzt eine Speicherzeit von durchschnittlich 4 h mit einer Leistungsangabe von 4-12kW.
- Der Kachelkamin ist eine Mischung von Kachelofen und Kaminofen, mit einem offenen Kamin. Dieser verfügt über eine durchschnittliche Speicherzeit von 6h. Es sind aber 4-8h mit einer Leistung von 4-8 kW möglich.
- Ein Kombiofen hat eine Speicherzeit von 8h -12h und einer Leistung von 3 bis 10 kW.
- Herde zum Kochen und Heizen von Warmwasser gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Sie besitzen oftmals eine Speicherzeit von 4h, können aber auch 3h - 12h die Wärme halten. Hier ist eine Ofenleistung von 1,5 - 5kW möglich.

[24]

In Europa gibt es laut Schätzungen [25] ca. 26 Millionen Stück Einzelöfen. Hierzu zählen Pelletöfen, Speicheröfen und Kachelöfen die entweder manuell oder automatisch beschickt werden. In Österreich liegt die Gesamtzahl an installierten Einzelöfen bei 238.000 Stück. 2010 wurden 26.100 befeuerte Kaminöfen gekauft. Der Trend der in Österreich verkauften Pelletöfen, Herde und Kaminöfen ist in Abbildung 16 dargestellt.

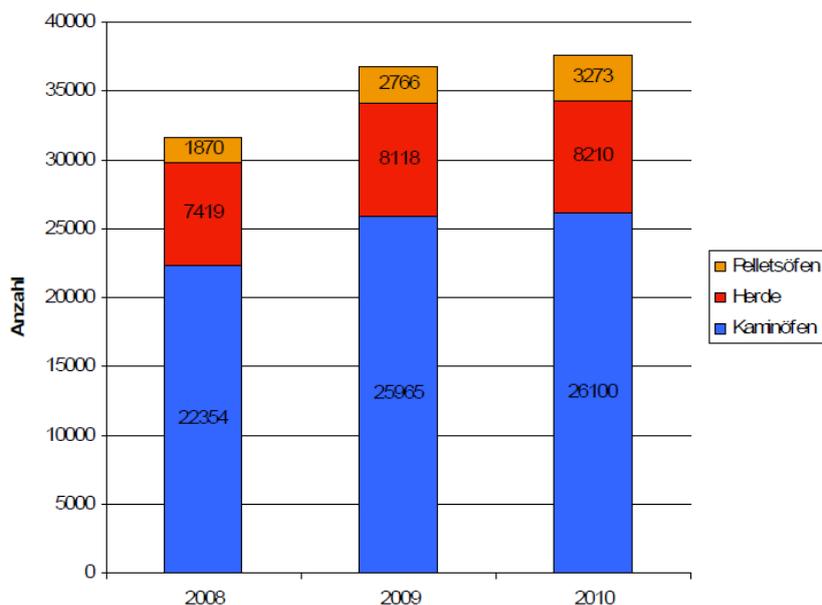


Abbildung 16: In Österreich verkaufte Kaminöfen, Herde und Pelletöfen [25]

Die österreichische Marktentwicklung ist zum Großteil unabhängig von der technologischen Weiterentwicklung von Biomasseheizungen. Einflussfaktoren auf die Marktentwicklung sind neben dem Ölpreis, auch die allgemeine Wirtschaftsentwicklung sowie Subventionen für Heizungssysteme. Es werden in Zukunft die Feuerungssysteme eine technologische Veränderung erfahren, da die zunehmende thermische Qualität der Gebäude einen immer geringer werdenden Wärmebedarf notwendig macht. Damit werden in Zukunft immer mehr sauber werdende Kaminöfen von Nennleistungen von 2 kW bis 4 kW verwendet werden. Die Verkaufszahlen sind derzeit jedoch schwer prognostizierbar.

Im Jahr 2010 wurden 8.131 Pellets Kessel, 6.211 typengeprüfte Stückholzkessel und 4.219 Hackschnitzelkessel in Österreich abgesetzt. Darüber hinaus wurden 3.273

Pelletöfen, 8.210 Herde und 26.100 Kaminöfen mit unterschiedlichen Nennwärmeleistungen betrieben.

[25]

1.5.1 Staubemissionen von Kleinf Feuerungen

In Anwesenheit von Sauerstoff wird in Verbrennungsprozessen chemisch gebundene Energie im Brennmaterial in thermische Energie umgewandelt. Dabei entstehen sowohl feste als auch gasförmige Emissionen. Die Zusammensetzung der Partikeln und deren Größe hängt von den Verbrennungsbedingungen und von den Partikelbildungswegen ab. Die Partikelbildungswege, die in Abbildung 17 dargestellt sind, umfasst den Fest - Partikel - Pfad, der zur Bildung von grobkörniger Asche $<1\mu\text{m}$ führt und den Fest - Dampf - Partikel - Pfad, der zur Bildung von feinkörnigen Partikeln im Bereich von $0,1\ \mu\text{m}$ führt. [26]

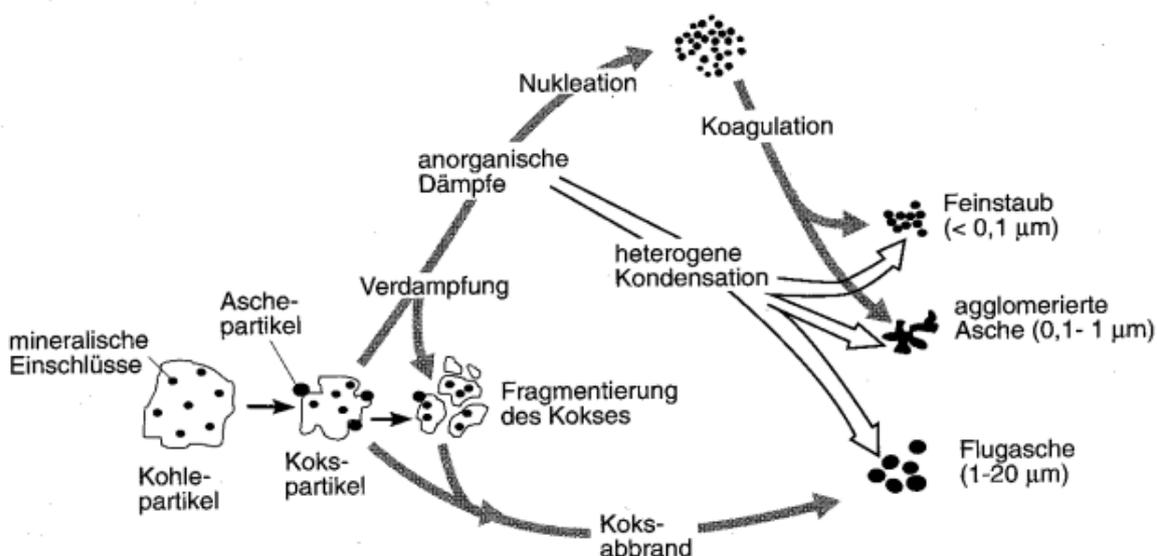


Abbildung 17: Partikelbildung bei der Kohleverbrennung [26]

Die entstehenden Partikelgrößenverteilungen die von einem Holzofen emittiert wurden sind in Abbildung 18 dargestellt. Es ist erkennbar, dass unterschiedliche Betriebsbedingungen des Ofens unterschiedliche Partikelgrößenverteilungen nach sich ziehen, also einen Einfluss auf die Höhe der anfallenden Emissionen haben.

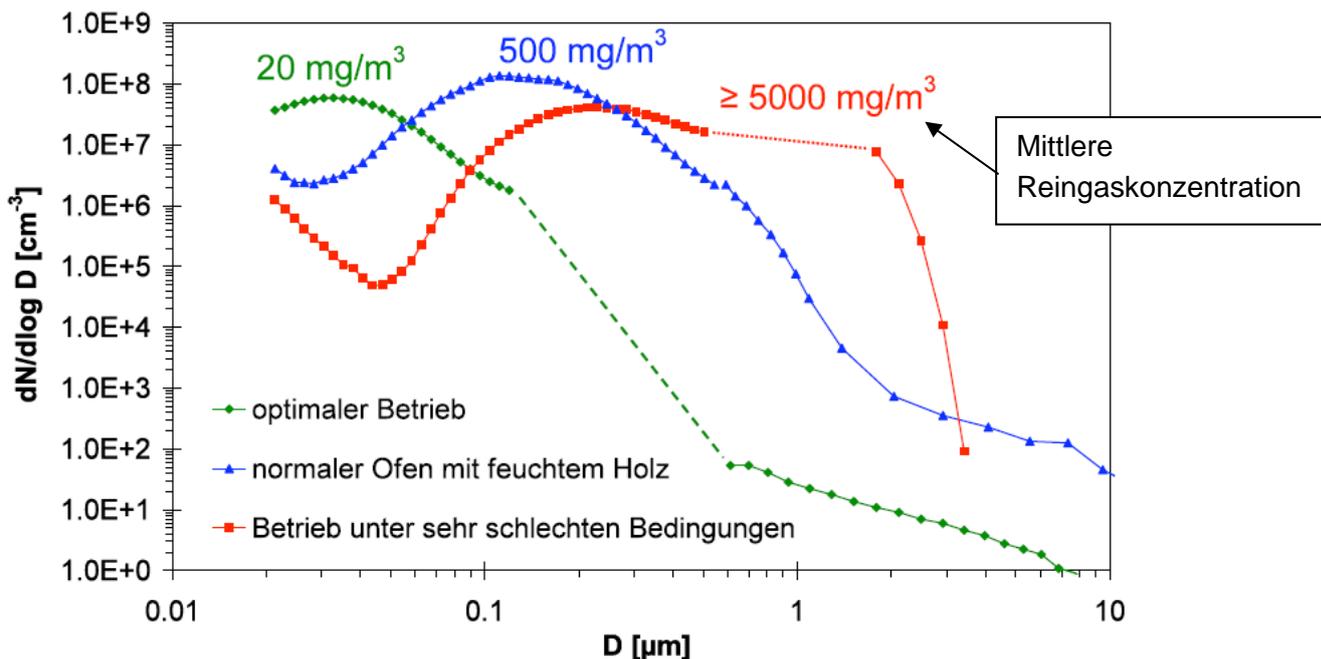


Abbildung 18: Partikelverteilung (Anzahlverteilung) der Staubemission von Holzöfen bei unterschiedlichen Bedingungen (Messungen mit SMPS und OPC) [26]

Die relativen Schadstoffemissionen angegeben in mg Emission pro MJ Brennstoffwärmemenge sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Es ist erkennbar, dass bei Feldmessungen deutlich höherer Emissionswerte erreicht werden als bei Messungen im Prüfstand. Der Unterschied der beiden Messungen wird im Praxisfaktor dargestellt.

Tabelle 7: Relative Schadstoffemissionen aus Typenprüfung und Praxisbetrieb [25]

	Prüfstand	Feldmessung	Praxisfaktor
Staub-Emissionen [mg/MJ]	28 ± 54%	148 ± 46%	5,3
CO-Emissionen [mg/MJ]	703 ± 278%	4463 ± 35%	6,4
OGC-Emissionen [mg/MJ]	46 ± 46%	664 ± 62%	14,4

1.6 Staubabscheider für Kleinf Feuerungsanlagen

Für kleine Leistungsbereiche <30 kW gibt es seit einigen Jahren in Deutschland verschiedene neue Entwicklungen von Entstaubern.

Die 2 wesentlichen Möglichkeiten der in Praxis verwendeten Systeme sind bisher folgende.

Elektroabscheider:

Elektroabscheider werden in der Praxis bei den Kleinf Feuerungsanlagen erst seit kurzem eingesetzt. Prinzipiell werden vor allem 2 unterschiedliche Modelle, Kompaktgeräte mit eingebauter Sprüh- und Niederschlagsselektrode oder Einbaugeräte in Schornsteinen, verwendet. Als Niederschlagsselektrode fungiert die Metallwand der Schornsteine. Diese Geräte sind in der Anschaffung teuer, im Betrieb aber günstig und wartungsarm, nur die Anbackungen im Schornstein müssen in regelmäßigen Abständen entfernt werden. Der Abscheidegrad beträgt zwischen 50 % und 70 %. Der AirJekt der Serie 25,50 der Firma Kutzner und Weber, Abbildung 19, ist eines der am Markt erhältlichen Systeme. [27]



Abbildung 19: Am Markt erhältliches Elektroabscheidersystem [27]

Abbildung 19 zeigt einen in Serie geschalteten Prallabscheider mit Rohrelektroentstauber. Aus der Feuerstätte kommend wird der Abgasstrom durch ein Flüssigkeitsbecken das zur Vorabscheider des Rußes dient gelenkt. Anschließend führt der Partikelbeladene Abgasstrom an dem Rohrelektroabscheider vorbei, dieser

scheidet an der Niederschlagselektrode die Partikeln ab und ein gereinigter Abgasstrom verlässt den Kamin.

Filternde Abscheider:

Die RTWH Aachen hat einen auf Tiefenfiltration basierenden Staubabscheider am Institut für Technologie der Energierohstoffe (TEER) entwickelt. Dieser besteht aus einem Kaminaufsatz, Abbildung 20, der auswechselbare Filtermittel in Taschenform enthält. Das System ist günstig und einfach zum Nachrüsten, da es nur auf den Schornstein aufgesetzt werden muss. Bei steigendem Druckverlust muss das Filtermittel ausgetauscht werden, es gibt aber noch keine sicherern Erfahrungswerte über die notwendige Tauschfrequenz. Der Abscheidegrad liegt bei $> 95\%$ und bei einer Reingasstaubkonzentration von $< 1\text{mg/m}^3$. [28]



Abbildung 20: Kaminaufsatz bei Filtermitteltausch [29]

2 Zielsetzung

Da sich die Emissionsgrenzwerte von Kleinfeuerungsanlagen in den letzten Jahren verschärft haben bzw. hoch verschärft werden, wird in diesem Bereich intensiv geforscht. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Beurteilung von unterschiedlichen Entstaubern, die zur Staubemissionsminderung verwendet werden können.

Jeder Hersteller von Entstaubern macht unterschiedliche Angaben zu Kennwerten. In dieser Arbeit wird die Beurteilung nach dem Normvorschlag der DIN SPEC 33999 verwendet, um so unter definierten Bedingungen Vergleiche ziehen zu können.

In Anlehnung an existierende Normen, im Besonderen an den Normentwurf DIN SPEC 33999, soll ein vorhandener Filtermittel-Prüfstand adaptiert werden. Dieser Prüfstand soll es ermöglichen, unter konstanten Bedingungen unter Laborbedingungen die Fraktionsabscheidegrade und den Druckverlust von verschiedenen Abscheidern bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten aufzunehmen.

Die Funktionsweise des Prüfstandes soll im Anschluss daran anhand von ausgewählten Abscheidern überprüft werden. Getestet werden sollen dazu Abscheider mit unterschiedlichen Funktionsweisen und Settings. Es sollen dabei Elektroabscheider und Faserschichtfilter zum Einsatz kommen, welche bereits für Kleinfeuerungen eingesetzt bzw. entwickelt wurden. Als Faserfiltermaterialien sollen hier Dämmwolle und Glasfaservlies in unterschiedlicher Lagenanzahl (dh. unterschiedlicher Filtermitteldicke) eingesetzt werden. Ein kommerziell erhältlicher Elektroabscheider soll mit unterschiedlichen Elektroden (einer Sägezahnelektrode sowie einer drahtförmigen Wolframelektrode) betrieben werden.

Die Beurteilung der Abscheider soll im Wesentlichen in zwei Prüfsituationen erfolgen: In einer ersten Untersuchung soll mit Hilfe eines Rußgenerators ein nanoskaliges Aerosol erzeugt werden um den Fraktionsabscheidegrad der unbestaubten (neuwertigen) Filtermedien zu bestimmen. Die zweite Untersuchung soll mit einem Ruß-Holzstaub-Aerosol erfolgen. Ein Vergleich aus beiden Untersuchungen soll Aufschluss über eine Änderung von Druckverlust und Abscheidegrad nach einer Einlagerung bzw. Anlagerung von Staub im Inneren oder an der Oberfläche eines Abscheiders liefern.

3 Normentwurf DIN SPEC 33999 zur Beurteilung von Abscheidersystemen für Kleinf Feuerungsanlagen

Der Normentwurf DIN SPEC 33999:2014-12 stellt für diese Arbeit die wesentliche Grundlage zum Aufbau und Betrieb eines Prüfstandes für die Beurteilung von Abscheidern für Kleinf Feuerungsanlagen dar. Es sei hier vermerkt, dass dieser Normentwurf aus 2014 sich derzeit noch in Überarbeitung befindet und voraussichtlich in den nächsten Jahren als nationale Norm (Deutschland) veröffentlicht wird.

Da die thermische Nutzung von erneuerbaren Brennstoffen als CO₂ neutral betrachtet werden kann, ist deren Einsatz als Brennmaterial im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen optimal. Leider ist die Verbrennung meist nicht vollständig, sodass eine erhöhte Konzentration von Ruß, Teer, Flugasche, Kohlenwasserstoffen und CO ausgestoßen wird. Diese Emissionen werden über die Abgasrohre und den Kamin in die Umgebung gelangen und zu Geruchsbelästigungen und Gesundheitsschädigungen, wie in Kapitel 1.2 näher beschrieben, führen.

Um die Luftsituation in Deutschland zu verbessern wurde die 1 BImSchV entwickelt und 2010 verschärft. Da es aber nicht möglich ist den Verbrennungsprozess feuerseitig effizienter zu gestalten, ist es nach 1 BImSchV nötig Partikelabscheider nachzurüsten. Bestehende Anlagen werden zeitlich gestaffelt nachrüsten müssen.

Da aber der Abscheidegrad von unterschiedlichen Parametern abhängt, wurde die DIN SPEC 33999 Emissionsminderung - Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1. BImSchV) - Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen, basierend auf unterschiedlichen VDI Richtlinien und DIN Normen, entwickelt. Einige für diese Arbeit relevante zugrundeliegende Normen sind der Abbildung 21 zu entnehmen.

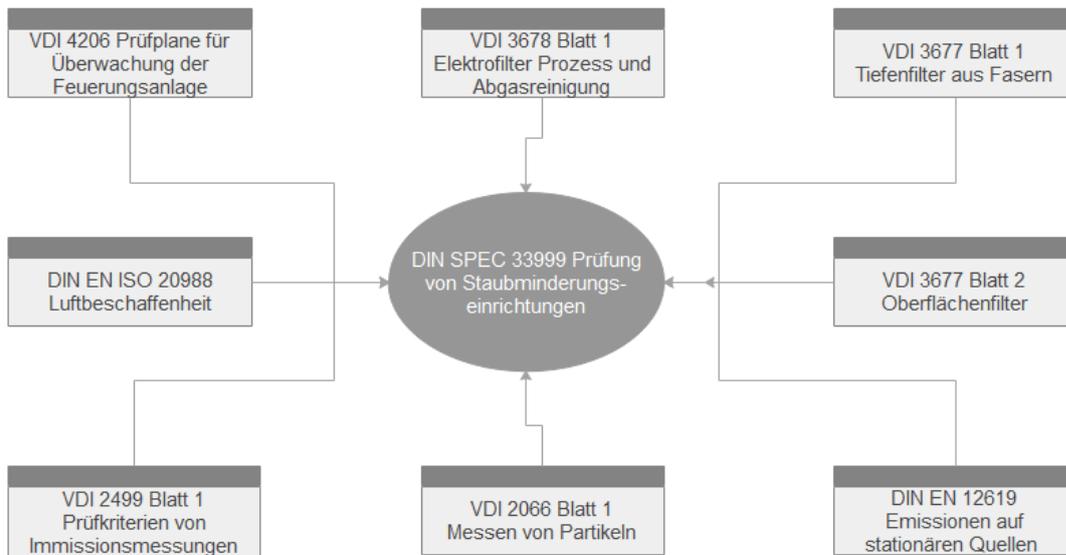
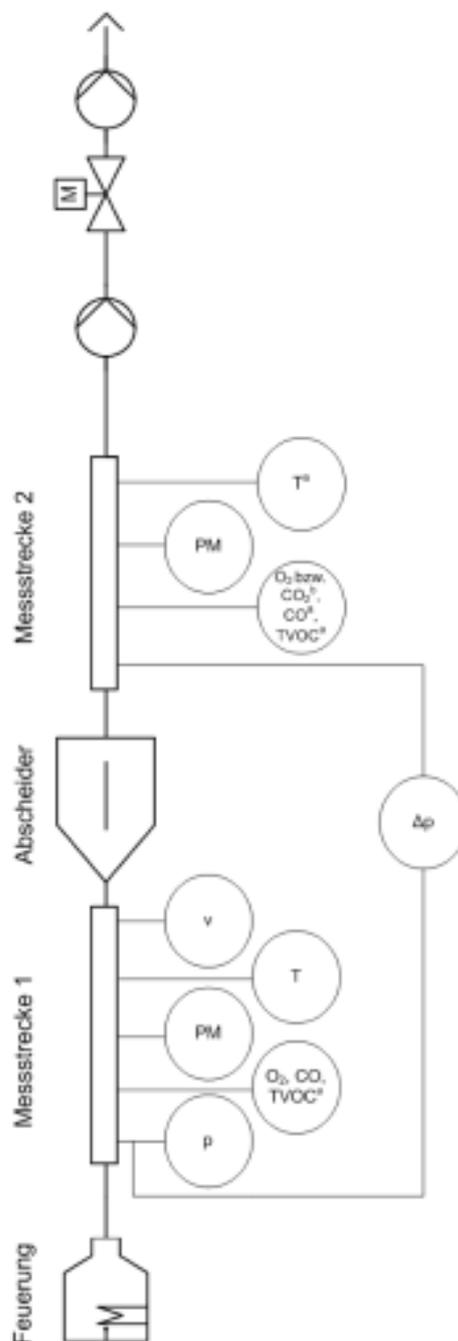


Abbildung 21: Einige Richtlinien und Normen der DIN SPEC 33999

Ein schematischer Prüfstandaufbau für handbeschickte Einzelraumfeuerungen ohne eigenes Gebläse ist in nachstehender Abbildung 22 dargestellt.



Legende

PM Staubmasse

p Druck gegenüber Umgebung

Δp Druckdifferenz über den Abscheider

T Temperatur

v Abgasgeschwindigkeit

CO Kohlenstoffmonoxid

CO₂ Kohlenstoffdioxid

TVOC Flüchtige Kohlenwasserstoffe
(en: Total Volatile Organic Carbon)

Abbildung 22: Beispiel für den Prüfaufbau an Staubabscheidern an handbeschickten Einzelraumfeuerungen ohne eigenes Gebläse [30]

Der Messstandaufbau gliedert sich, wie in Abbildung 22 erkennbar, in 4 Bereiche. Diese bestehen aus der Feuerung, der Messstrecke 1, dem Abscheider und der Messstrecke 2.

Als Testaerosolquelle kann eine automatische bzw. handbeschickte Kleinf Feuerungsanlage verwendet werden. Bedingt durch das unterschiedliche Abbrandverhalten werden hinsichtlich der Ablufführung einige kleinere Änderungen zwischen beiden Feuerungsanlagen im Normentwurf vorgesehen. Der grundsätzliche Messaufbau bleibt jedoch bestehen.

Der, entsprechend den Angaben des Herstellers, mittig zwischen den Messstrecken 1 und 2 installierte Abscheider, soll gasdicht mit den Messstrecken verbunden sein. Messstrecke 1 stellt die Rohgasseite und Messstrecke 2 stellt die Reingasseite dar, da das Rohgas (staubbeladene Gasstrom) dem Abscheider zugeführt wird, und der Reingasstrom aus dem Abscheider austritt.

Beide Messstrecken beinhalten Staubmessungen, welche gravimetrisch erfolgen um den Gesamtabscheidegrad zu bestimmen. Es sind auch Druckmessstellen roh- und reingasseitig gefordert, sodass eine Differenzdruckmessung zur Bestimmung des Druckverlustes im Abscheider möglich ist. Weiteres sollen die Gaszusammensetzung und die Temperatur auf beiden Seiten des Abscheiders gemessen werden. Die Abgasgeschwindigkeit aus der Feuerungsanlage wird laut Vornorm [30] ebenfalls bestimmt. Der Abgasstrom wird nach der Messstrecke 2, als Reingas durch Pumpen und ein Ventil in die Umgebung geleitet.

Bei Verwendung eines elektrostatischen Abscheiders, muss darauf geachtet werden, dass, wenn dieser am Schornsteinende angebracht wird, der Abscheidegrad nicht durch die Verlängerung der Rohgasstrecke zu Gunsten dieses Abscheiders ausfällt. Dies kann ausgeschlossen werden wenn 80% des Elektroabscheiders durch Umbau in das Abgasrohr hineinverlagert werden. Damit entsteht keine Änderung des Abscheidegrades bei erneuter Messung.

Es muss somit für den Vergleich von Abscheidern untereinander darauf geachtet werden, dass die unterschiedlichen Aufbauten (zB. durch die Länge der Messstrecken) den Abscheidegrad nicht wesentlich beeinflussen.

Um einen Anhaltspunkt für die entstehende Abgasmenge für Kleinfeuerungsanlagen zu bekommen, kann eine Abgasmengenberechnung durchgeführt werden. Diese ergibt für eine Kleinfeuerungsanlage mit 15kW bei einer Abgastemperatur von 140°C einen Volumenstrom von ca. 425 L/min, das ca. 25,5 m³/h entspricht. [28]

Die Dimensionierung von Rohrdurchmesser, Gebläse und anderer Anlagenteile ist auf die jeweilige Auswahl der Feuerungsanlage sowie den zu testenden Abscheider (ua. auf unterschiedliche Druckverlustniveaus) abzustimmen bzw. auf die gegebenenfalls zeitlich sich ändernden Betriebsparameter anzupassen.

Gemäß den Erkenntnissen ersten Untersuchungen mit einem handbeschickten Ofen an einem solchen Prüfstand, sinkt die Aussagekraft hinsichtlich Druckverlust und Abscheidegrad mit der zeitlichen Änderung von Temperatur, Druckverlust und Abgaszusammensetzung bzw. ist teilweise nicht möglich. Eine stationäres Abbrandverhalten, dh. eine automatische Beschickung, wäre für eine funktionsbedingte Norm unabdingbar. [31]

Diesen Erkenntnissen folgend, wird in dieser Arbeit beim Aufbau eines Prüfstandes der Fokus auf eine zeitlich konstante Aerosolquelle und konstanten Volumenstrom unter Laborbedingungen (dh. Temperatur und Feuchtigkeit) geachtet. Ein Vergleich unter definierten Bedingungen im Labor erlaubt darüber hinaus eine größere Parametervariation (zB. Volumenstrom) und somit kann die Aussagekraft hinsichtlich möglicher Einsatzbereiche eines Abscheiders, vor allem für unterschiedliche Leistungsbereiche einer Kleinfeuerungsanlage, in kürzere Zeit und mit weniger Materialaufwand erzielt werden.

4 Aufbau und Komponenten des Prüfstandes

Um einen Prüfstand aufzubauen, sodass mit diesem unterschiedliche Abscheider für Kleinfeuerungsanlagen bestmöglich gemäß DIN SPEC 33999 getestet werden können, wurde für diese Arbeit ein Filterprüfstand für abreinigbare Filtermedien (VDI 3926 Typ 2) umgebaut und angepasst.

Der Prüfstand soll es ermöglichen, die wesentlichen filtrationsspezifischen Parameter (Druckverlust und Abscheidegrad) einzelnen Abscheider unter konstanten Betriebsbedingungen (vor allem Betriebsvolumenstrom, Temperatur, Ruß- und Staubmenge) zu bestimmen.

Prinzipiell ist der Prüfstand, aus einem Rohrsystem mit 150 mm Durchmesser aufgebaut. Die Rohrteile, bestehen aus farblosen Plexiglasrohren, Stahlblech und Aluminium.

Folgende Messinstrumente werden zusätzlich zu dem Rohrsystem im Prüfstand verwendet:

- Staubdosierer für die künstliche Filtermittelalterung
- Rußgenerator
- Scanning Mobility Particle Sizer zur Bestimmung der roh- und reingasseitigen Partikelgrößenverteilungen und Partikelkonzentrationen
- Drucksensoren vor und nach dem Abscheider
- Volumstrommessung bzw. Regeleinheit für das Saugzuggebläse

Der Prüfstand, bzw. seine Komponenten, wurde, wie in Abbildung 23 schematisch dargestellt wird, aufgebaut.

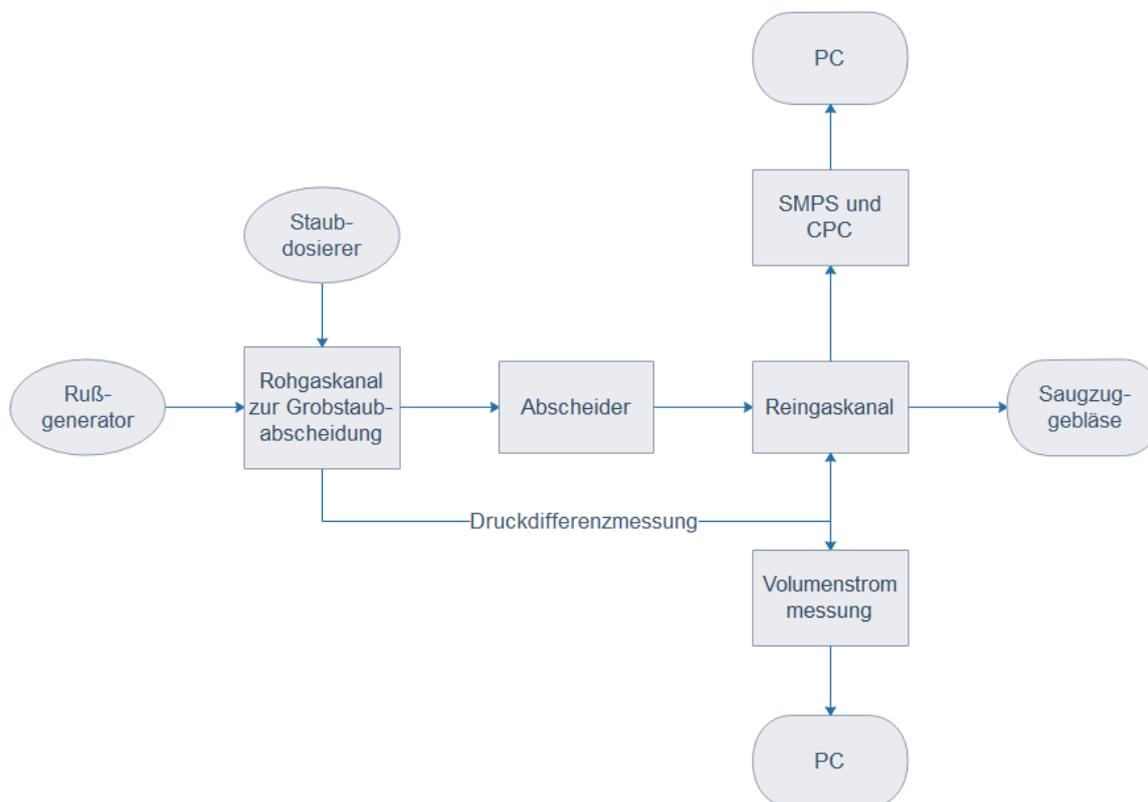


Abbildung 23: Schematischer Aufbau des verwendeten Filtermittelprüfstandes

Der Roh- und Reingaskanal sind mit der in der Norm vorgesehenen Messstrecke 1 und Messstrecke 2 gleichzusetzen. Dazwischen wird der Abscheider (je nach Aufbau mit Halterungen und Übergangsstücken) eingebaut. Über eine um den Rohrumfang angebrachte roh- und reingasseitige Ringleitung wird der Differenzdruck über dem Abscheider gemessen.

Reingasseitig befindet sich eine Probenahmestelle, die mittels Schlauchsystem einen Teilvolumenstrom zum SMPS leitet, um die Partikelgrößenverteilung und Partikelgrößenkonzentration zu bestimmen. Ein Gebläse mit zugehöriger Volumenstrommessung (mittels Hitzdraht Anemometer) und Regelung sorgt für einen konstanten Volumenstrom durch die Anlage. Der Aufbau des Prüfstandes gleicht somit im Wesentlichen dem Normentwurf DIN SPEC 31999.

Abbildung 24 zeigt ein Foto des realisierten Prüfstandes.

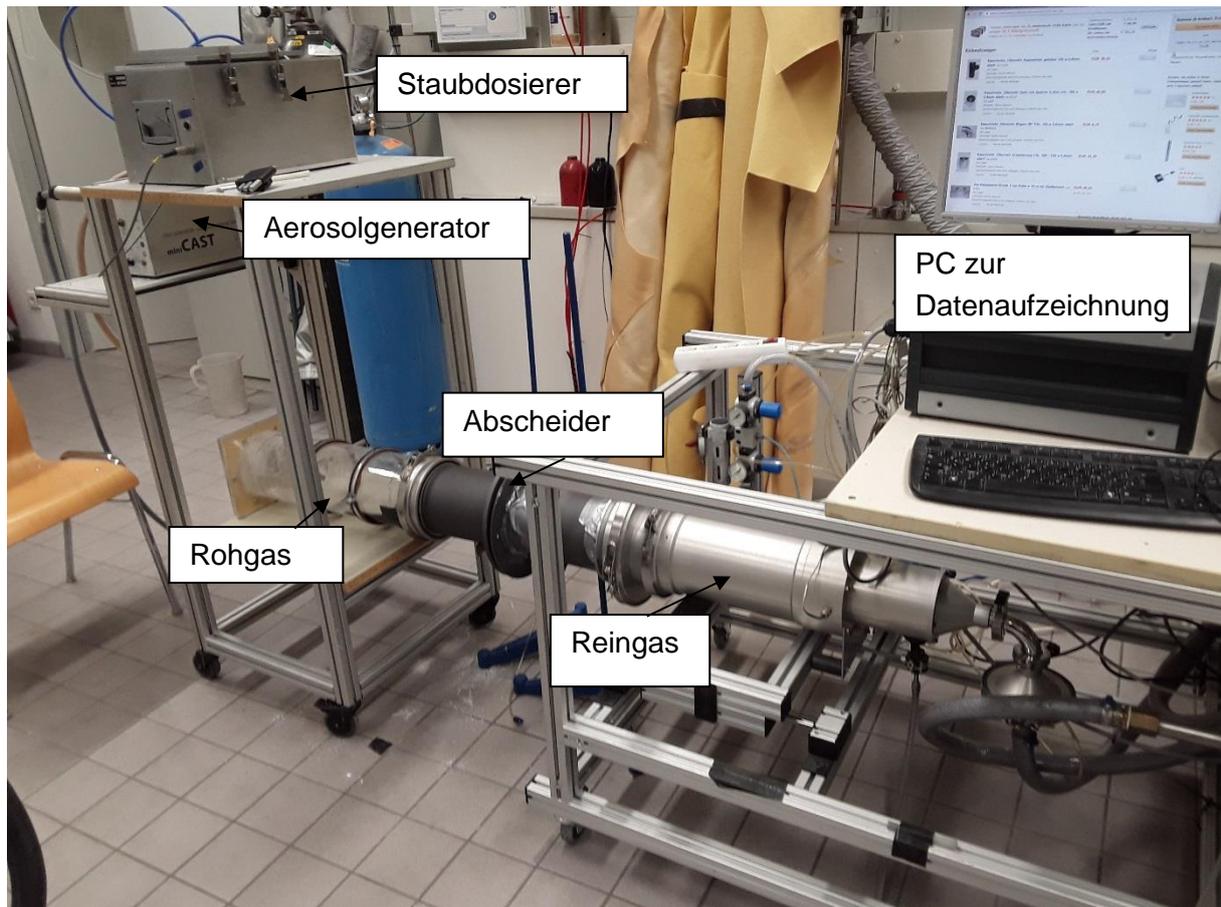


Abbildung 24: Foto des aufgebauten Prüfstandes

4.1 Messtechnik

4.1.1 Druckmessung

Die Druckmessung erfolgte durch Differenzdruckmessung vor und nach dem Abscheider. Durch den Differenzdruck wird der Druckverlust des Abscheiders bestimmt. Durch den Anstieg aus den Verlauf des Druckverlustes während der Messung können die Einlagerung und Verstopfung im Zuge einer zB. Tiefenfiltration und der Aufbau eines Filterkuchens erkannt werden. Weiteres ist der entstehende Druckverlust wichtig, um bei der Auswertung den Qualityfaktor und den Gesamtabscheidegrad berechnen zu können.

4.1.2 Scanning Mobile Particle Sizer

Das SMPS (TSI, 3080) ist ein Messgerät zur Messung von luftgetragenen Partikeln. Mit einem SMPS kann die Partikelanzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung bestimmt werden, ohne jedoch Auskunft über die Form der gemessenen Partikel zu erhalten. Das SMPS erlaubt die Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen in Größenbereichen von 2 nm bis 1 mm. Dieses Messgerät besteht im Wesentlichen aus 3 Teilen: Der Aerosolneutralisator, der differentielle Mobilitätsanalysator (DMA) und der Kondensationskernzähler.

In einem Differential Mobility Analyzer (DMA) wird ein elektrisches Feld aufgebaut, das die luftgetragenen Partikel nach ihrer elektrischen Mobilität klassiert. Der Partikeldurchmesser, der mit dieser Messmethode erhalten wird, wird als Mobilitätsäquivalenz-Durchmesser bezeichnet. Dem DMA vorgeschaltet ist ein Aerosolneutralisator. Im Aerosolneutralisator (Beta-Strahlenquelle Krypton-85) kommen durch diffuse Bewegung die Aerosolpartikel mit positiven und negativen geladenen Ionen in Kontakt, um so eine einheitliche Ladung der Aerosole, durch bipolare Diffusionsaufladung, zu erhalten.

Dabei wird der Probestrom, der aus dem luftförmigen Trägergas und den Aerosolen besteht, an der ^{85}Kr -quelle vorbeigeführt. Die Luftführung des Differentiellen Mobilitätsanalysators und dessen Aufbau ist in Abbildung 25 dargestellt.

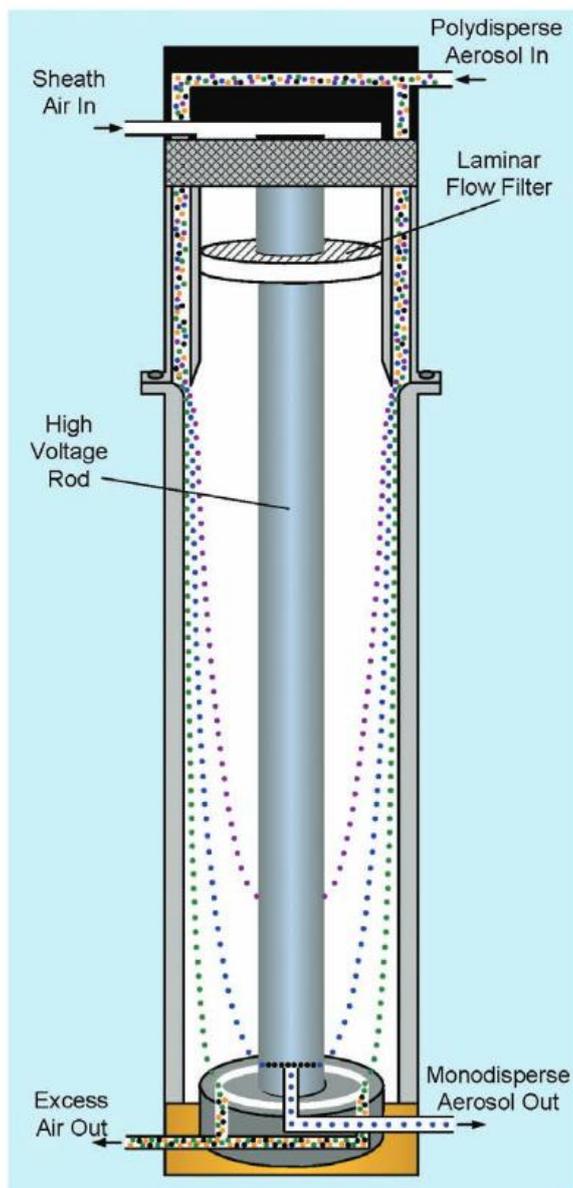


Abbildung 25: Elektroklassierer des differentiellen Mobilitätsanalysators [32]

Am spaltförmigen Ausgang des Mobilitätsanalysators ist ein Kondensationskernzähler angebracht, um die Konzentration des monodispersen Aerosols zu bestimmen. Durch zeitliche Variation der Spannung des elektrischen Feldes im Klassierer (DMA) werden hintereinander die einzelnen unterschiedlichen monodispersen Partikelgrößen im Kondensationskernzähler gezählt, umso eine Partikelgrößenverteilung zu erhalten.

Die eigentliche Partikelkonzentrationsbestimmung erfolgt durch Streulichtmessung, nachdem die Größe der nanoskaligen Partikel durch Kondensation eines übersättigten Butanoldampfes so weit vergrößert wurde, dass sie einzeln detektierbar und zählbar

sind. Dieses Resultat des Messsignals wird dann am PC ausgegeben. Der komplette Aufbau aller drei Komponenten des SMPS ist in Abbildung 26 dargestellt. [32] [33]

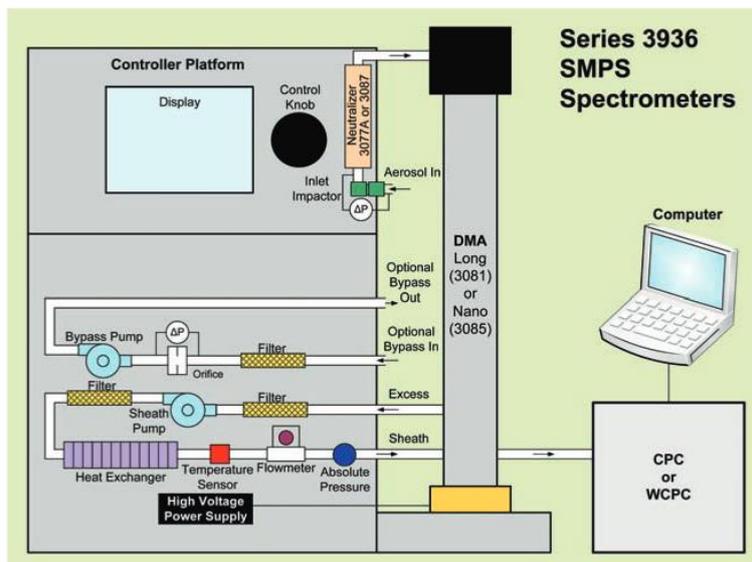


Abbildung 26: Aufbau eines Scanning mobility particle sizers [32]

4.1.3 Rußgenerator

Der verwendete Rußgenerator ist der miniCast Soot Generator MOD 5210C der Firma Jing LTE. Das Kernstück des Generators – ein Brennkopf, ist in Abbildung 27 dargestellt.

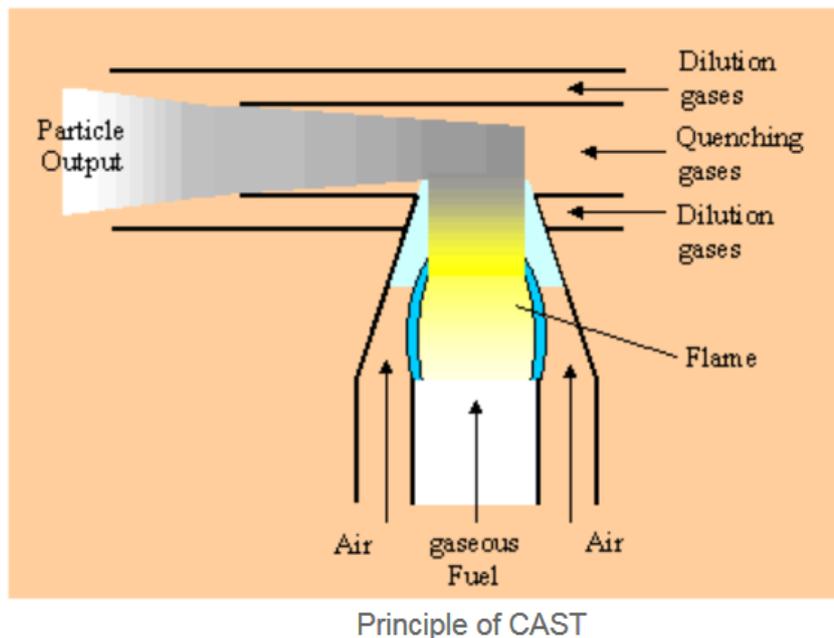


Abbildung 27: Prinzip des CAST-Brenners [34]

Der Brenner formt eine Flamme, die den verwendeten Kohlenwasserstoff - in diesem Fall Propangas, an der heißesten Flammenstelle pyrolysiert. Dieses Bauteil ermöglicht einen Ausstoß von Rußpartikeln aus der Diffusionsflamme, ohne mit Sauerstoff in Berührung zu kommen. Anschließend werden die so durch unvollständige Verbrennung entstandenen Aerosole dem Quenchgas (Stickstoff), beigemischt, um die entstandenen Rußpartikel zu stabilisieren. Um einen Partikelmassenstrom zu erreichen, wird mit Druckluft das nanoskalige Aerosol ausgeblasen. Dieser Partikelmassenstrom wird so direkt in die Prüfapparatur mittels Kunststoffschlauch geleitet. [34]

Die künstliche Herstellung des Testrußes, soll die Vergleichbarkeit der Partikelabscheider, aufgrund der reproduzierbaren Partikelmengen und Partikelgrößenverteilungen gewährleisten. Der Generator kann nach Angaben des Herstellers Partikelgrößen von 20 bis 200nm mit einer Konzentration von 10^8 Partikeln/cm³ generieren und somit liegt das hier bereitgestellte Aerosol im ähnlichen Größenordnungsbereich eines Abgases einer Kleinf Feuerungsanlage. [28]

4.1.4 Staubgenerator

Der verwendete Staubgenerator ist ein Bürstendosierer (NDF 100-BD von der Firma FilTEq GmbH (siehe Abbildung 28)) mit abgeschlossenem Staubvorratsbunker. Dieser Staubgenerator fördert laut Angaben des Herstellers maximal 500g/h.

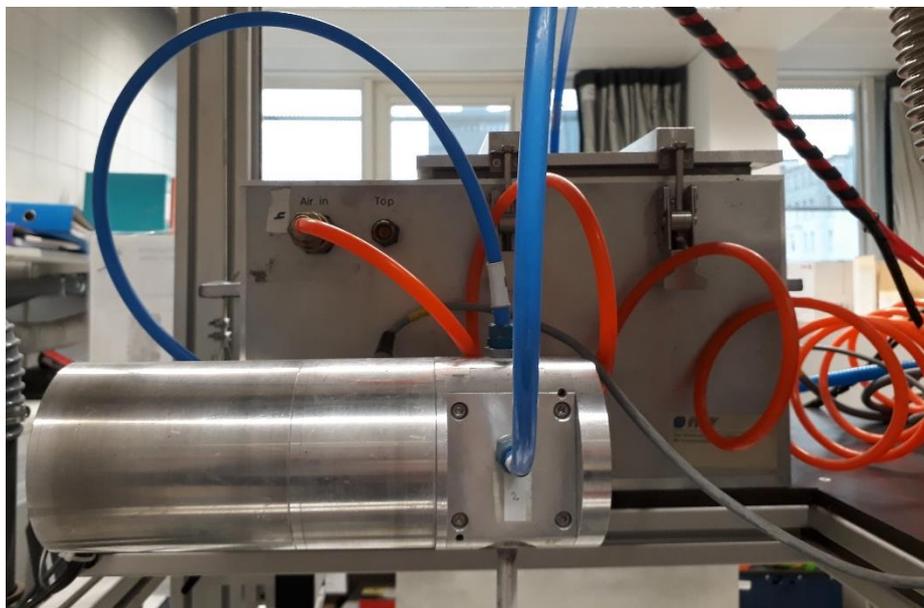


Abbildung 28: Staubdosierer

Hierbei wird der Staub, in einem Staubvorratsbunker vorgelegt, mittels Förderschnecke zu einer schnell rotierenden Bürste befördert. Tangential zur Bürste wird Druckluft eingeblasen um ein Staubaerosol zu erhalten. Dieses wird dann in den Rohgaskanal des Prüfstandes eingeleitet.

Der Staubdosierer wird mit einem Dosier- und Suspensionsdruck von 1,8 bar mit einer Austragzeit von 3 Minuten kalibriert. Dabei wurde der in 3 Minuten mit der Förderschnecke heraustransportierte Staub mit einem Becherglas aufgefangen und gewogen.

Die erhaltenen Messwerte sind in Tabelle 8 und die dargestellte Kalibrationsgerade inklusive Bestimmungsmaß in Abbildung 29 ersichtlich.

Tabelle 8: Messwerte der Kalibrationsgeraden

Potentiometereinstellung der Förderschnecke		Tara leer g	Tara mit Staub g	Staubmenge g
Stufe	Versorgungsspannung Volt			
10	4,84	164,12	171,24	7,12
8	3,9	171,24	176,73	5,49
6	3,06	176,73	180,91	4,18
4	2,12	180,91	183,74	2,83
2	1,09	183,74	185,2	1,46

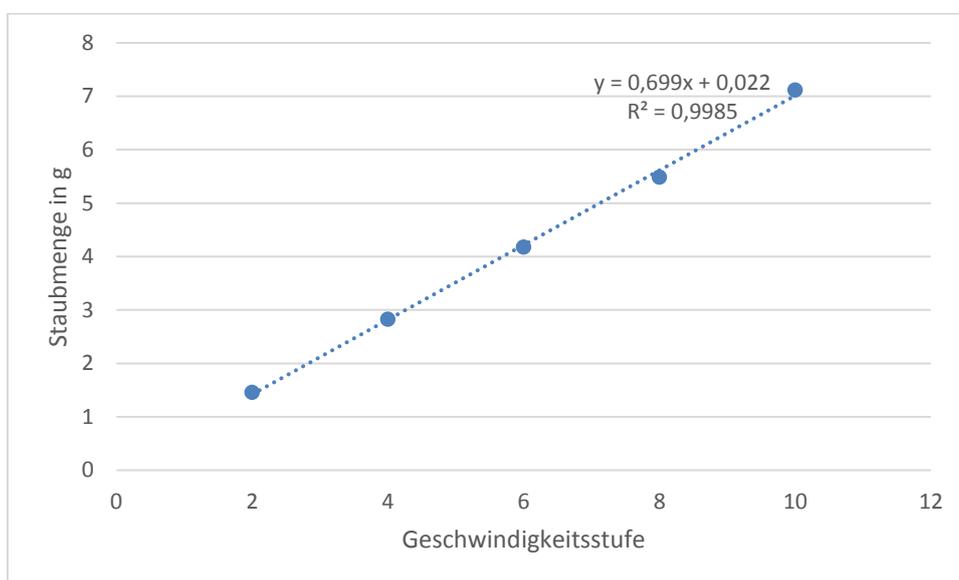


Abbildung 29: Kalibrationsgerade inkl. Bestimmungsmaß des Staubdosierers

4.2 Untersuchte Abscheider

4.2.1 Filternde Abscheider

Filternde Abscheider für Kleinfeuerungsanlagen (Abbildung 20) bestehen in der Regel aus Filtermaterial mit vorwiegend Tiefenfiltrationseigenschaften. In einigen Untersuchungen wurden bereits Naturfasern und mineralische Fasern getestet, wobei die Naturfasern aufgrund der teilweisen hohen Temperaturen im Rauchgas sehr unbeständiges Verhalten zeigten [35].

Um unterschiedliches Filtermaterial im Prüfstand untersuchen zu können wurde ein runder Filtermittelhalter (frei durchströmbare Filterfläche 177cm²) gefertigt. In Abbildung 30 ist der Filtermittelhalter, bestehend aus 2 identen Rohrformteilen

ersichtlich. Das runde flache Filtermittel wird zwischen den beiden Flanschenden eingespannt und mit Schrauben fixiert. Anschließend werden die Flasche zusätzlich mit einem flexiblen Klebeband über den gesamten Umfang abgedichtet, um Leckagen zu vermeiden.



Abbildung 30: Filtermittelhalter zur Aufnahme einer 150 mm im Durchmesser bestehenden Filtermittelrunde

In dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Filtermaterialien eingesetzt: ein Glasfaservlies und ein mineralischer Dämmstoff.

Das Glasfaservlies, mit der Bezeichnung „Viledon“ des Herstellers Filtration Technologies SE & Co. KG ist eine Hochtemperaturfiltermatte des Typ LH 243. Die Filtermatte besteht aus homogenen feinen Glasfasern, die nach Prüfnorm EN 779 getestet wurden. Die technischen Daten dieser Filtermatte sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Technische Daten des Glasfaservlieses [36]

Filterklasse gemäß DIN EN 779	M5
Nennvolumenstrom	2.200 m ³ /h
Anfangsdruckdifferenz	125 Pa
Mittlerer Wirkungsgrad	46 %
Mittlerer Abscheidegrad	97 %
Empfohlene Enddruckdifferenz	250 Pa
Dicke	30 mm

Temperaturbeständigkeit	200 °C
Feuchtebeständigkeit (rel. F.)	100 %
Brandklasse gemäß DIN 53 438	F1

Der mineralische Dämmstoff, in Form einer flachen homogenen Dämmmatte, der Firma Isover Saint-Gobain, trägt die Bezeichnung „Ultimate Trennwand Platte 040“. Da dieses Material kein Filtermaterial im herkömmlichen Sinn ist (hauptsächlich wird es zur Dämmung von Innenraumbauten verwendet), besitzt es keine Filterklasse. Die technischen Daten sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Technische Daten des Isover Dämmmaterials [37]

Schmelzpunkt	>1000°C
Temperaturverhalten	Verwendung bis 150 °C
Strömungswiderstand	≥ 5 kPa s/m ²
Brandklasse gemäß Norm 4102	F 30-A
Euroklasse	A1 nicht brennbar
Dicke	40 mm

Um einen für Kleinf Feuerungsanlagen hinreichend großen Abscheidegrad zu erreichen, werden unter Umständen ein- oder mehrlagige Filterschichten notwendig sein. Mit zunehmender Anzahl der Filterschichten werden der Druckverlust und auch der Abscheidegrad zunehmen. Wie sich beide filtrationsspezifischen Parameter mit der Filterlagenanzahl ändern, soll durch eine Kombination von 1 bis 5 Filterlagen untersucht werden.

4.2.2 Elektroabscheider

Zur Untersuchung eines typischen Vertreters von Elektroabscheidern für Kleinf Feuerungsanlagen wurde ein Elektroabscheider der Firma Zumikron des Typ AirJet 1 ausgewählt. Der Aufbau des Elektroabscheiders ist in Abbildung 31 zu sehen. Die technischen Daten sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

Tabelle 11: Technische Daten des AirJet 1 [38]

Werkstoff	Edelstahl V4A
Leistungsaufnahme	30 W

Standby	2 W
Hochspannung	bis 18 kV modulierend
Versorgungsspannung	230 VAC
Abscheidegrad	>50%
Durchmesser Abgassystem	130 – 300 mm

Der Einbau des Elektroabscheiders ist einfach, da dieser nur in das Ofenrohr mittels T-förmigen Adapters eingebracht und festgeschraubt wird. Wichtig ist zu beachten, dass die Sprühelektrode mittig, also zentrisch im Stahlofenrohr ausgerichtet ist. Neben dem Einbau, und einer Erdung ist eine gewöhnliche Spannungsversorgung mit 230 Volt nötig. Für den Einbau dieses Elektroabscheiders in eine bestehende Heizungsanlage ist fast kein Umbau der Abluftführung notwendig, was sich positiv auf die Kosten der Nachrüstung auswirkt.

Der Elektroabscheider kann mit 2 unterschiedlichen Sprühelektroden bestückt werden. Einerseits kam eine flache Sägezahnelektrode, Abbildung 33, als auch eine drahtförmige Wolframelektrode, Abbildung 32, zum Einsatz. Beide Elektroden, die die Sprühkathode darstellen, wurden zentrisch im Ofenrohr angebracht, um so einen gleichmäßigen Feldaufbau und zu einer gleichmäßigen Ionisierung der Partikeln zu gelangen.



Abbildung 31: Eingebauter Elektroabscheider am Prüfstand



Abbildung 32: Elektroabscheider mit Wolframelektrode



Abbildung 33: Detailansicht der Sägezahnelektrode

4.3 Testaerosole

4.3.1 Ruß

Zur Bestimmung des Abscheidegrades der untersuchten Abscheider wurde ein Ruß-Aerosol verwendet (siehe auch Kapitel 4.1.3). Das mittels Rußgenerators erzeugte nanoskalige Aerosol wurde in Anlehnung an typische Rauchgaspartikelgrößenverteilungen einer Kleinfeuerungsanlage (Abbildung 17) auf einen Partikelgrößenbereich von 10-300 nm eingestellt. Nachstehend ist in Abbildung 34 für eine typische Rohgasmessung die Anzahlverteilungsdichte dargestellt.

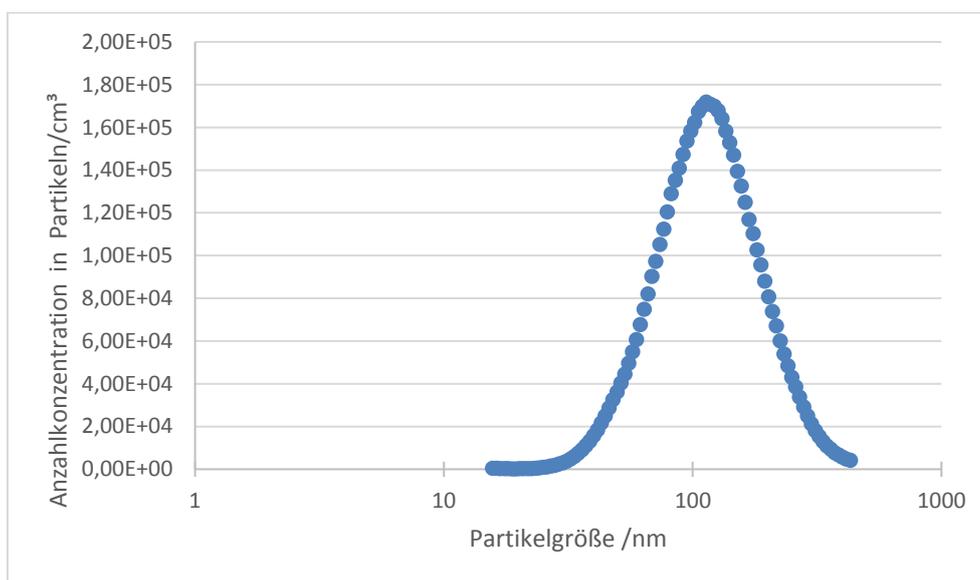


Abbildung 34: Typische Partikelgrößenverteilung des Rußes gemessen mit dem SMPS

4.3.2 Mischung Ruß und Holzasche als disperser Anteil im Trägergas

Der Rußgenerator erzeugt ein sehr feines, eng verteiltes nanoskaliges Aerosol (siehe Abbildung 34). Wie man jedoch aus verschiedenen Messungen an Kleinfeuerungen weiß, kann die Partikelgrößenverteilung sehr breit sein (Abbildung 18). Um auch am Prüfstand ein Testaerosol mit breiter Partikelgrößenverteilung nachbilden zu können, wurde eine Aerosolmischung bestehend aus Rußaerosol und Holzascheaerosol erzeugt. Dieses wird mittels zweier Aerosolgeneratoren (Rußgenerator und Staubgenerator), welche gemeinsam in den Rohgaskanal dosieren, ermöglicht.

Die verwendete Holzasche ist ein Asche-Rückstand einer handbeschickten Holzfeuerung (Mischung verschiedener Holzarten). Die Holzasche wurde, bevor sie im

Staubgenerator eingefüllt wurde, von groben Material befreit werden. Dazu wurde, die Holzasche, die noch Grobpartikeln von unverbrannten Holzstücken bis zu 2 cm enthielt, mit dem Siebturm gesiebt. Nur die Partikelfraktion kleiner 200 µm wurde verwendet.

Die Partikelgrößenverteilung der eingesetzten Holzasche wurde mittels Mastersizer 2000 der Firma Malvern durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 35 ersichtlich.

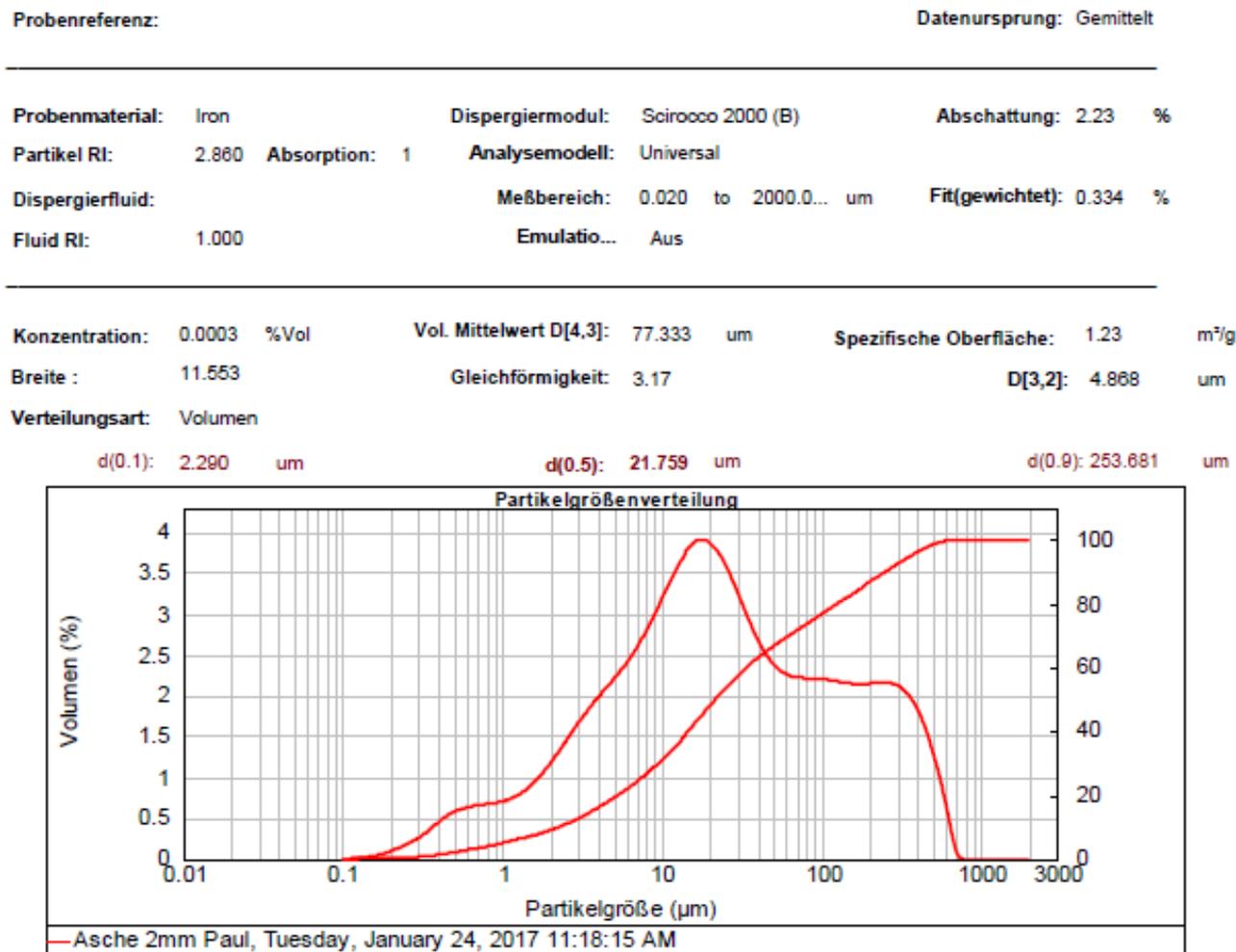


Abbildung 35: Partikelgrößenverteilung der gesiebten Asche, die für die Filteralterung herangezogen wird

Eine typische Partikelgrößenverteilung, gemessen mit dem SMPS, der im Rohgaskanal erhaltenen Aerosolmischung aus Ruß und Holzasche ist Abbildung 36 dargestellt.

Im Vergleich zu Abbildung 34 ist erkennbar, dass die Menge der Partikeln bei gleichem Volumenstrom im Rohgaskanal (hier 10m³/h) mit Ruß und Holzasche deutlich höher

ist. Aufgrund der oberen Messbereichsgrenze von 600 nm des SMPS ist keine Information über die Partikelanzahlkonzentration der Mikrometer-skaligen Teilchen möglich

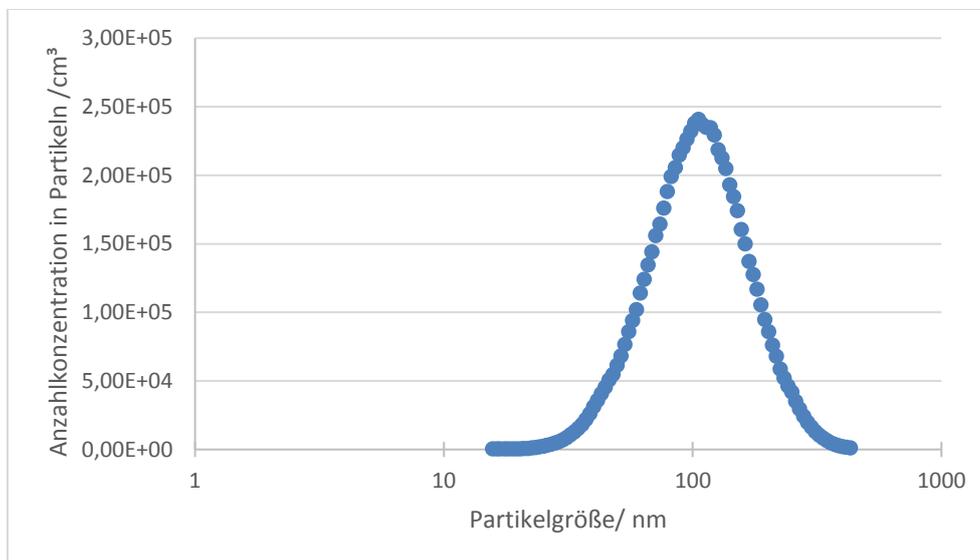


Abbildung 36: Typische Partikelgrößenverteilung des Holzstaubes und Ruß gemessen mit dem SMPS

4.4 Versuchsdurchführung

Es wurden folgende unterschiedliche Versuche durchgeführt. Es wurden die Staubabscheider selbst variiert, hierbei kam einerseits ein Elektroabscheider mit 2 unterschiedlichen Elektrodenformen, Sägezahnelektrode und Wolframdrahtelektrode zum Einsatz, andererseits wurden Glasfaservliese mit 1, 3 und 5 Lagen und Dämmwolle sowie 1,2 und 3 Lagen vermessen. Abwandlungen wurden auch beim Testaerosol gemacht. Es wurde ausschließlich Ruß und Ruß als Mischung mit Holzasche als Testaerosol verwendet. Darüber hinaus wurde auch der Volumenstrom mit 5m³/h, 10m³/h, 20m³/h und 30m³/h variiert.

Zu Bestimmung des Druckverlusts und der Fraktionsabscheidegrade der getesteten Abscheider waren für jede Kombination aus Testaerosol und Volumenstrom folgende Teilschritte notwendig bzw. wurden durchgeführt:

1. Umbau des Prüfkanales bzw. der Halterungen zur Aufnahme der zu testenden Abscheider.
2. Einstellen eines konstanten Volumenstroms

3. Inbetriebnahme der Aerosolgeneratoren
4. Bestimmung der rohgasseitigen Partikelgrößenverteilung und Partikelkonzentration
5. Abschalten der Aerosolgeneratoren bzw. Unterbrechung der Materialzufuhr
6. Einbau der Abscheider (bzw. im Falle des Elektroabscheiders wird dieser eingeschaltet)
7. Wiederinbetriebnahme der Aerosolgeneratoren bzw. Wiederherstellung der Materialzufuhr
8. Bestimmung der reingasseitigen Partikelgrößenverteilung und Partikelkonzentration
9. Bestimmung des Druckverlusts des Abscheiders
10. Abschalten der Aerosolgeneratoren bzw. Unterbrechung der Materialzufuhr
11. Abschalten des Gebläses
12. Ausbau des Abscheiders

Wiederholung der Prozedur 1-12 mit geänderten Versuchsparametern.

Im Folgenden sind hinsichtlich der genannten Versuchsdurchführung noch einige Details anzuführen:

Ad 2): Die Messungen erfolgten bei unterschiedlichen Volumenströmen. Je nach Material wurden Versuche bei einem Volumenstrom von 5, 10, 20 und 30 m³/h durchgeführt.

Da bei der verwendeten MMTTC Analysator Software die Gasgeschwindigkeit in m/h einzustellen war, mussten die verwendeten Volumenströme von m³/h in m/h umgerechnet werden. Das erfolgte nach Gleichung 3

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (3)$$

Wobei v die einzugebende Geschwindigkeit Volumenstrom in m/h, \dot{V} der gewünschte, festgelegte Volumenstrom in m³/h und A die Querschnittsfläche des durchströmten Rohres in m² ist.

Die exakt verwendeten Volumenströme und die Anzahl der Lagen ist direkt den Versuchen zu entnehmen.

Ad 4 und 8): Grundsätzlich sollte bei allen getesteten Abscheidern zuerst eine Rohgasmessung und anschließend eine Reingasmessung durchgeführt werden. Bei der Rohgasmessung wird der Prüfkanal ohne den Abscheider betrieben, da nur eine Probenahmesonde im Reingaskanal vorhanden ist. Im Falle des Elektroabscheiders, war dieser bereits in der Anlage verbaut, jedoch bei der Rohgasmessung nicht eingeschaltet und somit ohne Funktion. Dass die Elektrode einen Beitrag zum Abscheidegrad oder Druckverlust liefert, konnte vernachlässigt werden.

Der Einbau der Filtermittel erfolgte zwischen den Rohrflanschen, die verschraubt und zusätzlich von außen abgedichtet wurden.

Die Reingasmessung erfolgt analog zur Rohgasmessung mit dem Unterschied, dass Glasfaservlies und Dämmmaterial eingebaut bzw. der Elektroabscheider eingeschaltet wurde.

Die Roh- und Reingasmessungen wurden mittels SMPS, dass mit der Softwareoberfläche „Aerosol-Instruments“ gesteuert wurde. Da ein guter Mittelwert mit möglichst geringer Streuung wünschenswert ist, wurden jeweils 5 Einzelmessungen zu je 120 Sekunden durchgeführt. Zur Auswertung wurden die Mittelwerte dieser Messungen herangezogen.

Ad 9): Zwischen der Inbetriebnahme der Aerosolgeneratoren und der Messung der reingasseitigen Partikelgrößenverteilung und –anzahlkonzentration sowie der Druckverlustmessung stieg der Druckverlust bei den filternden Abscheidern stetig an. Für die Bestimmung des Quality-Faktors wurde der gemittelte Druckverlust über die Messzeit von 10 min verwendet.

Bei Dämmmaterial und Glasfaservlies wird eine Bestaubungsdauer bis zu einem bestimmten Druckverlust, abhängig vom Leerdruckwert (zu Beginn der Beladung), durchgeführt und dann die Messung gestoppt.

Ad 3 und 7): Der Staubdosierer für Holzasche wird bei einem Düsenvordruck von 2,5 bar betrieben. Die Förderschnecke wurde auf Stufe 2 bzw. 1,09 Volt Antriebsspannung eingestellt, das entspricht einem aufgegebenen Staubmassenstrom von ca. 0,5 g/min.

4.5 Auswertung

Es sollen aus den erhaltenen Messwerten der Abscheidegrad und der Quality-Faktor wie folgt berechnet werden:

4.5.1 Abscheidegrad

Der Trenngrad / Abscheidegrad gibt an, welcher Anteil einer Aufgabegut-Fraktion oder – Partikelgröße nach der Klassierung im Grobgut enthalten ist. Als Funktion heißt $T(x)$ auch Trenngradkurve, Trennkurve, Teilungskurve, Tromp'sche Kurve und in der Entstaubungstechnik Fraktionsabscheidegrad. [39]

Der Fraktionsabscheidegrad wird als $T(x)$ bezeichnet, x steht dabei für die Partikelgröße des abgeschiedenen Partikels. Er beschreibt den Trenngrad und somit die Wirksamkeit des Abscheiders.

$$T(x) = 1 - \frac{c_{\text{Reingas}}(x)}{c_{\text{Rohgas}}(x)} \quad (4)$$

Wobei $T(x)$ der Fraktionsabscheidegrad, $c_{\text{Reingas}}(x)$ die Konzentration der Partikel der Partikelgröße x im Reingas und $c_{\text{Rohgas}}(x)$ die Konzentration der Partikel der Partikelgröße x im Rohgas ist.

Der Penetrationsgrad errechnet sich nach Gleichung 5.

$$P(x) = 1 - T(x) \quad (5)$$

Wobei $P(x)$ der Penetrationsgrad der Partikel der Partikelgröße x , und $T(x)$ wieder der Fraktionsabscheidegrad der Partikel der Partikelgröße x ist.

4.5.2 Quality-Faktor

$$Q_F = \frac{-\ln(1 - T(x))}{\Delta p} \quad (6)$$

Q_F ist der Quality-Faktor in Pa^{-1} , $T(x)$ der Fraktionsabscheidegrad der Partikelgröße x , und Δp der Druckverlust, gemessen durch Druckdifferenzmessung über den Staubabscheider, in Pa.

Der Quality-Faktor ermöglicht es, verschiedene Abscheider und Abscheidersysteme hinsichtlich der Abscheidequalität gegenüberzustellen und zu vergleichen. Ein großer Quality-Faktor wäre optimal. Erreichbar ist das nach Gleichung 6 durch einen hohen Abscheidegrad und/oder einem niedrigen Druckverlust.

5 Ergebnisse

Die unterschiedlichen Ergebnisse sind nach den untersuchten Abscheidern sortiert und in dem nachfolgenden Kapiteln angeführt.

5.1 Filternde Abscheider

Als Filtermittel für die filternden Abscheider wurden Dämmmaterial und Glasfaservlies verwendet. Die Spezifikationen und die Hersteller dieser Filtermittel sind Kapitel 4.2.1 zu entnehmen.

5.1.1 Dämmmaterial

Testaerosol Ruß

Die Dämmwolle der Marke Isover wurde unterschiedlichsten Beladungsversuchen unterzogen. Es wurden 1, 2, und 3 hintereinandergeschaltete Lagen des Filtermaterials getestet. Dabei, wurden je nach den verwendeten Schichten, Messungen bei Volumenströmen von $5\text{m}^3/\text{h}$, $10\text{m}^3/\text{h}$, $20\text{m}^3/\text{h}$ und $30\text{m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Die erhaltenen Abscheidegrade sind in der Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. Es wurde hierbei immer nur nanoskaliger Ruß zur Beprobung der Filtermittel eingesetzt.

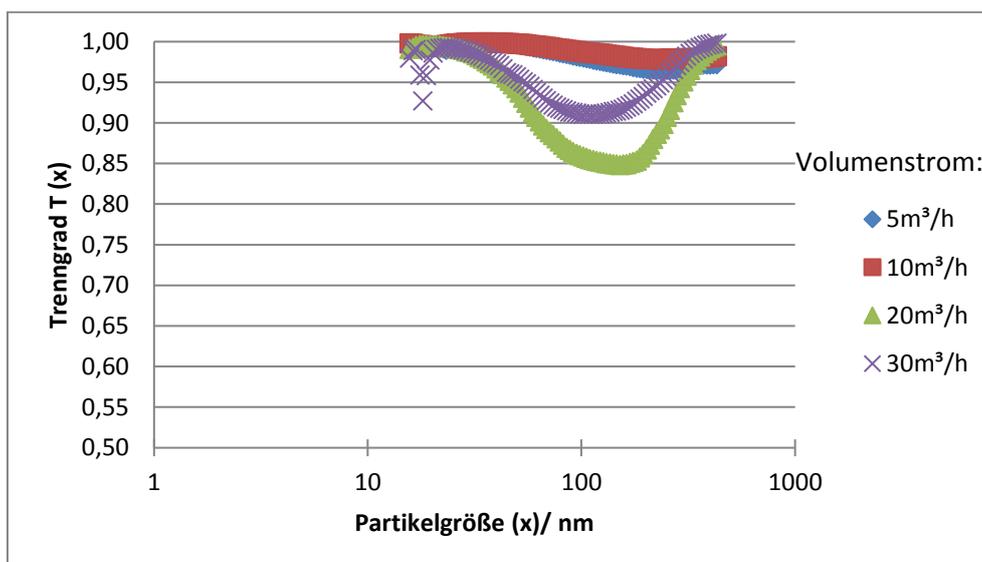


Abbildung 37: Abscheidegrade von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

In Abbildung 37 sind die Abscheidegrade bei den Volumenströmen $5\text{m}^3/\text{h}$, $10\text{m}^3/\text{h}$, $20\text{m}^3/\text{h}$ und $30\text{m}^3/\text{h}$ dargestellt. Je langsamer der Volumenstrom ist, desto besser ist der Abscheidegrad. Das ist erklärbar, weil mit zunehmenden Volumenstrom die bereits abgeschiedenen Partikeln zunehmend ausgetragen werden, bzw. nicht abgeschieden werden. Dieses Phänomen ist bei den Volumenströmen 5, 10 und $30\text{m}^3/\text{h}$ erkennbar. Der Volumenstrom von $20\text{m}^3/\text{h}$ ist eher untypisch da dieser, besonders bei 100nm einen geringeren Abscheidegrad hat, als die Messungen bei $30\text{m}^3/\text{h}$. Die Quality-Faktoren zeigen jedoch eine Vergleichbarkeit der Messungen bei den Volumenströmen von $20\text{m}^3/\text{h}$ und $30\text{m}^3/\text{h}$. Die berechneten Qualityfaktoren für eine Lage des Dämmmaterials sind in Abbildung 40 dargestellt. Es sind für eine Lage des Dämmmaterials Abscheidegrade von mehr als 85%, abgesehen von der Messung bei einem Volumenstrom von $20\text{m}^3/\text{h}$ sogar von 90%, gemessen worden. Das sind durchaus gute Abscheidegrade.

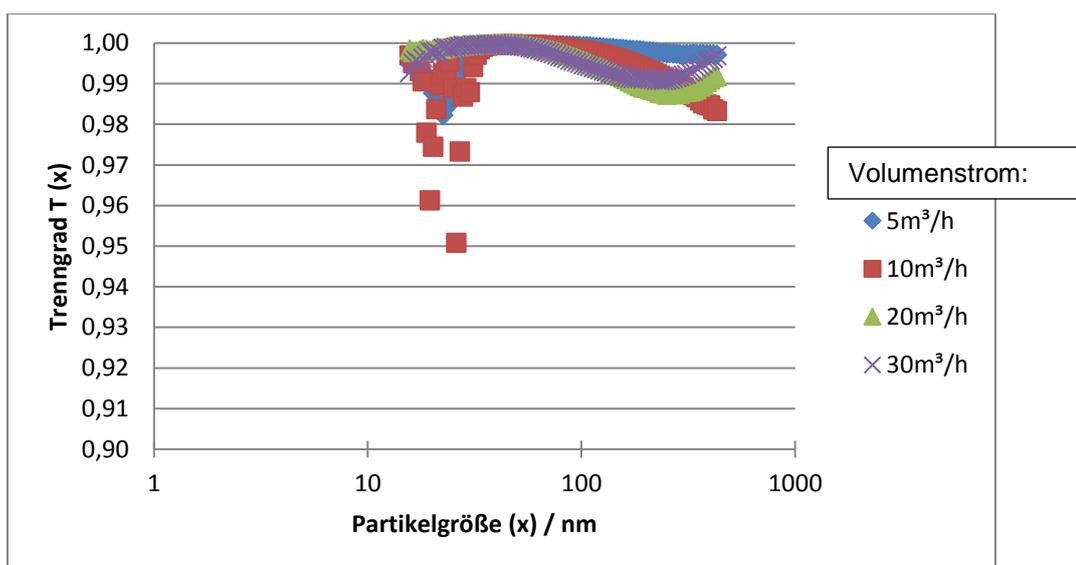


Abbildung 38: Abscheidegrade von 2 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

Die Abbildung 38 zeigt die gemessenen Fraktionsabscheidegrade der Volumenströme bei $5\text{m}^3/\text{h}$, $10\text{m}^3/\text{h}$, $20\text{m}^3/\text{h}$ und $30\text{m}^3/\text{h}$ bei 2 Lagen von Dämmmaterial. Die Messung von $5\text{m}^3/\text{h}$ weist einen Abscheidegrad bei knapp 200nm von 62%, wohingegen die anderen 3 höheren Volumenströme Abscheidegrade von 99% aufweisen. Ergebnisse die sich durchaus, wenn man nur den Abscheidegrad betrachtet.

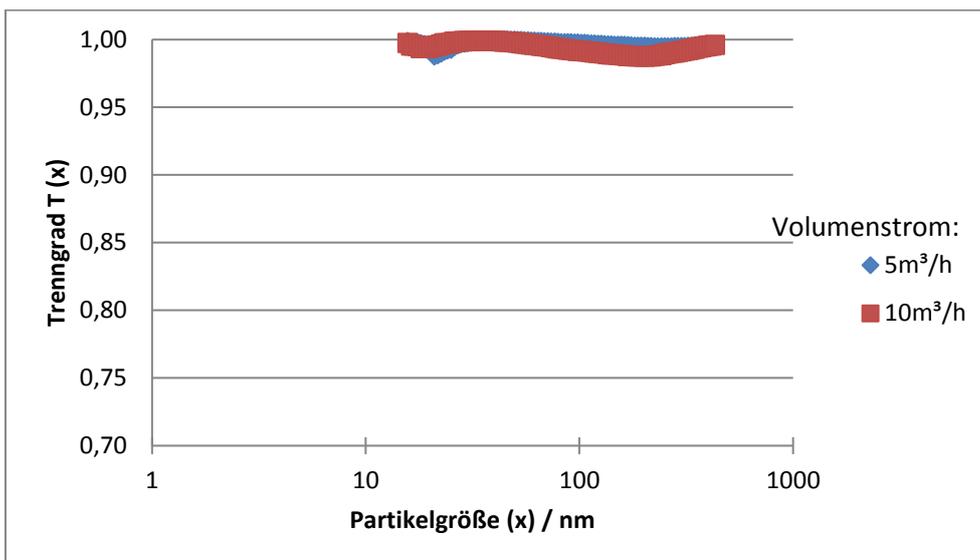


Abbildung 39: Abscheidegrade von 3 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

Abbildung 39 zeigt die Fraktionsabscheidegrade bei 3 hintereinander angeordnete Lagen von Dämmmaterial, also in Summe von 12 cm Dicke des Filtermittels. Hier wurden, da mit steigendem Volumenstrom auch der entstehende Druckverlust steigt, nur Messungen bei 5 m³/h und 10 m³/h durchgeführt. Beide Messungen ergeben sehr gute Abscheidegrade von 99,5% bis 99,9%.

Die Druckverluste, die für die Berechnung des Quality-Faktors herangezogen wurden, sind in Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 12: Druckverluste von 1 Lage des Dämmmaterials beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	1 Lage
5 m³/h	27,42
10 m³/h	89,16
20 m³/h	136,11
30 m³/h	276,01

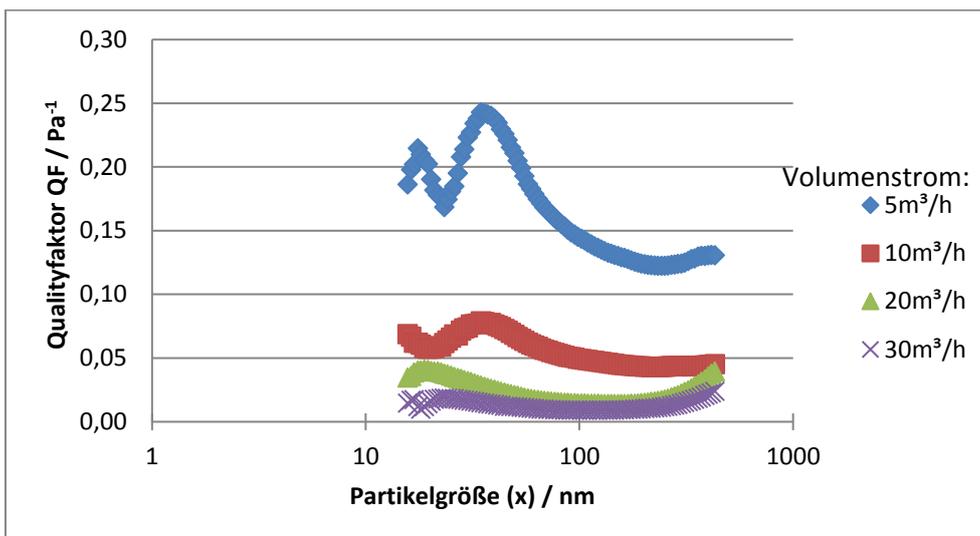


Abbildung 40: Quality-Faktoren von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

Abbildung 40 stellt die berechneten Quality-Faktoren für eine Lage (Gesamtdicke von 4 cm) Dämmmaterial dar. 5m³/h zeigt einen Quality-Faktor von 0,2, wohingegen bei 20m³/h und 30m³/h Quality-Faktoren von einer 10 Potenz geringeren Werte erhalten wurden. Somit zeigt, im Vergleich der unterschiedlichen Volumenströme bei der Messung von nanoskaligen Ruß mit 1 Lage Dämmmaterial den besten Abscheidegrad mit Einbezug des Quality-Faktors.

Tabelle 13: Druckverluste von 2 Lagen des Dämmmaterials beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	2 Lagen
5m ³ /h	16,84
10m ³ /h	43,5
20m ³ /h	113,8
30m ³ /h	193,92

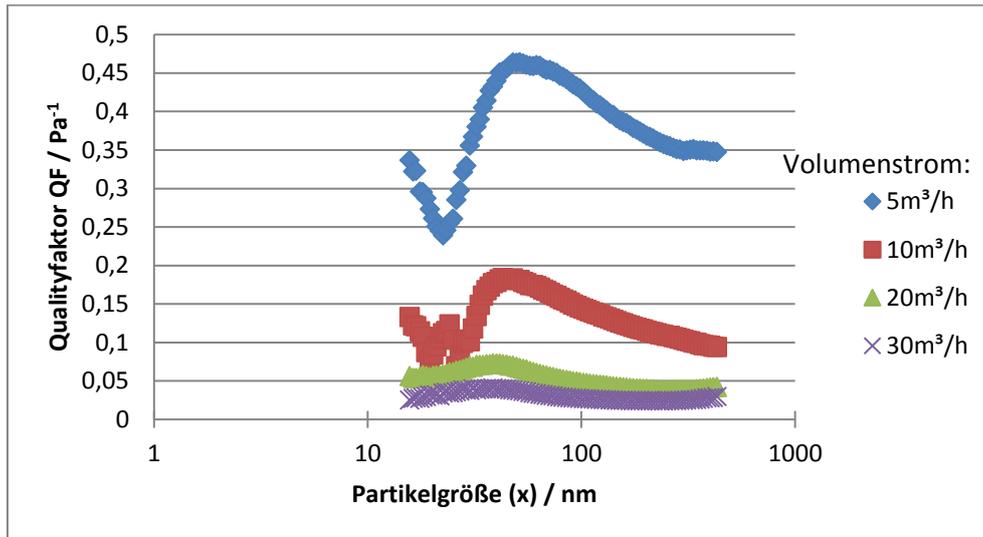


Abbildung 41: Quality-Faktoren von 2 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

In Abbildung 41 sind die Quality-Faktoren für 2 Lagen (Gesamtdicke von 8cm) Dämmwolle dargestellt. Die Quality-Faktoren von einer Lage und 2 Lagen (Abbildung 40) Dämmwolle sind vergleichbar. Somit können diese Filtermittel als gleich gut bewertet werden.

Tabelle 14: Druckverluste von 3 Lagen des Dämmmaterials beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	3 Lagen
5m ³ /h	46,2
10m ³ /h	109,9

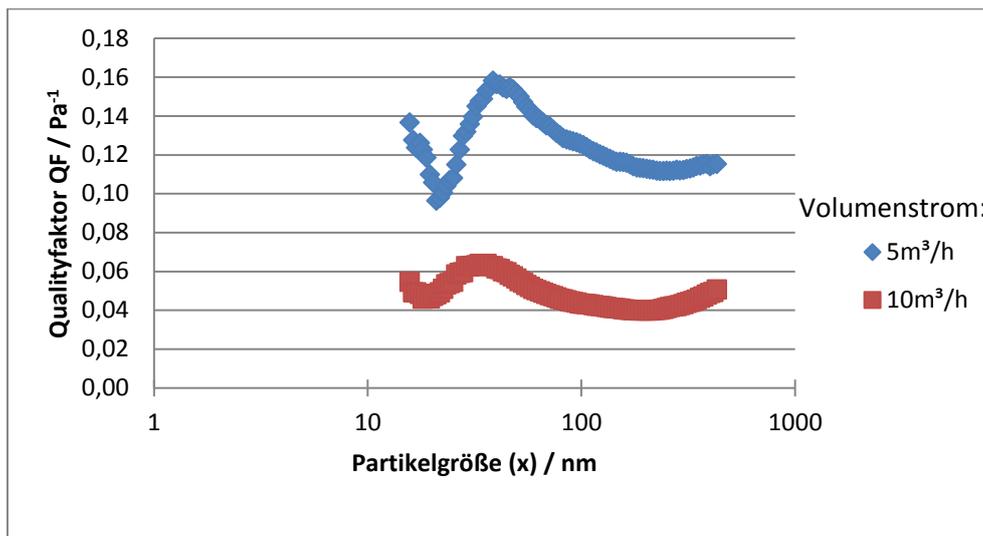


Abbildung 42: Quality-Faktoren von 3 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

In der Abbildung 42 sind die Quality-Faktoren der Messung mit 3 hintereinander angereihte Lagen (Gesamtdicke von 12 cm) Dämmmaterial erkennbar. Diese zeigen Quality-Faktoren in einer Größenordnung wie bei 1 und 2 Lagen desselben Materials.

Testaerosol Ruß-Holzasche-Mischung

Das Filtermittel wurde nicht nur mit nanoskaligen Ruß beprobt, sondern auch zusätzlich mit nanoskaliger Holzasche bestäubt. Die Fraktionsabscheidegrade die dazu bei 1 Lage des Dämmmaterials erhalten wurden, sind der Abbildung 43 zu entnehmen. Es ist wieder der Trend erkennbar, dass, je höher der Volumenstrom ist mit dem das Filtermittel beprobt wird, desto geringer werdend die Fraktionsabscheidegrade. Trotz der Zugabe von Holzasche ist der Unterschied des Abscheidegrades zwischen der Beprobung nur mit Ruß und dieser Variante nicht so groß wie erwartet.

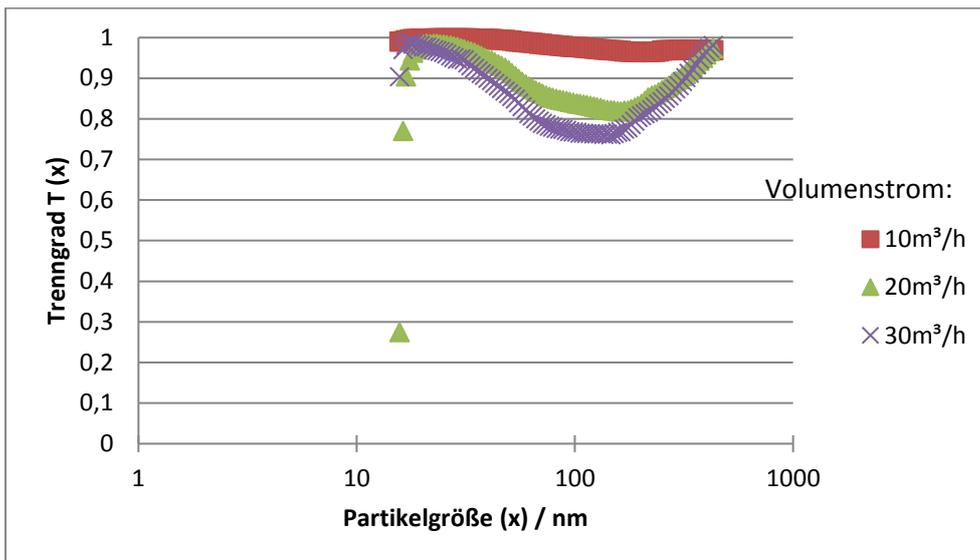


Abbildung 43: Abscheidegrade von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

Tabelle 15: Druckverluste von Dämmmaterial beladen mit Holzasche und Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	1 Lage
10m³/h	113,18
20m³/h	175,52
30m³/h	198,45

Abbildung 44 zeigt aus den in Abbildung 43 und Tabelle 15 enthaltenen Messwerte errechneten Quality-Faktoren.

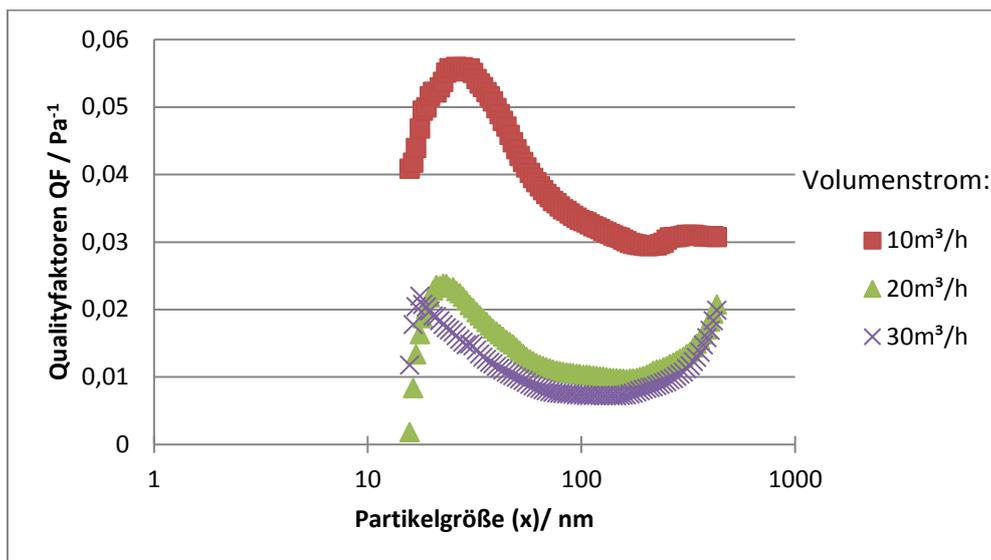


Abbildung 44: Quality-Faktoren von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen

Da sowohl die Quality-Faktoren als auch die Druckverluste die gleiche Größenordnung wie bei der Bestäubung mit reinem Ruß aufweisen ist daraus zu schließen, dass die „größere“ Holzasche nur unwesentlich zum Druckverlust beiträgt.

5.1.2 Glasfaservlies

Testaerosol Ruß

Das Glasfaservlies „Viledon“ der Marke Freudenberg wurde, genauso wie das Dämmmaterial unterschiedlichsten Beladungsversuchen unterzogen. Es wurden 1, 3, und 5 Lagen des Filtermaterials getestet. Dabei, wurden je nach den verwendeten Filtermittelschichten Messungen bei Volumenströmen von 5m³/h, 10m³/h, 20m³/h und 30m³/h durchgeführt. Die erhaltenen Abscheidegrade sind in den Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Es wurde hierbei zuerst wieder nur nanoskaliger Ruß zur Beprobung der Filtermittel eingesetzt.

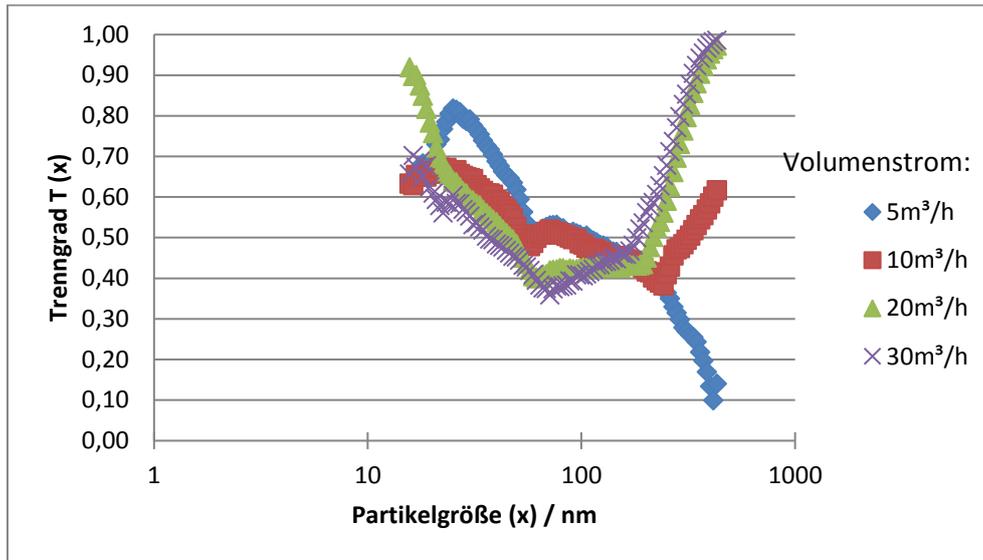


Abbildung 45: Abscheidegrade von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

Die Abbildung 45 zeigt die Fraktionsabscheidegrade von einer Lage Glasfaservlies mit 3 cm Dicke. Die Abscheidegrade liegen bei allen vermessenen Volumenströmen zwischen 40% und 60%. Filternde Abscheider weisen normalerweise Abscheidegrade von über 90% auf, erklärbar kann dieses Phänomen dadurch sein, dass Glasfaservliese nicht so dicht strukturiert ist, wie es bei Dämmmaterial der Fall ist.

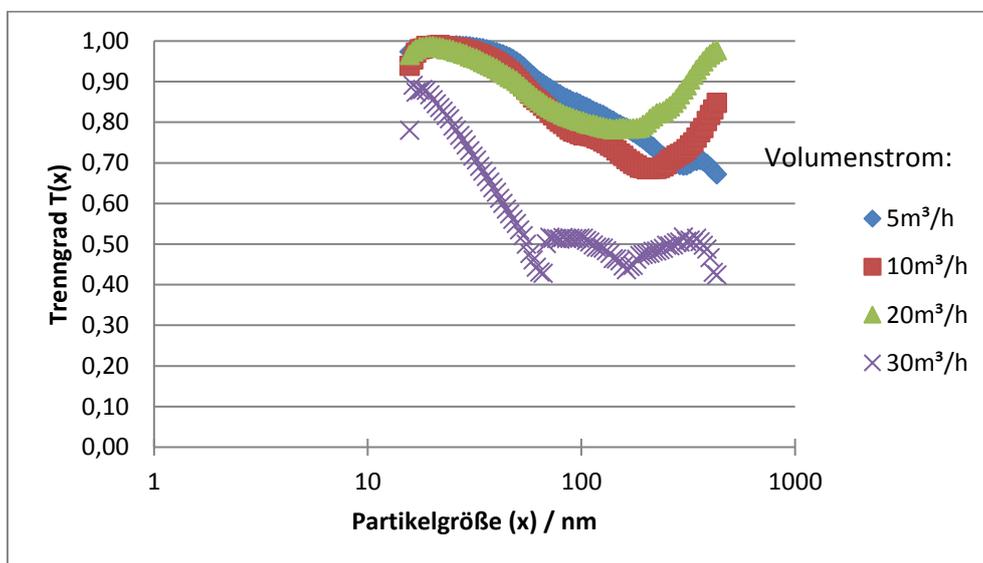


Abbildung 46: Abscheidegrade von 3 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

3 hintereinander angeordnete Lagen von Glasfaservlies, mit einer Gesamtdicke von 9 cm, weisen schon geringfügig bessere Abscheidegrade auf als nur eine Lage (Gesamtdicke von 3 cm) Filtermittel. Besonders feinere Partikel bis ca. 50 nm Größe

werden gut abgeschieden, wohingegen Partikel bei 100nm Größe schlechter abgeschieden werden.

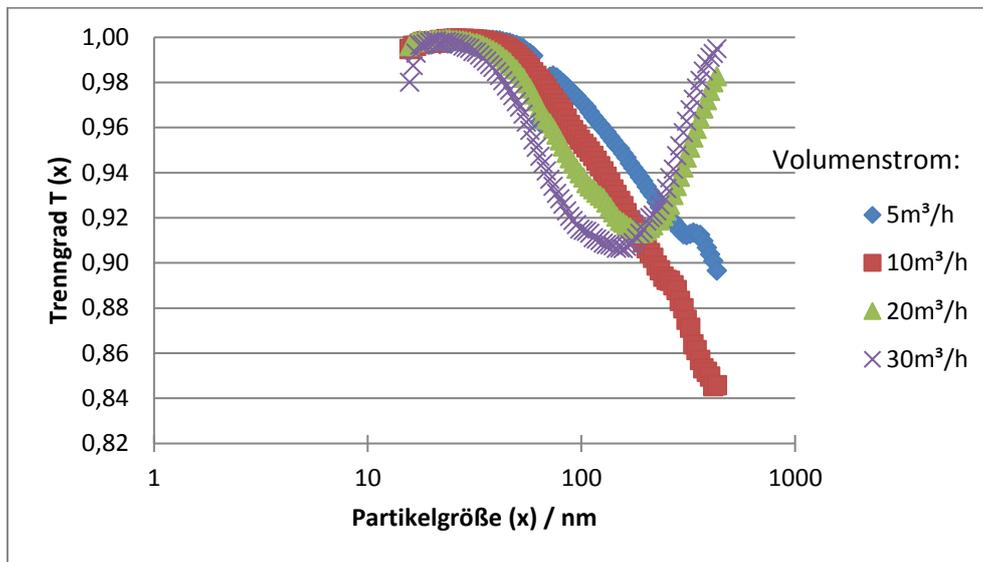


Abbildung 47: Abscheidegrade von 5 Lagen Glasfaservlieses bei unterschiedlichen Volumenströmen

Mit zunehmender Anzahl von Lagen des Glasfaservlieses und somit immer dicker werdenden Filtermittel, in Abbildung 47 ersichtlich, werden die Abscheidegrade deutlich besser. Bei 5 Lagen sind bei allen Volumenströmen schon über 90 % der Partikeln abgeschieden worden.

Mit denen in Tabelle 16, Tabelle 17 und Tabelle 18 ausgewiesenen Druckverluste werden die nachfolgenden Quality-Faktoren berechnet.

Tabelle 16: Druckverluste von 1 Lage des Glasfaservlieses beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	1 Lage
5m³/h	2,83
10m³/h	41,7
20m³/h	103,5
30m³/h	163,13

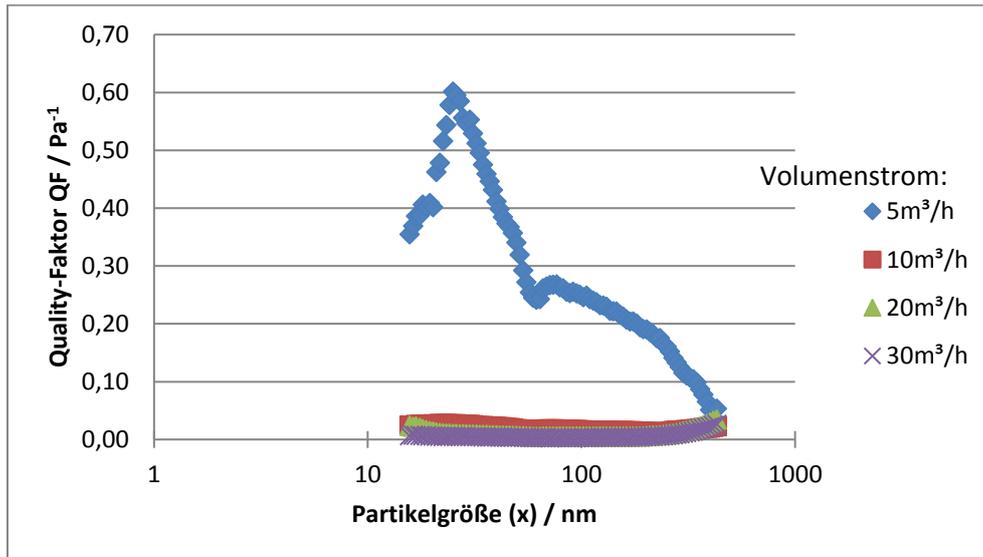


Abbildung 48: Quality-Faktoren von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

Abbildung 48 zeigt die Quality-Faktoren zur Messung der 1-lagigen (Gesamtdicke von 3cm) Glasfaservlies. Die Quality-Faktoren sind deutlich schlechter als jene des Dämmmaterials.

Tabelle 17: Druckverluste von 3 Lagen des Glasfaservlieses beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	3 Lagen
5m³/h	16,3
10m³/h	43,3
20m³/h	113,2
30m³/h	164,3

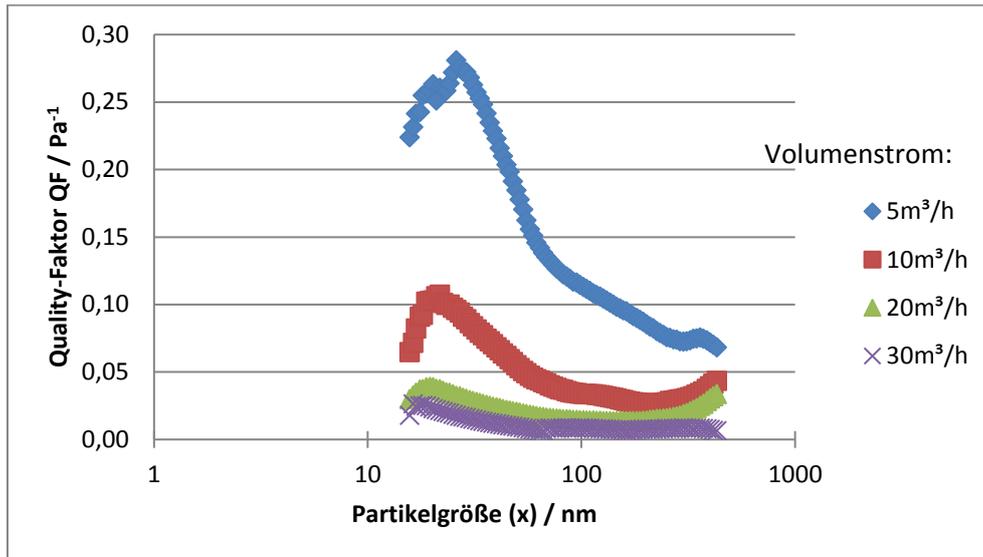


Abbildung 49: Quality-Faktoren von 3 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

Abbildung 49 zeigen die Quality-Faktoren der Experimente mit dem 3-lagigen Glasfaservlies als Filtermittel. Diese Quality-Faktoren sind höher als die mit nur 1 Lage.

Tabelle 18: Druckverluste von 5 Lagen des Glasfaservlieses beladen mit Ruß

Volumenstrom	Druckverlust in Pa
	5 Lagen
5m ³ /h	16,8
10m ³ /h	42,8
20m ³ /h	106,8
30m ³ /h	174,4

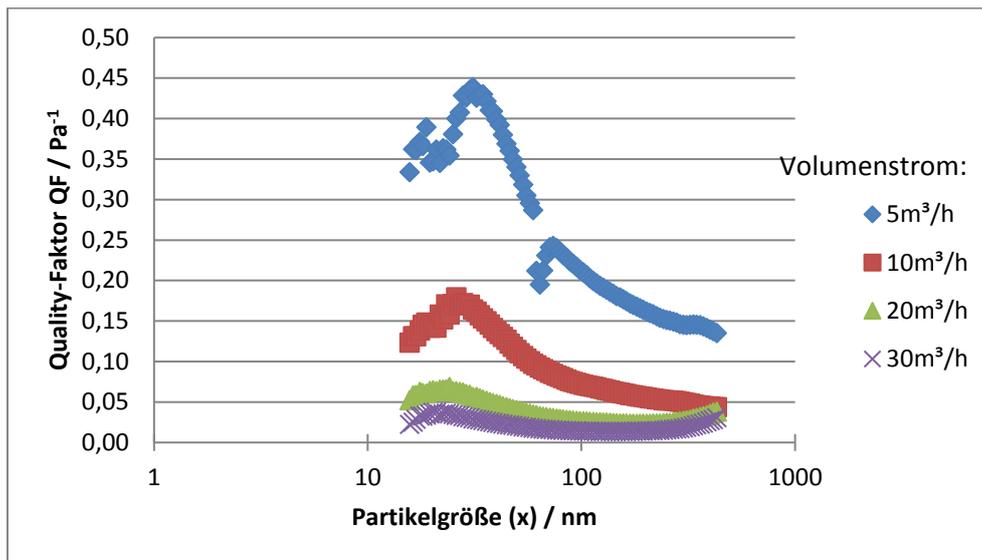


Abbildung 50: Quality-Faktor von 5 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

Abbildung 50 zeigt die berechneten Quality-Faktoren für 5 Lagen dieses Filtermittels. Sie sind vergleichbar mit jenen bei 3 Lagen und bei 5m³/h sogar etwas höher als es bei 10m³/h, 20m³/h und 30m³/h der Fall ist.

Testaerosol Ruß-Holzasche-Mischung

Auch beim Glasfaserfiltermedium wurden wieder Beladungsversuche durch gleichzeitiges dispergieren von Ruß und Holzasche durchgeführt, die Ergebnisse davon sind in Abbildung 51 dargestellt. Die Abscheidegrade liegen zwischen 30% und 60%. Der geringste Fraktionsabscheidegrad, liegt diesmal nicht bei einem einzigen Minimum, sondern bildet eine Art „Plateau“ zwischen 80 und 200 nm.

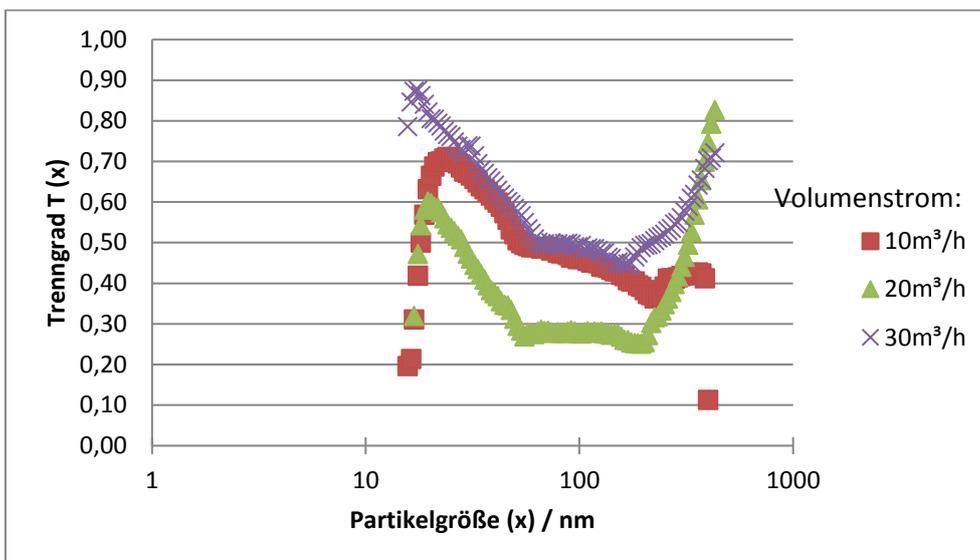


Abbildung 51: Abscheidegrade von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

In der Abbildung 52 sind die Vermessung bei einem Volumenstrom von 10m³/h bei 1 Lage und 2 Lagen das Glasfaservlies bei Beladung von Ruß und Holzasche dargestellt. Es zeigt deutlich, dass mit zunehmender Lagenanzahl, und somit Verdopplung der Filtermitteldicke, die Abscheidegrade um ca. 40% zunehmen. Weiteres erkennt man auch, dass das abfallende „Plateau“ des schlechteren Fraktionsabscheidegrades zwischen 80 nm und 200 nm bei 2 lagiger Verwendung des Filtermittels deutlich geringer wird.

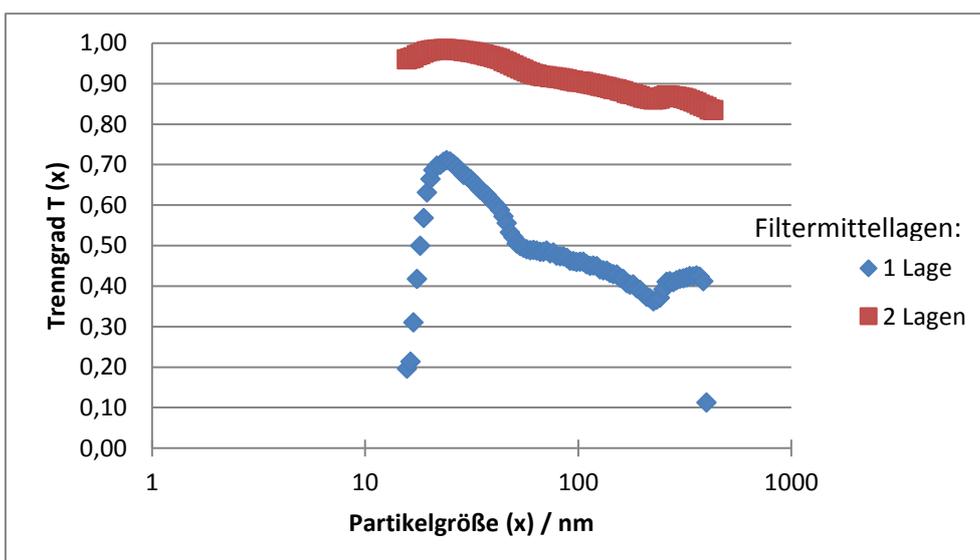


Abbildung 52: Abscheidegrade von 1 Lage und 2 Lagen Glasfaservlies bei 10m³/h Volumenstrom

In Tabelle 19 sind die zugehörigen Druckverluste dargestellt.

Tabelle 19: Druckverluste des Glasfaservlies beladen mit Ruß und Holzasche

Volumenstrom	Druckverlust in Pa	
	1 Lage	2 Lagen
10m ³ /h	41,79	58,78
20m ³ /h	40,64	-
30m ³ /h	124,14	-

Abbildung 53 zeigt die Quality Faktoren der Messungen der in Abbildung 51 dargestellten Abscheidegrade. Diese sind höher als die der einlagigen Messung mit nur Ruß, aber niedriger als jene mit 3 Lagen und 5 Lagen Glasfaservlies, die ebenfalls ausschließlich mit Ruß bestaubt wurden.

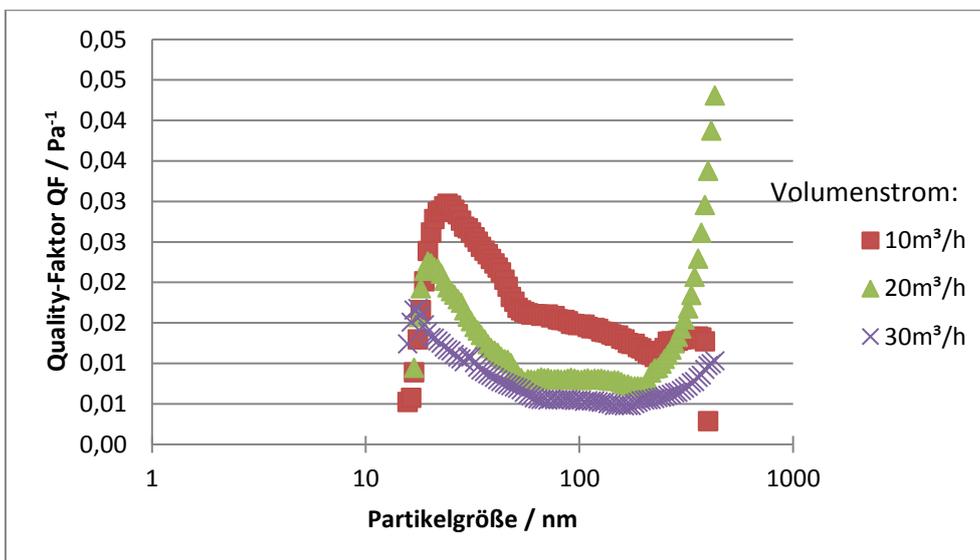


Abbildung 53: Quality-Faktoren von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen

5.2 Elektroabscheider

Der Einbau des Elektroabscheiders ist einfach, da dieser nur in das Kanalrohr mittels T-förmiger Adapters eingebracht wird und dann festgeschraubt wird. Es ist zu beachten, dass die verwendete Sprühelektrode zentrisch im Rohr ausgerichtet wird. Neben dem Einbau, und einer Erdung ist eine Spannungsversorgung mit 230 Volt nötig.

Als Variationsmöglichkeit wurde der Elektroabscheider mit 2 unterschiedlichen Sprühelektroden betrieben. Einerseits kam eine mit Sägezahnelektrode als auch eine Wolframsprühelektrode zum Einsatz (siehe Kapitel 4.2.2). Die Sprühelektroden wurden zentrisch im Kanalrohr angebracht, um so einen gleichmäßigen elektrischen Feldaufbau zu gewährleisten und dadurch eine gleichmäßige Ionisierung der Partikeln sicherzustellen.

Beim Elektroabscheider wurde darauf verzichtet den Quality-Faktor Q_F zu bestimmen, da der Druckverlust Δp nahezu 0 ist sodass keine sinnvolle Berechnung des Quality-Faktors möglich ist.

5.2.1 Sägezahnelektrode

Es wurden Abscheidegrade für die Sägezahnelektrode mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten ermittelt. In Abbildung 54 sind die gemessenen Abscheidegrade über den Partikelgrößen für die Sägezahnelektrode dargestellt. Es wurden Versuche bei Volumenströmen von $5\text{m}^3/\text{h}$, $10\text{m}^3/\text{h}$, $20\text{m}^3/\text{h}$ und $30\text{m}^3/\text{h}$ durchgeführt und die Trenngrade als Funktion der Partikelgrößen x dargestellt.

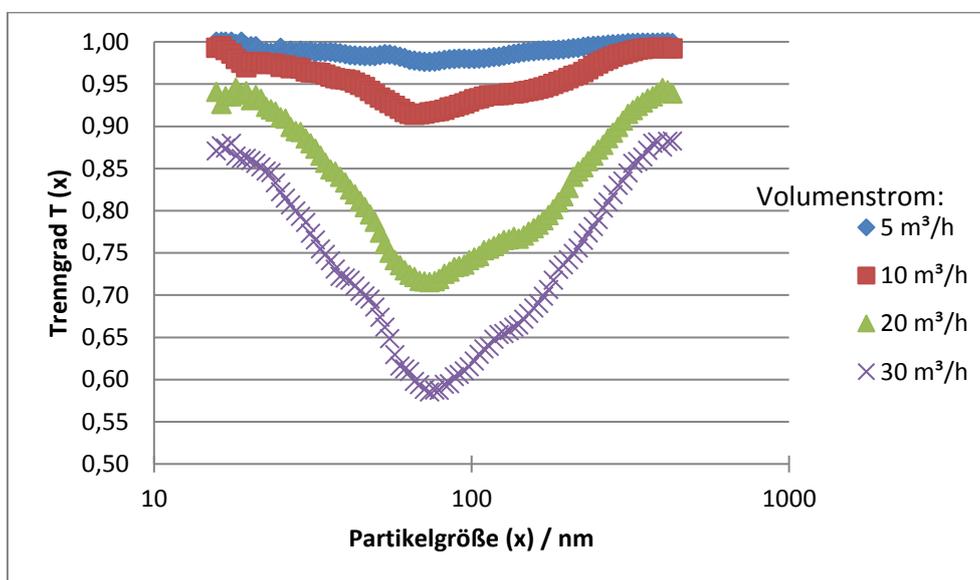


Abbildung 54: Fraktionsabscheidegrad der Sägezahnelektrode mit Beprobung mit Ruß

In Abbildung 54 ist ersichtlich, dass je höher der Anströmvolumenstrom ist, desto schlechter ist der Abscheidegrad, die Partikelabscheidung ist bei einer Partikelgröße von 90 nm am geringsten.

In Abbildung 55 ist der Abscheidegrad des Elektroabscheiders mit Sägezahnelektrode bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und Beladung durch Ruß und Holzasche dargestellt. Hierbei wurde die Messung für einen Anströmvolumenstrom von $10 \text{ m}^3/\text{h}$, $20 \text{ m}^3/\text{h}$ als auch $30 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt. Bei der künstlichen Filteralterung wurde hierbei auch, neben der Beprobung des Elektroabscheiders mit Ruß auch noch zusätzlich Asche eingeblasen.

Die Abscheidegrade unterscheiden sich kaum von jenen ohne Staubbeladung.

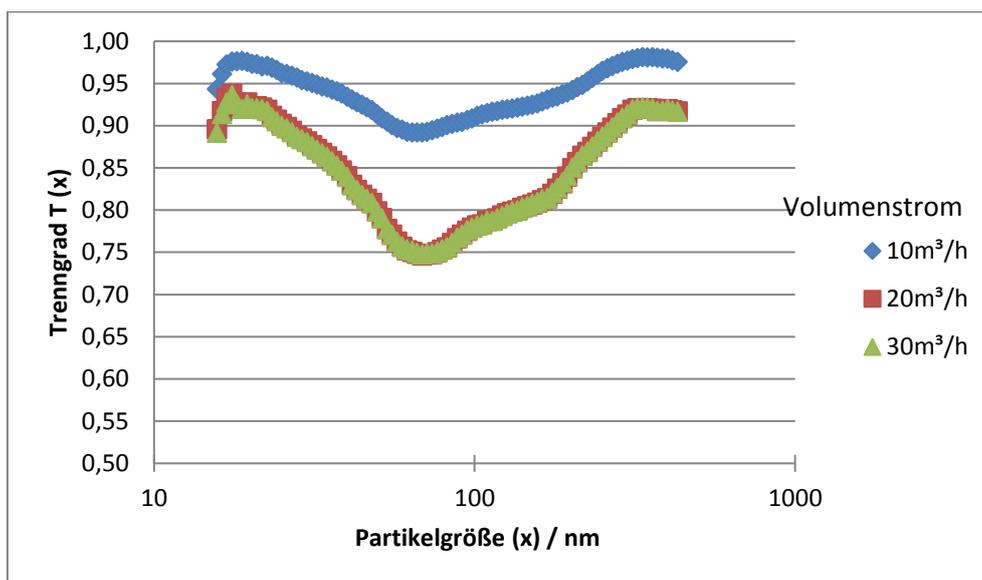


Abbildung 55: Abscheidegrade der Sägezahnelektrode bei Beladung mit Ruß und Holzasche

5.2.2 Wolframdrahtelektrode

Es wurden auch die Abscheidegrade für die Wolframdrahtelektrode mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten aufgenommen. In Abbildung 56 sind die vermessenen Fraktionsabscheidegrade dargestellt. Es wurden Versuche $5 \text{ m}^3/\text{h}$, bei $10 \text{ m}^3/\text{h}$, bei $20 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei $30 \text{ m}^3/\text{h}$ durchgeführt.

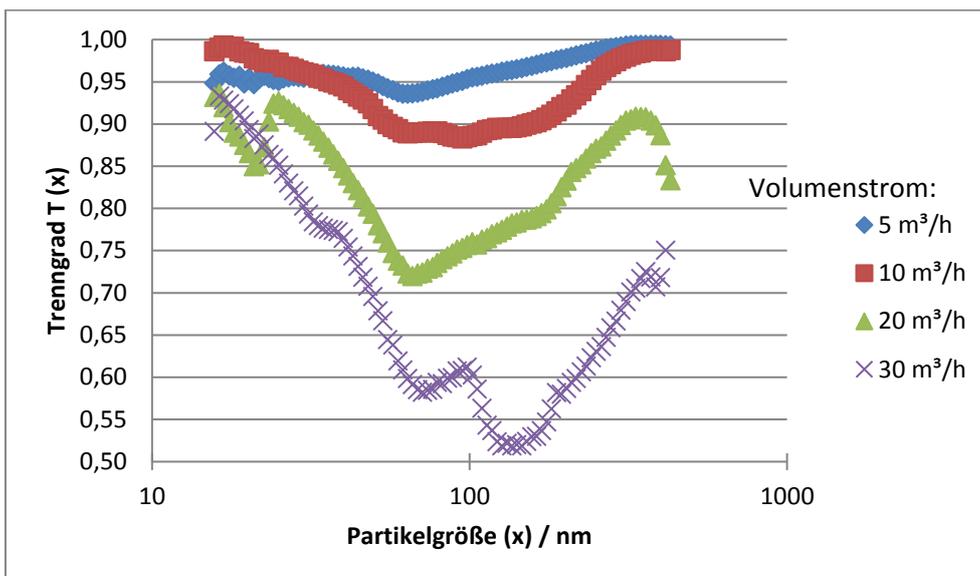


Abbildung 56: Abscheidegrad der Wolframelektrode bei Beladung mit Ruß

Abbildung 56 zeigt, dass die Abscheidegrade mit zunehmendem Volumenstrom immer schlechter werden. Abscheidegrade von 90 % bis über 90% sind für elektrische Entstauber gute Werte. Die Abscheidegrade bei Verwendung der Wolframdrahtelektrode sind geringfügig schlechter als es die Abscheidegrade der Sägezahnelektrode sind.

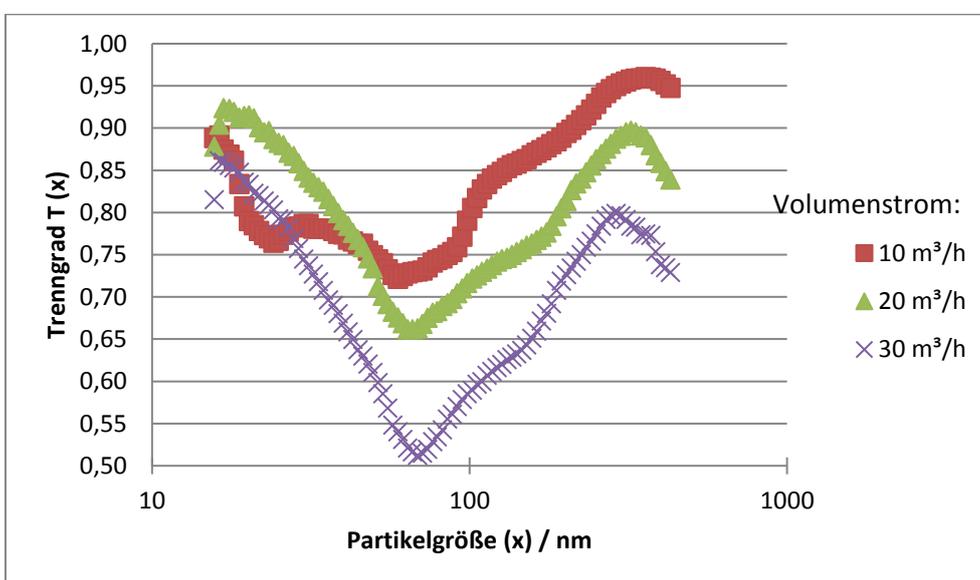


Abbildung 57: Abscheidegrade der Wolframdrahtelektrode bei Beladung mit Ruß und Holzrasche

Abbildung 57 präsentiert die Abscheidegrade des Elektroabscheiders mit Wolframdrahtelektrode bei Bestäubung mit Ruß und Holzrasche. Der Abscheidegrad ist vergleichbar mit jenen die nur mit Ruß beladen worden sind. Im Vergleich mit der

Sägezahnelektrode ist die Wolframelektrode geringfügig schlechter. Das kann jedoch vernachlässigt werden.

Der Quality-Faktor, kann bei den Messungen des elektrischen Abscheiders nicht als Vergleich dienen, da sich kein sich ändernder Druckverlust während der Beprobung einstellt. Mathematisch gesehen müsste der Elektroabscheider Quality Faktoren haben die ins Unendliche steigen.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

Bei Dämmwolle als Filtermedium sieht man deutlich an den Grafiken, dass mit zunehmendem Volumenstrom der Abscheidegrad abnimmt und sich mit zunehmender Anzahl aneinandergereihter Filtermittelschichten erhöht. Man erreicht Abscheidegrade von 85- 99,9 %. Mit zunehmendem Volumenstrom steigt bei einer höheren Anzahl an Lagen der Druckverlust (Tabelle 12).

Bei Vergleich der Abscheidegrade, des Druckverlustes und der Quality-Faktoren der unterschiedlichsten Vermessungen vom Dämmmaterial zeigt sich, dass der Einfluss der zusätzlichen Bestäubung mit Holzasche nicht sehr stark ist. Die Messergebnisse bewegen sich in den gleichen Größenordnungen.

Im Unterschied dazu weist Glasfaservlies bei einer Filtermittellage einen deutlich niedrigeren Abscheidegrad von 40- 70% auf. Auch hier ist mit zunehmender Schichtanzahl und damit größer werdenden Dicke des Filtermittels, der Abscheidegrad besser. Dennoch kommt er nicht an die Abscheideleistung der Dämmwolle heran. Erklärbar wäre das einerseits durch die Materialbeschaffenheit, andererseits durch die unterschiedliche Dichte der Filtermittelstruktur. Nicht erklärbar ist dadurch, warum der Quality Faktor bei zunehmender Anzahl an Schichten bei dem Glasfaservlies besser abschneidet, bei einer Lage aber schlechter als bei Dämmwolle.

Auch bei dem Glasfaservlies bewegen sich die Messergebnisse in der gleichen Größenordnung unabhängig von der Beprobung mit reinem Ruß oder der Beladung mit dem Ruß-Asche- Gemisch.

Betrachtet man die unterschiedlichen Ergebnisse beim Einbau der verschiedenen Elektroden in den Elektroabscheider, zeigt sich, dass der Abscheidegrad beider

Systeme höher ist als vom Hersteller angegeben. [38] Die Sägezahnelektrode schneidet allerdings geringfügig besser ab.

Bei der Beprobung mit reinem Ruß oder der Beladung mit Holzasche und Ruß zeigt sich ein geringer Unterschied zwischen den beiden Elektroden. Hier hat die Sägezahnelektrode ebenfalls ein besseres Ergebnis, da die Wolframelektrode bei Beladung mit Holzasche und Ruß einen etwas niedrigeren Abscheidegrad erreicht.

Der Quality-Faktor ist beim Elektroabscheider nicht bestimmbar, da der Druckverlust ~ 0 ist.

Um qualifiziertere Aussagen über den Elektroabscheider treffen zu können, sollte man den Quality-Faktor eventuell nicht über den Druckverlust, sondern über Energiemenge pro durchströmten Volumen definieren und infolge bestimmen.

Mit dieser Art des Versuchsaufbaus kann schnell eine Vorauswahl geeigneter Systeme getroffen werden, um diese dann in größeren Anlagen verwenden zu können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde erfolgreich ein Filtermittelprüfstand des VDI 3926 Typ 2 so adaptiert, dass er mögliche nachgeschaltete Entstauber bei Kleinfeuerungsanlagen testen kann. Diese Verwendung ist für die Überprüfung der immer wieder, das letzte mal 2015, verschärften Emissionsgrenzwerte notwendig.

Die Abscheidung erfolgt, bei den filternden Abscheidern durch Tiefen- und Oberflächenfiltration. Bei der Verwendung des Elektroabscheiders findet die Abscheidung aufgrund der Ionisierung der Partikeln statt,

Der Vorteil von Tiefenfiltern besteht darin, dass die Abscheidung sowohl in der Tiefe des Filtermittels als auch an der Oberfläche stattfindet. Durch die zunehmende Verstopfung der Luftkanäle steigt der Druckverlust. Diese Verunreinigung führt einerseits zu einer besseren Abscheidung, fordert aber auch ein leistungsstärkeres Gebläse um diesen Effekt auszugleichen. Weiteres ist dieser Ausgleich nur bis zu einer maximalen Druckdifferenz möglich, da das Filtermittel irgendwann komplett verstopft wird.

Beim Elektroabscheider ist das Problem mit dem steigenden Druckverlust nicht gegeben, da dieser nahezu keinen Druckverlust bewirkt. Dieser Abscheider hat jedoch geringere Abscheidegrade, wobei es egal ist welche Elektrode verwendet wird. Sie liefern beide Ergebnisse die ungefähr vergleichbar sind.

Zu Beginn der Arbeit wurde der Filtermittelprüfstand nach der Vornorm DIN SPEC 33999 bestmöglichst umgebaut, um verschiedene Abscheider zu testen. Der Prüfstand besteht aus 2 unterschiedlichen Partikelgeneratoren, einem Rußgenerator und einem Staubdosierer, die für den Partikeleintrag auf den zu testenden Abscheider zuständig sind. Es wird auch ein Messsystem zur Roh- und Reingaskonzentration eingebaut, genauso wie 2 Drucksensoren um so den Druckverlust zwischen Roh- und Reingasseite zu messen.

Es werden, anschließend an die Adaption, 4 unterschiedliche Abscheider getestet. Einerseits 2 nach dem Prinzip des filternden Abscheiders gebaute, mit Dämmwolle oder Glasfaservlies als Filtermittel. Es wurden auch 2 unterschiedliche Settings des Elektroabscheiders mit 2 unterschiedlichen Elektroden, der Sägezahnelektrode und der Wolframdrahtelektrode getestet. Es wurden von allen Materialien die

Fraktionsabscheidegrade und die entstehenden Druckverluste bestimmt. Aus diesen Ergebnissen konnte dann der Quality Faktor bestimmt werden, um so die Abscheider untereinander zu vergleichen. Da beim Elektroabscheider, wie zu erwarten war, kein Druckverlust messbar war, wurde auf die Berechnung des Quality Faktors des Elektroabscheiders verzichtet. Prinzipiell ist ein hoher Quality Faktor anzustreben.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente konnten zeigen, dass der Abscheidegrad mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit auf den Entstauber abnimmt. Bei Erhöhung der Dicke des Filtermittels bei den filternden Abscheidern ist erkennbar, dass mit zunehmender Lagenanzahl der Abscheidegrad steigt, der Quality Faktor sich aber nicht stark verändert. Bei den filternden Materialien konnte das Dämmmaterial die besseren Abscheidegrade generieren, jedoch hatte das Glasfaservlies, außer der Messung mit einer Lage Glasfaservlies, deutlich höhere Quality Faktoren ergeben.

Bei den Versuchen mit den unterschiedlichen Elektrodentypen schnitt die Sägezahnelektrode knapp besser als die Wolframdrahtelektrode ab. Die Unterschiede in den Abscheidegraden sind aber gering.

Ein Vergleich der filternden Abscheider mit den elektrischen Abscheidern kann nur aufgrund des Abscheidegrades durchgeführt werden. Die Abscheidegrade des Dämmmaterials sind besser als die des Elektroabscheiders mit Sägezahnelektrode. Betrachtet man den Quality Faktor mathematisch steigt dieser beim Elektroabscheider ins unendliche, da Δp ungefähr 0 ist. Damit ist der Elektroabscheider die bessere Methode der Wahl.

Die zusätzliche Beaufschlagung des Rohgases mit Holzasche, ändert wenig an dem Abscheidegrad des Entstaubers. Betrachtet man die Filtrationszeit bis der filternde Abscheider nichts mehr abscheidet, merkt man die zusätzliche Partikelbelastung in einer kürzeren Beprobungszeit, das heißt der Druckverlust steigt deutlich schneller an.

In Zukunft kann der Elektroabscheider in eine Prüfanlage verbaut werden, um so das Realverhalten des Abscheidegrades bei höheren Reingastemperaturen zu testen. Es sollten auch Systeme entwickelt werden, die es ermöglichen Betriebszeiten der Entstauber einzuschätzen. Wenn eine ungefähre Nutzungsdauer bekannt ist, sollte man die Kosten, die durch Wartung, Stromverbrauch beim Elektroabscheider, und Kosten des Filtermittels bei den filternden Entstaubern entstehen abschätzen, um so

nicht nur ein leistungseffizientes Abscheidersystem sondern auch ein kosteneffizientes zu entwickeln.

Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass die verwendete Versuchsanlage schnell, kostengünstig und effizienter als in der Literatur angegeben, arbeitet und gut vergleichbare Ergebnisse liefert. Der Versuchsaufbau ist in größerem Maßstab sicher nicht nur in dieser Pilotanlage nutzbar.

Die erhaltenen Messergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Elektroentstauber mit Sägezahnelektrode das effektivste Mittel der Wahl als nachgeschalteter Entstauber für Kleinfeuerungsanlagen ist. Bevorzugt man aus wirtschaftlicher Sicht einen filternden Entstauber, so ist der Einsatz von Dämmwolle als Filtermittel eine gute Wahl.

7 Literaturverzeichnis

- [1] W. Fritz und H. Kern, Reinigung von Abgasen, Vogel Buchverlag, 1992.
- [2] Deutsches Umweltbundesamt.:
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/schwefeldioxid>.
[Zugriff am 12 07 2017].
- [3] D. H. Possel, „Connexin Medizin,“
<http://www.connexin.de/stickstoffmonoxid.html>. [Zugriff am 19 07 2017].
- [4] „Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie,“ in *Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie für Studenten der Medizin, Veterinärmedizin, Pharmazie, Chemie, Biologie sowie für Ärzte, Tierärzte und Apotheker*, Heidelberg Berlin Oxford, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, pp. 761- 762.
- [5] M. Bank, Basiswissen Umweltchemie, Frankfurt: Vogel, 2007, pp. 471-473.
- [6] N. B. u. R. Bundesministerium für Umwelt, „Umwelt Bundesamt Deutschland,“
Zugriff am 27 10 2017.
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/stickstoffoxide>.
- [7] „Allgemeine und spezielle Pharmakologie und Toxikologie,“ in *allgemeine und Spezielle Pharmakologie und Toxikologie für Studenten der Medizin, Veterinärmedizin, Pharmazie, Chemie, Biologie sowie für Ärzte, Tierärzte und Apotheker, 6. Auflage*, Heidelberg Berlin Oxford, Spektrum Akademischer Verlag, 1996, pp. 756- 759.
- [8] „Chemie.de,“ 20 11 2017.
http://www.chemie.de/lexikon/FI%C3%BCchtige_organische_Verbindingen.html.
- [9] „Gesundheit.gv.at,“ 02 03 2015.
<https://www.gesundheit.gv.at/leben/umwelt/luftschadstoffe/feinstaub>. [Zugriff am 10 05 2017].
- [10] „Umweltbundesamt Deutschland,“ 27 11 2017.:
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/luftschadstoff-emissionen-in->

- deutschland/emission-von-feinstaub-der-partikelgroesse-pm10#textpart-1.
[Zugriff am 01 12 2017].
- [11] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt Perspektiven für Umwelt und Gesellschaft,“
<http://www.umweltbundesamt.at/umwelt/luft/luftschaedstoffe/staub/>. [Zugriff am 10 07 2017].
- [12] G. M. H. S. e. a. Anderl M., „Emissionstrends 1990-2014,“ Umweltbundesamt, Wien, 2016.
- [13] DIN Deutsches Institut für Normung, „Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel EN 481,“ DIN Deutsche Institut für Normung, Berlin, 1993.
- [14] I. Filter, „Know-How: Das große Intensiv-Filter Lexikon der Entschaubung,“
- [15] Umwelt u. Wald Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, „KSG-Fortsetzungsbericht 2016,“ Wien, 2016.
- [16] Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 01 11 2017.
[http://www.richtigheizen.at/fileadmin/site/richtigheizen/Emissionsgrenzwerte_Art._15a_B-VG_Inverkehrbringen_von_Kleinfuerungen__2011_.pdf].
- [17] Ministerium für ein Lebenswertes Österreich, „Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken (2011) Teil D - Prüfintervalle bei bestehenden Kleinf Feuerungsanlagen,“ Wien, 2012.
- [18] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 2*, Lauf a.d. Pegnitz: Springer-Verlag, 1993.
- [19] M. Bohnet, *Mechanische Verfahrenstechnik*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2004.
- [20] G. Mauschitz, *Unterlagen zur Vorlesung Staubabscheiden*, Technische Universität Wien, 2017.
- [21] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnik 2,“ in *Mechanische Verfahrenstechnik Band 2*, Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 24- 28.
- [22] in *Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*, Dortmund, De Gruyter Oldenbourg, 2013, pp. 138-140.

- [23] *BGBI. Nr. 388/1995 Vereinbarung zwischen dem Bund und den Ländern gemäß Art 15a B-VG über die Einsparung von Energie*, Wien: Bundeskanzleramt Österreich, 2017.
- [24] „Österreichischer Kachelofenverband,“ 30.11.2017. [Online]. Available: <https://www.kachelofenverband.at/der-heizkamin/>.
- [25] S. Aigenbauer, W. Moser und C. Schmidl, „Endbericht neue Öfen 2020,“ bioenergy2020+, 2011.
- [26] M. Oser, T. Nussbaumer, P. Müller, M. Mohr und R. Figi, „Grundlagen der Aerosolbildung in Holzfeuerungen,“ Bundesamt für Energie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Verenum, 2003.
- [27] „Kutzner + Weber Innovation- Umwelt- Mensch,“ [Online]. Available: http://kutzner-weber.de/fileadmin/kw_images/k+w_pdf/Partikelabscheider%20Airjekt%20Serie%2025,%2050.pdf. [Zugriff am 03.12.2017].
- [28] S. Kolmanz, „Diplomarbeit Aufbau eines Filtermittelprüfstandes für die Charakterisierung von Schüttungen hinsichtlich ihres Abscheideverhaltens von Nanopartikeln,“ Technische Universität, Wien, 2016.
- [29] [W wie Wissen®, „Video Kaminöfen: Nebenwirkungen der Behaglichkeit,“ 22.10.2016.: <http://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/videos/kaminoefen-entstauben-100.html>. [Zugriff am 03.12.2017].
- [30] D. S. 33999, „Emissionsminderung- Kleine und mittlere Feuerungsanlagen (gemäß 1.BImSchV)- Prüfverfahren zur Ermittlung der Wirksamkeit von nachgeschalteten Staubminderungseinrichtungen,“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2015.
- [31] I. Ilic, „Diplomarbeit Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstandes zur Beurteilung der Emissionsminderung von Abscheidern für Kleinfeuerungsanlagen,“ Technische Universität, Wien, 2017.
- [32] T. Incorporated, „Particle Instruments - Scanning Mobility Particle Scanner,“ USA, 2011.
- [33] G. Mauschwitz, Vorlesungsunterlagen „Partikelmesstechnik,“ TU, Wien, 2016.
- [34] „Principle of SootCast, <http://www.sootgenerator.com/> Schweiz [Zugriff am 02.12.2017].

- [35] „TEER Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe, Aachen,“ *Feinstaubabscheidung an biomassebetriebenen Kleinfueurngsanlagen mit Tiefenfiltern- Praxiserfahrungen*, Bde. %1 von %2Tagungsreader 7. Abscheider- Fachgespräch "Partikelabscher in häuslichen Feuerungen, 8.-9.3. 2016 in Leipzig.
- [36] „Freudenberg Filter,“ 25 11 2017.: https://www.freudenberg-filter.com/uploads/tx_ngdownloads/HT_Filtermatten_DS_02_ST_232_Februar_2015_D_low.pdf.
- [37] „Isover Saint- Gobain,“ 25 11 2017.: www.isover.at/component/itrfiler/?view=download&id=2865.
- [38] „Kutzner + Weber,“ 25 11 2017. http://www.kutzner-weber.de/fileadmin/kw_images/k+w_pdf/Airjekt_deutsch_2016_01.pdf.
- [39] M. Stieß, in *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1 3.Auflage*, Heidelberg, Springer Verlag, 2009, pp. 261- 329.
- [40] Umweltbundesamt, „Emissionsminderung bei Kleinfueurngsanlagen,“ Dessau-Roßlau, 2014.
- [41] Umwelt und Verbraucherschutz Landesamt für Natur, „Gesundheitliche Auswirkungen von Feinstaub und Stickstoffdioxid im Zusammenhang mit der Luftreinhalteplanung,“ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Nordrhein- Westfalen, 2010.
- [42] M. J. Schleiden, „Das Meer,“ Serverus Verlag, Hamburg, 2014.
- [43] Abscheider Entwicklungszentrum, „Minimierung der Feinstaub, CO- und NOx- Emissionen einer mit problematischen Biomassebrennstoffen befeuerten Kleinfueurngsanlage,“ Sulzbach-Rosenberg, 2008.
- [44] Erneuerbare Energie Österreich, „Erneuerbare Energie Österreich,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.erneuerbare-energie.at/biomasse/>. [Zugriff am 18 09 2017].

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mengenverteilung von TSP, PM 10 und PM 2,5 [11]	12
Abbildung 2: Die einatembare, thorakale und alveolengängige Konvention in Prozent der gesamten luftgetragenen Partikeln [13]	13
Abbildung 3: Industriestäube mit den zugehörigen Korngrößenspektren zwischen 0,1 µm bis 1000 µm. [14]	14
Abbildung 4: Fraktionsabscheidegrade unterschiedlicher Staubabscheider in Abhängigkeit von der Korngröße [5]	20
Abbildung 5: Zyklon inklusive Stromlinienverlauf [20]	22
Abbildung 6: Aufbauschema eines Elektroabscheiders	23
Abbildung 7: Prinzip der elektrostatischen Abscheidung [5] S. 582	25
Abbildung 8 : Abscheidemechanismen in der Tiefenfiltration [1] S 42	27
Abbildung 9: Einteilung filternder Abscheider [1] S 41	27
Abbildung 10: Schüttschichtfilter mit Festbett [20]	29
Abbildung 11: kontinuierlich betriebener Schüttschichtfilter	30
Abbildung 12: Funktionsprinzip des Abreinigungsfilters [20]	31
Abbildung 13: Funktionsprinzip des Speicherfilters [22]	32
Abbildung 14: Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten von Filtrationsabscheidern. [14]	33
Abbildung 15: typischer Waschturm [20]	34
Abbildung 16: In Österreich verkaufte Kaminöfen, Herde und Pelletöfen [25]	36
Abbildung 17: Partikelbildung bei der Kohleverbrennung [26]	37
Abbildung 18: Partikelverteilung (Anzahlverteilung) der Staubemission von Holzöfen bei unterschiedlichen Bedingungen (Messungen mit SMPS und OPC) [26]	38
Abbildung 19: Am Markt erhältliches Elektroabscheidersystem [27]	39
Abbildung 20: Kaminaufsatz bei Filtermitteltausch [29]	40
Abbildung 21: Einige Richtlinien und Normen der DIN SPEC 33999	43
Abbildung 22: Beispiel für den Prüfaufbau an Staubabscheidern an handbeschickten Einzelraumfeuerungen ohne eigenes Gebläse [30]	44
Abbildung 23: Schematischer Aufbau des verwendeten Filtermittelprüfstandes	48
Abbildung 24: Foto des aufgebauten Prüfstandes	49
Abbildung 25: Elektroklassierer des differentiellen Mobilitätsanalysators [32]	51
Abbildung 26: Aufbau eines Scanning mobility particle sizers [32]	52
Abbildung 27: Prinzip des CAST-Brenners [34]	53
Abbildung 28: Staubdosierer	54
Abbildung 29: Kalibrationsgerade inkl. Bestimmungsmaß des Staubdosierers	55
Abbildung 30: Filtermittelhalter zur Aufnahme einer 150 mm im Durchmesser bestehenden Filtermittelronde	56

Abbildung 31: Eingebauter Elektroabscheider am Prüfstand	58
Abbildung 32: Elektroabscheider mit Wolframelektrode	59
Abbildung 33: Detailansicht der Sägezahnelektrode	59
Abbildung 34: Typische Partikelgrößenverteilung des Rußes gemessen mit dem SMPS	60
Abbildung 35: Partikelgrößenverteilung der gesiebten Asche, die für die Filteralterung herangezogen wird	61
Abbildung 36: Typische Partikelgrößenverteilung des Holzstaubes und Ruß gemessen mit dem SMPS.....	62
Abbildung 37: Abscheidegrade von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	67
Abbildung 38: Abscheidegrade von 2 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	68
Abbildung 39: Abscheidegrade von 3 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	69
Abbildung 40: Quality-Faktoren von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	70
Abbildung 41: Quality-Faktoren von 2 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	71
Abbildung 42: Quality-Faktoren von 3 Lagen Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	72
Abbildung 43: Abscheidegrade von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	73
Abbildung 44: Quality-Faktoren von 1 Lage Dämmmaterial bei unterschiedlichen Volumenströmen	74
Abbildung 45: Abscheidegrade von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	75
Abbildung 46: Abscheidegrade von 3 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	75
Abbildung 47: Abscheidegrade von 5 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	76
Abbildung 48: Quality-Faktoren von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	77
Abbildung 49: Quality-Faktoren von 3 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	78
Abbildung 50: Quality-Faktor von 5 Lagen Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	79
Abbildung 51: Abscheidegrade von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	80
Abbildung 52: Abscheidegrade von 1 Lage und 2 Lagen Glasfaservlies bei 10m ³ /h Volumenstrom	80

Abbildung 53: Quality-Faktoren von 1 Lage Glasfaservlies bei unterschiedlichen Volumenströmen	81
Abbildung 54: Fraktionsabscheidegrad der Sägezahnelektrode mit Beprobung mit Ruß	82
Abbildung 55: Abscheidegrade der Sägezahnelektrode bei Beladung mit Ruß und Holzasche.....	83
Abbildung 56: Abscheidegrad der Wolframelektrode bei Beladung mit Ruß	84
Abbildung 57: Abscheidegrade der Wolframdrahtelektrode bei Beladung mit Ruß und Holzasche.....	84

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der flüchtigen organischen Verbindungen nach WHO [8].....	11
Tabelle 2: Österreichische Treibhausgasemissionen 2005 und 2014 im Vergleich in Mio t CO ₂ Äquivalent [15]	15
Tabelle 3: Emissionsgrenzwerte für Kleinf Feuerungsanlagen [16]	16
Tabelle 4: Emissionsgrenzwerte für Kleinf Feuerungsanlagen 2 [16]	17
Tabelle 5: Prüfintervalle von bestehenden Kleinf Feuerungsanlagen [17].....	18
Tabelle 6: Wichtige Kenndaten für unterschiedliche Abscheider zur Auswahl für den zu Verwendenden Abscheider. [14].....	21
Tabelle 7: Relative Schadstoffemissionen aus Typenprüfung und Praxisbetrieb [25]	38
Tabelle 8: Messwerte der Kalibrationsgeraden.....	55
Tabelle 9: Technische Daten des Glasfaservlieses [36]	56
Tabelle 10: Technische Daten des Isover Dämmmaterials [37].....	57
Tabelle 11: Technische Daten des AirJet 1 [38]	57
Tabelle 12: Druckverluste von 1 Lage des Dämmmaterials beladen mit Ruß	69
Tabelle 13: Druckverluste von 2 Lagen des Dämmmaterials beladen mit Ruß	70
Tabelle 14: Druckverluste von 3 Lagen des Dämmmaterials beladen mit Ruß	71
Tabelle 15: Druckverluste von Dämmmaterial beladen mit Holzasche und Ruß	73
Tabelle 16: Druckverluste von 1 Lage des Glasfaservlieses beladen mit Ruß	76
Tabelle 17: Druckverluste von 3 Lagen des Glasfaservlieses beladen mit Ruß	77
Tabelle 18: Druckverluste von 5 Lagen des Glasfaservlieses beladen mit Ruß	78
Tabelle 19: Druckverluste des Glasfaservlieses beladen mit Ruß und Holzasche	81