



DIPLOMARBEIT

Experimentelle Untersuchungen zur elektrisch unterstützten Staubfiltration

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs

unter der Leitung von

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wilhelm Höflinger

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften E166

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Henninger

Matrikelnummer: 0325293

Schiffmühlenstraße 96/5

1220 Wien

Wien, am 01. Oktober 2013

Danksagung

Da ich so vielen Menschen dankbar bin die mich auf diesem Weg begleitet haben ist es mir kaum möglich alle namentlich zu erwähnen. Trotzdem möchte ich mich bei ein paar von ihnen besonders bedanken.

In erster Linie bedanke ich mich bei meiner Familie die mich immer unterstützt hat und es mir erst ermöglicht hat diesen Weg einzuschlagen.

Mein besonderer Dank geht auch Kerstin Schustereder, Sejla Kurtovic, Felix Lebl, Mark Berchtold und Fagner Jürgen und vielen mehr mit denen die Studienzeit nicht nur unvergesslich geworden ist, sondern die mit mir viele Höhen und Tiefen durchlebt haben und dabei sowohl in Freundschaft als auch in studienrelevanten Angelegenheiten immer ein offenes Ohr hatten.

Meinen besten Freunden Florian Iser, Christoph Hirtl und Maria Dietrich sowie meiner Freundin Marianne Loserl, welche mir nicht nur durch das Studium geholfen haben sondern mich auch abseits des Studiums immer auf den richtigen Weg gebracht haben.

Kurzfassung

In der heutigen Zeit, in der viele technische Verfahren sehr ausgereift sind, wird nun auch besonders darauf geachtet die Grenzwerte von Schadstoffen einzuhalten und diese zu reduzieren. Diese Arbeit bezieht sich in diesem weitreichenden Gebiet gezielt auf die Einhaltung der Grenzwerte und die Reduzierung von Industriestäuben in einer elektrisch unterstützten Filtration. In der Vergangenheit war es üblich viele industrielle Prozesse und deren Emissionen mittels elektrischer Abscheider zu reduzieren. Durch neue Grenzwerte die immer feinere Partikel limitieren, welche die elektrischen Abscheider nicht mehr einhalten konnten wurden vermehrt Abreinigungsfilter in Betrieb genommen. Diese zeichnen sich aber wegen des höheren Druckverlustes und den Abreinigungsvorgängen durch einen erhöhten Energiebedarf aus. Desweiteren sind sie durch die hohe Staubbelastung in ihrer Standzeit beeinträchtigt. Aus diesen zwei Überlegungen entstand die Theorie, dass durch eine Kombination beider Filtrationsmechanismen das allgemeine Filtrationsverhalten signifikant verbessert werden kann. Aus dieser Theorie entstand das Projekt der Hybridfiltration, bestehend aus einem elektrischen Abscheider und einer anschließenden Abreinigungsfiltration. Die erste Einheit, der Elektroabscheider, sollte die Mehrzahl der Partikel abscheiden und agglomerieren. Die zweite Einheit, der Abreinigungsfilter sollte vor allem die in den Feinstaubbereich reichenden Partikel reduzieren und damit die Reingaskonzentration der Emissionen auf ein Minimum senken. Realisiert wurde das Projekt durch die Dissertation von Dr. Felix Lebl [1]. In dieser Arbeit wurde ein Versuchsstand gebaut, welcher für die Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit zur Verfügung stand. Die genauen Untersuchungen lassen sich wie folgt beschreiben.

- Elektroabscheider: ohne Aufladungen, Aufladungen: unipolar negativ, unipolar positiv, bipolar sowie mit DC Wechselfeld
- Filtermedien: Nadelfilz, Membranfilter
- Staub: Teststaub Pural NF
- Filtrationsgeschwindigkeiten: 2m/min, 3m/min, 4m/min, 5m/min

Die Aufgabe war, aus der Variation dieser Parameter den Restdruckverlauf, die Dauer der Zyklen sowie die Partikelanzahl im Reingas zu untersuchen und auszuwerten. Um die Daten bezüglich ihrer Vorteile zu bewerten, wurden alle Versuche auch ohne Aufladung durchgeführt um auswertbare Referenzwerte zu bekommen.

Grundlegend kann man sagen, dass alle Aufladungsarten zu einer Verlängerung der Zykluszeiten und einer Verringerung der Partikelanzahl im Reingas führten. Die Partikelanzahl wurde in einem Bereich von $0,3 - 17\mu\text{m}$ gemessen. Vor allem die Partikel im Bereich von $> 200\mu\text{m}$ wurden in dem elektrischen Abscheider abgeschieden. Dies erlaubt längere Filtrationszeiten und damit auch längere Standzeiten sowie Energieeinsparungen in den Abreinigungsfiltern. In Bezug auf den Restdruckverlust konnte keine Verbesserung festgestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	5
2. Staubabscheidende Techniken.....	8
2.1 Elektroabscheider	8
2.1.1 Grundlagen.....	8
2.1.2 Wirkungsweise	8
2.1.3 Entstehung der Ladungen	10
2.1.4 Strom – Spannung – Beziehungen:.....	11
2.1.5 Aufladung der Partikeln	11
2.1.6 Abscheidung der Partikeln	12
2.2 Abreinigungsfilter.....	12
2.2.1 Grundlagen der Filtertechnik	12
2.2.2 Partikelabscheidung.....	13
2.2.3 Regenerierung und Druckverlust bei online Abreinigung	14
3. Elektrisch unterstützte Filtration.....	20
3.1 Agglomeration.....	20
3.1.1 Elektrisch induzierte Agglomeration	21
3.2 Anlegen eines elektrischen Feldes am Filtermedium	22
3.3 Hybridfiltration.....	22
4. Zielsetzung der Arbeit.....	24
5. Ausführung der Versuche	25
5.1 Laboranlage und Versuchstand	25
5.1.1 Fließschema.....	26
5.1.2 Versuchsaapparatur	27
5.1.3 Teststaub Pural NF.....	28
5.1.4 Staubdispergierer	30
5.1.5 Elektrische Einheit	31
5.1.6 Filtermittelprüfstand	34
5.1.7 Filtermedien	35
5.1.7.1 Testfilter.....	35
5.1.7.2 Absolutfilter	36

5.2 Steuergeräte	37
5.2.1 Hochspannungsnetzgeräte	37
5.2.2 Wechselfeldgeneratoren	38
5.3 Messgeräte	39
5.3.1 Welas® digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem	39
5.3.2 Waagen	42
5.3.3 Bestimmung der Umwelteinflüsse	43
5.4 Software Palas MMTC	43
5.5 Versuchsdurchführung	45
6. Auswerteverfahren	48
6.1 Verteilungen und Charakterisierung der Partikel	48
6.2 Zyklusdauer	50
6.3 Restdruckverlust	51
6.4 Partikelanzahl im Reingas	52
7. Auswertungen	53
7.1 Übersicht der Versuche	53
7.2 Vergleich der Zyklusdauer bei Membranfiltern.....	54
7.2.1 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit	54
7.2.2 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten	56
7.2.3 Diskussion der Zyklusdauer bei Membranfiltern	58
7.3 Vergleich des Restdruckverlustes bei Membranfiltern.....	59
7.3.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten	59
7.3.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten	61
7.3.3 Diskussion des Restdruckverlustes bei Membranfiltern	63
7.4 Vergleich des Restdruckverlustes bei Nadelfilzfiltern.....	64
7.4.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten	64
7.4.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten	66
7.4.3 Diskussion des Restdruckverlustes bei Nadelfilzfiltern	68

7.5 Vergleich der Zyklusdauer bei Nadelfilzfiltern	69
7.5.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten	69
7.5.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten	71
7.5.3 Diskussion der Zyklusdauer bei Nadelfilzfiltern	73
7.6 Partikelanzahl im Reingas	74
7.6.1 Partikelanzahl Nadelfilz	74
7.6.1.1 Diskussion der Partikelanzahl im Nadelfilz	75
7.6.2 Partikelanzahl Membran	76
7.6.2.1 Diskussion der Partikelanzahl in Membranfilter	77
8. Zusammenfassung	78
Literaturverzeichnis	79
Abbildungsverzeichnis	81
Tabellenverzeichnis	83
Diagrammverzeichnis	83
Anhang:	86
A1 Langzeitversuche des Hybridfilters	86
A2 Staubwiderstand	88

1. Einleitung

In vielen Untersuchungen sowie in den Medien wurde in den letzten Jahren immer mehr auf die Problematik des Feinstaubes bzw. Schwebstaubes hingewiesen.

Diese Stäube haben nachgewiesen Einfluss auf die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen und der gesamten Umwelt. Diese Auswirkungen reichen von (vorübergehenden) Beeinträchtigungen der Lungenfunktion bis zu zuordenbaren Todesfällen, vor allem aufgrund von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Nach einer aktuellen Einschätzung der Weltgesundheitsorganisation (WHO) gehört die Außenluftbelastung zu jenen Umwelteinflüssen, die die größten gesundheitlichen Auswirkungen in westlichen Industrieländern verursachen. [2]

Das Risiko einer Erkrankung hängt von der Partikelgröße und von ihrer Eindringtiefe in den menschlichen Atmungstrakt ab. Die Einteilung der Stäube erfolgt anhand ihrer Größe und ihrer Größenverteilung. Der Schwebstaub, im englischen TSP (Total Suspended Particulates), wird desweiteren nach seiner Größenverteilung PM 10 und PM 2,5 (Particel Matter) eingeteilt. PM 10 und PM 2,5 nehmen sehr stark Einfluss auf die Gesundheit. Vor allem Herz-Kreislaufkrankheiten und Atemwegserkrankungen treten vermehrt auf und die allgemeine Lebenserwartung wird dabei reduziert. [2]

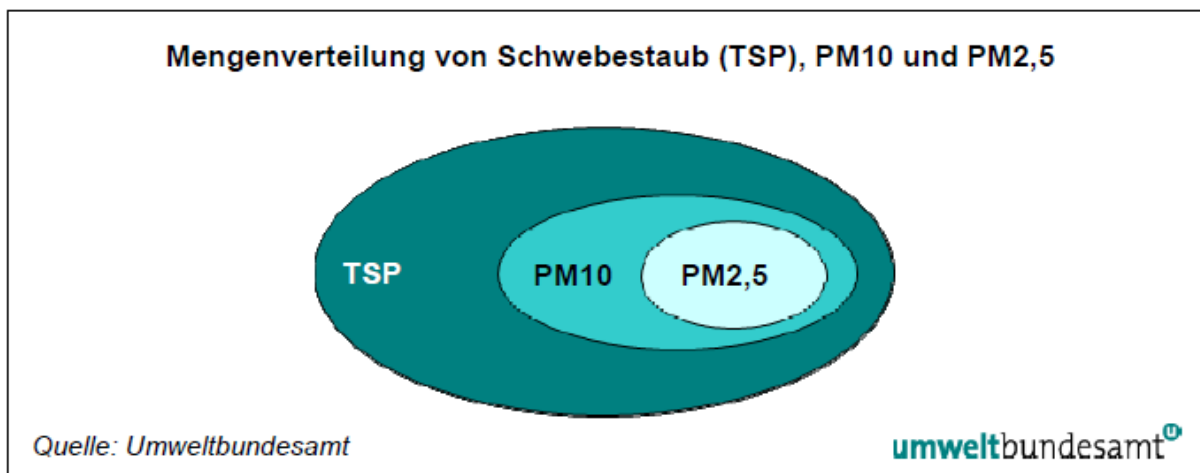


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mengenverteilung von TSP, PM 10 und PM 2,5 [3]

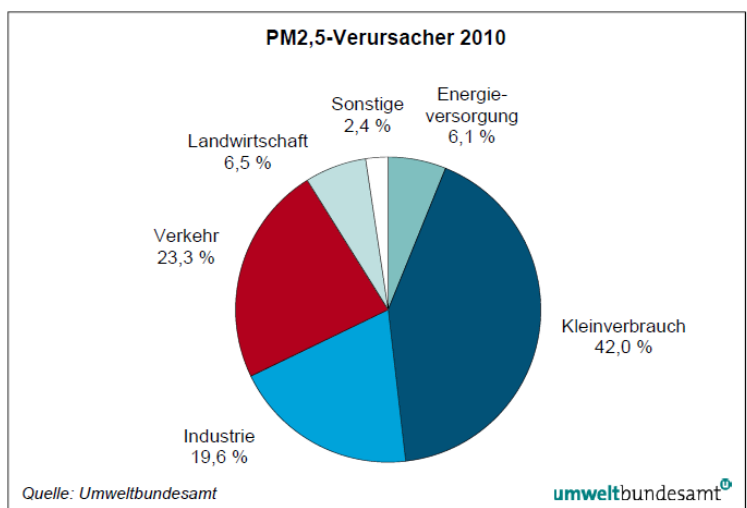
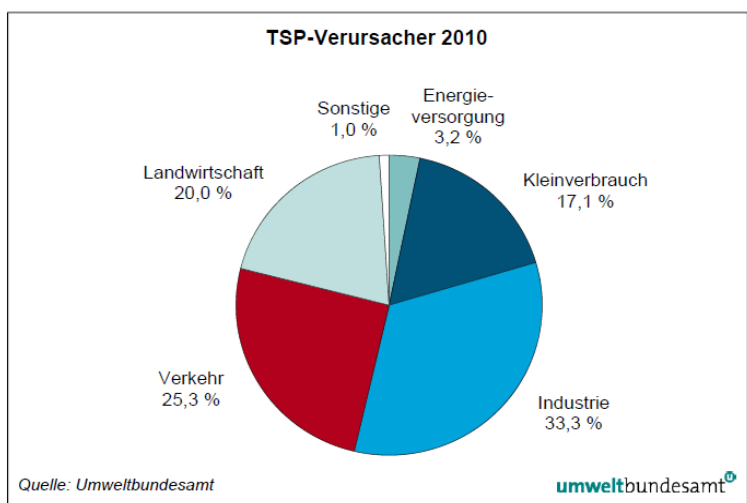
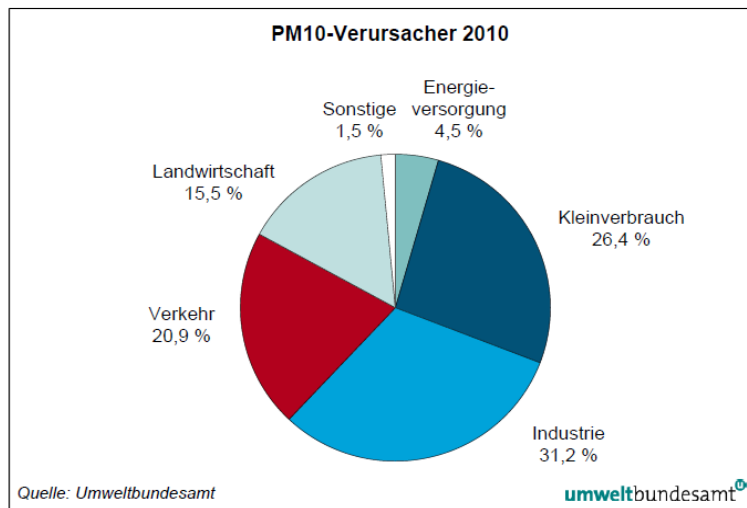


Abbildung 2: Anteile der Verursachersektionen in Österreich [3]

Wie in den Abbildungen ersichtlich, ist es vor allem die Industrie, die mit einem durchschnittlichen Anteil, von einem Drittel an Staubemissionen, einen starken Einfluss hat. Um dem entgegen zu wirken, wurden die Grenzwerte für Feinstaubbelastungen immer niedriger gesetzt. Die Umsetzung dieser Grenzwerte wird aber mit den früher üblichen Elektroabscheidern immer unrealistischer weswegen sich die Abreinigungsfiltration in den letzten Jahren durchgesetzt hat. Bei momentan bestehenden Anlagen mit elektrischen Abscheidern ist es möglich diesen als Vorabscheider zu verwenden und einen Abreinigungsfilter nach zu schalten um die Grenzwerte zu erreichen. Die Kombination dieser Entstaubungstechnik nennt man „elektrisch unterstützte Filtration“ oder auch „Hybridfiltration“. Das Verhalten der Filtration in dieser Kombination bringt viele Vorteile. Die Abreinigungsintervalle sinken und damit steigt die Lebensdauer der Filtermedien. Elektrofilter haben ein gutes Abscheideverhalten bei größeren Partikeln, sehr feine Partikel hingegen werden nur schlecht abgeschieden. Ultrafeine Partikel, welche nicht vom Elektroabscheider abgeschieden werden, können mit Hilfe der Abreinigungsfiler abgefangen werden und damit die Reingaskonzentration senken. Größere Partikel, welche aber auch als Filterhilfsmittel wirken, verschlechtern beim Ausbleiben die Effizienz der Abreinigungsfiler. Wenn diese fehlen wird der Aufbau eines Filterkuchens behindert und damit wird die Lebensdauer beeinträchtigt. Dieses feine Spiel zwischen Vorteilen und Nachteilen bei geringen Veränderungen wurde in dieser Arbeit in Form von Restdruckverlust, Zyklusdauer sowie Partikelkonzentration im Reingas untersucht und ausgewertet.

2. Staubabscheidende Techniken

2.1 Elektroabscheider

2.1.1 Grundlagen

Elektrische Abscheider – auch Elektroabscheider oder Elektrofilter genannt - gehören seit Jahrzehnten zu den wichtigsten Apparaturen zur Abscheidung von Feststoff- und Flüssigkeitsteilchen aus strömenden Gasen. Sie werden bevorzugt zur Reinigung großer Gasvolumenströme eingesetzt und zeichnen sich durch einen hohen Trenneffekt, auch im Bereich sehr kleiner Teilchenabmessungen und durch einen im Vergleich zu anderen Abscheidearten geringen Energiebedarf aus. Elektroabscheider sind Diffusionsabscheider, d.h. auch submikrone Partikel werden aufgeladen und abgeschieden. Man unterscheidet trockene und nass arbeitende Elektrofilter, bei trockener Arbeitsweise können solide Partikel, bei nasser Arbeitsweise können solide als auch fluide Teilchen abgeschieden werden. Wichtige Anwendungsgebiete und Industriebereiche sind: Kraftwerke, Stahlwerke, Müllverbrennungsanlagen, Glaswannen, Zementwerke, nichteisenmetallurgische Gebiete (Kupfer, Zink, Aluminium) und die chemische Industrie. Die abzuscheidenden Teilchen können sein: Flugaschen, sorbtiv wirkende Komponenten, Wassertröpfchen, Teernebel, teigige und klebrige Partikeln, die mit Hilfe eines Flüssigkeitsfilms von der Niederschlagselektrode abgewaschen oder mechanisch entfernt werden. Elektrofilter arbeiten bei industriellen Anwendungen üblicherweise in einem Temperaturbereiche von 80°C bis 450°C und in einem Druckbereich von -100 bis +100mbar. Bei speziellen Anwendungen z.B. kombinierte Kraftwerkprozesse sogar bis 800°C allerdings bei Drücken über 6bar. [4]

2.1.2 Wirkungsweise

Ein Elektrofilter nützt die elektrische Kraftwirkung, welche bei der Abscheidung von Teilchen in einem elektrischen Kraftfeld entsteht. Die Partikeln werden zuerst aufgeladen und danach werden die aufgeladenen Partikel in einem elektrischen Feld abgeschieden. Die abgeschiedenen Partikel werden anschließend aus dem durchströmten Abreinigungsraum entfernt.

Natürliche Aufladungen wie sie in der Natur durch Reibung, Flammenionisation und kosmischer Strahlung entstehen, sind zu gering für ausgiebige Reinheitsgrade. Die beste Methode um Teilchen künstlich aufzuladen, ist der Einfluss von Koronaströmen in einem elektrischen Feld. (siehe 2.1.3 Entstehung der Ladungen) Das elektrische Feld wird meist zwischen einem dünnen Draht (Sprühelektrode) und einer Plattenelektrode (Niederschlagselektrode) angelegt.

Durch Einleiten einer negativen Hochspannung (üblich in Industrieabscheidern) an der Sprühelektrode entstehen positive und negative Ionen. Die positiven Ionen wandern zur Sprühelektrode und die negativen Ionen zur Plattenelektrode. Obwohl gleich viele positive als auch negative Ionen gebildet werden, sind in dem Raum zwischen Draht und Platte 99% negative Ionen. Wenn nun ein Staubpartikel das elektrische Kraftfeld durchwandert, wird dieser von einer negativen Elektronenflut aufgeladen und zu der Platte hingezogen. Die an den Niederschlags Elektroden gebildete Staubschicht muss dann in bestimmten Intervallen abgetragen werden. Meist wird das durch mechanisches Klopfen oder Rütteln umgesetzt, wobei der Staub, durch die Schwerkraft bedingt, in Sammelräume abfällt. Der Gasstrom wird dabei nicht abgeschaltet und das gesamte Verfahren ist damit kontinuierlich. [5]

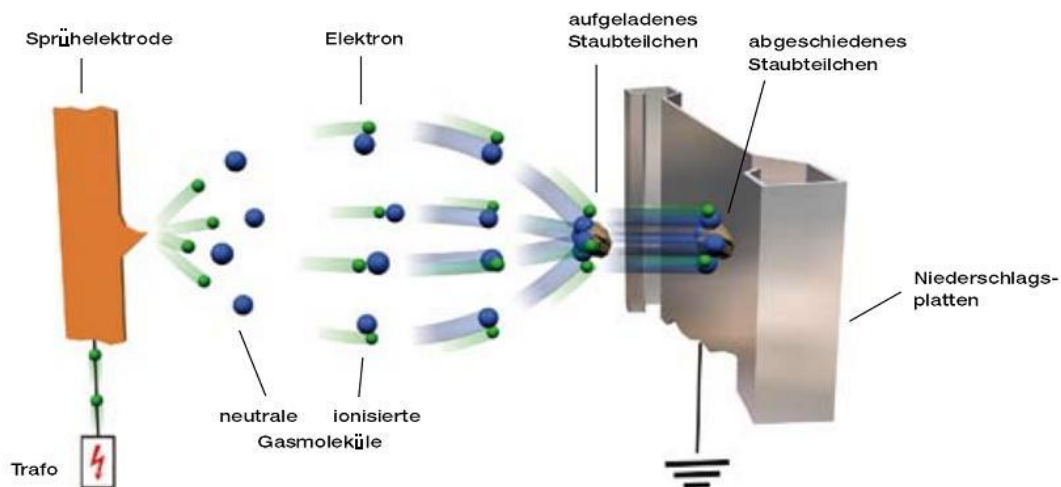


Abbildung 3: Das Prinzip der negativen unipolaren elektrostatischen Abscheidung [6]

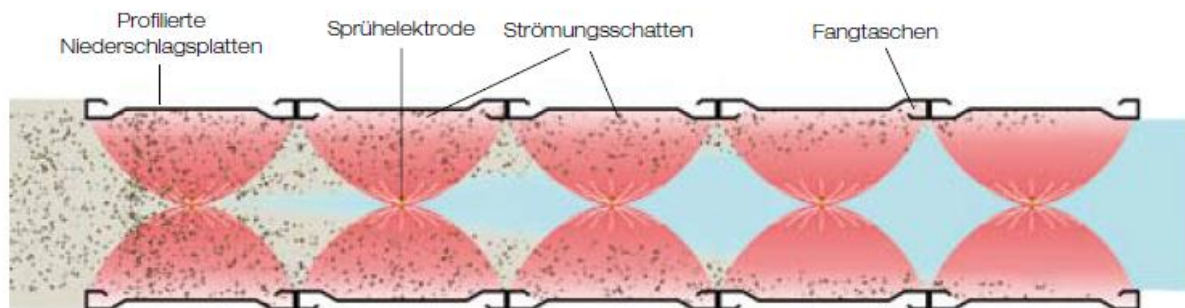


Abbildung 4: Wirkweise an den Plattenelektroden [6]

2.1.3 Entstehung der Ladungen

Durch Anlegen einer Spannung, über der Koronaeinsatzspannung und unter der Durchbruchfeldstärke an die Elektrode, erfolgt eine Ionisation des Gases in der Nähe der Elektrode. Diese Ionisation (Ionen sind Ladungsträger) wird durch ein schwaches Leuchten sichtbar und nennt sich Korona. Dabei gibt es Unterschiede zwischen positiver und negativer Korona.

Negative Korona:

Die Ladungsträger werden dadurch erzeugt, dass mit einer hohen Feldstärke in der unmittelbaren Nähe der Sprühelektrode die im Gas vorhandenen Elektronen e^- zur Niederschlagslektrode beschleunigt werden. Dabei stoßen diese mit anderen Gasmolekülen M (neutrale Moleküle) zusammen und bringen diese durch Stoßionisation zum Ionisieren M^+ (positive Ionen). Bei negativer Korona wandern also die negativen Ionen zur Niederschlagslektrode und die positiven Ionen zur Sprühelektrode.



Bei der Wanderung wird eine Elektronenlawine ausgelöst, die sich zu Niederschlagslektrode bewegt. Für eine Erhaltung der Korona müssen weitere Elektronen erzeugt werden. Dies passiert durch die von Stößen hoch angeregten Gasionen durch Photoionisation. Positive Ionen entstehen nur in der Nähe der Sprühelektrode wo die Feldstärke ausreichend hoch ist, um die Elektronen auf Ionisierungsenergie zu bringen. Bei den beschleunigten positiven Ionen, zur Sprühelektrode hin, werden dort beim Auftreffen ebenfalls weitere Elektronen freigesetzt. Diese freigesetzten Elektronen werden auf dem Weg zur Niederschlagslektrode von elektronegativen Gasmolekülen eingefangen, welche damit zu negativen Gasionen werden. Elektronegative Gasmoleküle sind zum Beispiel: O_2 , SO_2 , Cl_2 , HF . Durch physikalische Besonderheiten besitzt die negative Korona eine höhere Durchbruchspannung und lässt sich damit bei höheren Spannungen und Strömen betreiben, das wiederum zu einem besseren Abscheidegrad führt. Im Gegensatz zur positiven Korona entsteht Ozon, welches reizend auf die Atemwege wirkt. Daher setzen sich in der Industrie negative und in der Raumlufttechnik eine positive Korona durch.

Positive Korona:

Wanderung der Elektronen e^- zur positiven Sprühelektrode. Es entsteht ebenfalls eine Elektronenlawine, welche weitere Teilchen ionisiert und neue Elektronen e^- erzeugt. Während die Elektronen e^- von der Sprühelektrode aufgesaugt werden, wandern die positiven Ionen zur Niederschlagslektrode.

2.1.4 Strom – Spannung – Beziehungen:

Die Charakteristik einer Korona hängt nicht nur von den Beziehungen zwischen Strom und Spannungen ab, sondern auch von vielen anderen Faktoren. Beispiele dafür sind die Gaszusammensetzung, der Gasdruck, die Gastemperatur und der Staubgehalt des Gases. Bei technischen Elektrofiltern versucht man immer nahe an der Durchschlagsgrenze (Stromüberschläge zwischen den Elektroden) zu arbeiten. Wie zuvor schon erwähnt, bedeuten höhere Ströme und Spannungen bessere Abscheidegrade. Deswegen wird versucht mit möglichst hohen Koronastromen zu arbeiten. [5] [7]

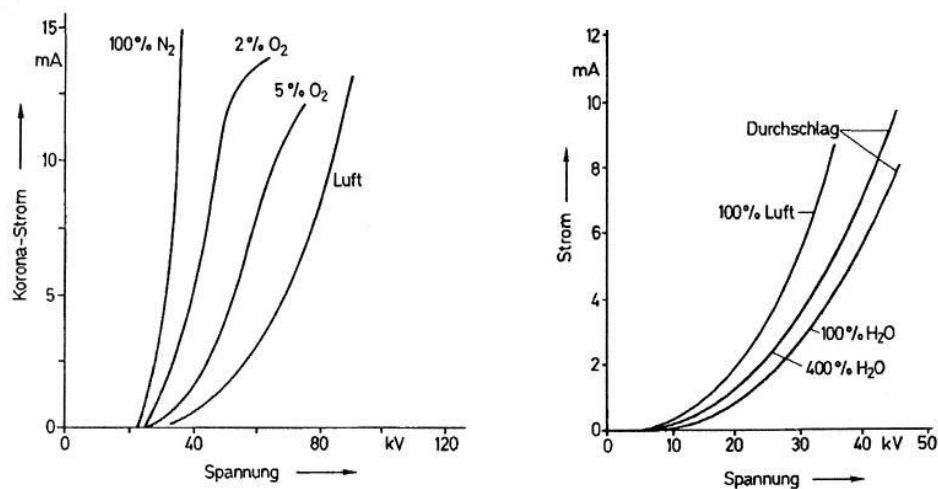


Abbildung 5: Strom – Spannung – Charakteristiken der negativen Korona in Stickstoff-Sauerstoff – Gemischen und in Luft/Wasser-Gemische bei 200°C und Atmosphärendruck [8]

2.1.5 Aufladung der Partikeln

Die Anlagerung der Ionen an die abzuscheidenden Teilchen erfolgt nach dem Prinzip der Feld- und Diffusionsaufladung.

Feldauffladung:

Bewegen sich Ladungsträger entlang elektrischer Feldlinien zur Partikeloberfläche spricht man von Feldauffladung. Treffen sich ein Partikel und ein Ladungsträger, so wird der Partikel aufgeladen. Die dabei entstehenden geladenen Partikel bauen ein elektrisches Gegenfeld (Coulomb – Kräfte) auf, das bei einer gewissen Ladungszahl kein weiteres Auftreffen von Ladungen zulässt. Dieser Mechanismus ist für allem für Partikel $< 0,5 - 1\mu\text{m}$ von Bedeutung.

Diffusionsaufladung:

Kommen Ladungsträger durch die ungerichtete thermische Eigenbewegung mit Partikeln zusätzlich in Kontakt, spricht man von Diffusionsaufladung. Diese Aufladung ist unabhängig von der Existenz eines elektrischen Feldes. Dieser Mechanismus ist vor allem für Partikel $x < 0,2\mu\text{m}$ von Bedeutung. [7] [9] [11]

2.1.6 Abscheidung der Partikeln

Das Wandern der Partikel zur Niederschlagselektrode geschieht durch eine elektrische Kraftwirkung auf die geladenen Partikel in einem elektrischen Feld. Diese Kraft ist direkt proportional der Ladung und der Feldstärke in Richtung des elektrischen Feldes. Das ist auch der Grund warum hohe Spannungen verwendet werden. [7]

2.2 Abreinigungsfilter

2.2.1 Grundlagen der Filtertechnik

Zur Abtrennung fester und auch flüssiger Partikel aus einem Medium werden sehr häufig filternde Abscheider verwendet. Ein wesentliches Merkmal für alle Filter und Abscheider ist das Bestehen verschiedener Fasern oder Körner mit durchgehenden Hohlräumen. Das zu reinigende Medium strömt in den Filter. Dabei finden zwei verschiedene Abscheideprozesse statt. Der eine Prozess findet im Inneren des Filters statt und wird Tiefen- oder Speicherfiltration genannt. Bei dem anderen Prozess bildet sich an der Oberfläche des Filters eine Schicht aus den Partikeln, welches dann als eigenes Filtermedium wirkt. Solche Filter werden Abreinigungs - oder Oberflächenfilter genannt. Zu der Gruppe der Tiefenfilter zählen meist Filter aus synthetischen Fasern welche nur mit geringer Staubbelastung arbeiten und danach einfach entsorgt werden. Oft kommen sie in der Klimatechnik zum Einsatz.

Typische Oberflächenfilter sind Schlauch-, Taschen-, Patronen- und Kassettenfilter, aber auch Sinterkeramik oder Membranen arbeiten nach dem Prinzip der Oberflächen Filtration.

In vielen Bereichen der Industrie sind die Entstaubungstechniken durch Abreinigungsfilter nicht mehr wegzudenken. Vor allem durch die erhöhten Auflagen an Emissionengrenzwerten reichen die früher verwendeten Elektrofilter und Gaszyklone nicht mehr aus und werden oft durch Schlauchfilter ersetzt. Typische Einsatzbereiche finden sich in der Zement-, Kalk und Kohleindustrie. Die Grenzen dieser Filter werden oft durch hohe Gastemperaturen ($> 300^\circ\text{C}$), chemisch aggressive Stoffe sowie klebrige und sehr kleiner ($<1\mu\text{m}$) Partikeln erreicht. Selbst durch die Anpassung der Filtermedien an die Aufgaben und durch die ständigen

periodischen Regenerierungen des Filtermediums, kommt es oft zu nicht vertretbaren Betriebskosten. [4]

2.2.2 Partikelabscheidung

Die Abscheidung der Partikel erfolgt auf zwei verschiedene Arten. Die erste ist die Verstopfungsphase. Dabei werden die meisten Partikel im Inneren des Filters abgeschieden und eingelagert. Der Anstieg des Druckverlustes ist progressiv. Bei der zweiten Phase kommt es zu einem Aufbau eines sogenannten Filterkuchens, welcher schichtweise an der Oberfläche entsteht. Diese Phase ist gekennzeichnet durch einen linearen Anstieg des Druckverlustes. Die Verstopfungsphase wird nicht bevorzugt und es wird sogar versucht diese Phase, mittels Modifikationen an den Oberflächen der Filtermedien, schnell zu durchlaufen.

Die Abscheidung im Inneren des Filters kann auf vier verschiedene Mechanismen zurückgeführt werden. (siehe *Abbildung 6*) In einem neuen unbestaubten Filtermedium wandern die Partikel in der Verstopfungsphase ins Innere des Filters und werden bevorzugt in den oberen Kollektorschichten festgehalten. Die Kollektoren bestehen aus Körnern von Schüttungen oder aus Fasern eines Vlieses bzw. eines Filzes. Auf Grund der kleinen Ausmaße der Teilchen kann man die Schwerkraft vernachlässigen. Die eigentlichen Kräfte bestehen aus:

- Diffusion D
- Trägheit T
- Sperreffekt S
- Elektrostatik E

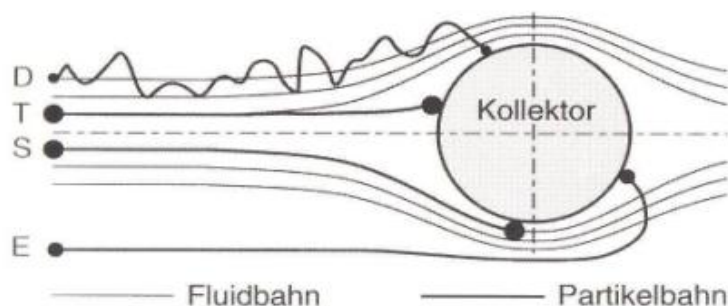


Abbildung 6: Schematische Darstellung der vier Mechanismen die zu einem Kontakt zwischen Partikel und Kollektor führen. [4]

Weitere maßgebende Größen für die Partikelabscheidung sind:

Filteranströmgeschwindigkeit, Rohgasbeladung, Partikelgrößenverteilung des Staubes, Kollektordurchmesser, elektrostatische Wechselwirkungen, physikalische Eigenschaften des Trägertropfens sowie Filtermedium und Art der Abreinigung.

Die Abscheidung an der Oberfläche des Filters, also die zweite Phase beginnt, wenn sich im Inneren des Filters ein gesättigter Zustand einstellt. Er startet mit einer dünnen Schicht an der Oberfläche und wächst zu einer dickeren Schicht, dem sogenannten Staubkuchen heran. Dieser Kuchen ist dann das filternde Medium. Dieser Effekt tritt vor allem durch die geometrische Sperrwirkung im Kuchen auf. Mit steigender Kuchenhöhe steigt auch der Druckverlust an.

Ein Durchwandern von Partikeln kann man dadurch erklären, dass sich in der ersten Phase ohne Staubkuchen, die Partikeln durch den Filter hindurch bewegen. Außerdem ist es bei sehr grobkörnigen Stäuben möglich, dass sich kleinere Teilchen durch die Hohlstellen bewegen können. Vor allem bei der Druckstoßabreinigung kommt es vor, dass schon bereits abgeschiedene Partikel sich nochmals lösen und durch den Filter wandern. Im Allgemeinen ist dieses Wechselspiel ein sehr komplexer Vorgang und wissenschaftlich noch nicht ganz geklärt. Wie auch schon bei der inneren Abscheidung, kommen hier noch die Agglomeration und die Einwirkung von elektrischen Feldern als maßgebende Größen hinzu. [4] [7] [8] [11]

2.2.3 Regenerierung und Druckverlust bei online Abreinigung

Die Reingaskonzentration ist zu Beginn eines Filterprozesses hoch. Erst nachdem sich im Inneren die ersten Einlagerungen stabilisiert haben, beginnt der Aufbau eines Staubkuchens. Dieser Kuchen wächst kontinuierlich an und damit steigt auch der Druckverlust zwischen Rohgas – und Reingasseite. Nachdem ein gewisser Druckverlust Δp_v erreicht ist, wird der Kuchen abgereinigt. Die übliche Vorgangsweise ist die Reinigung durch eine Druckstoßregenerierung. Dabei wird das Filtermedium gegen die Strömungsrichtung mit einem Druckluftimpuls beschleunigt. Der Abwurf kann auf drei Grundmechanismen zurückgeführt werden. (siehe *Abbildung 7*)

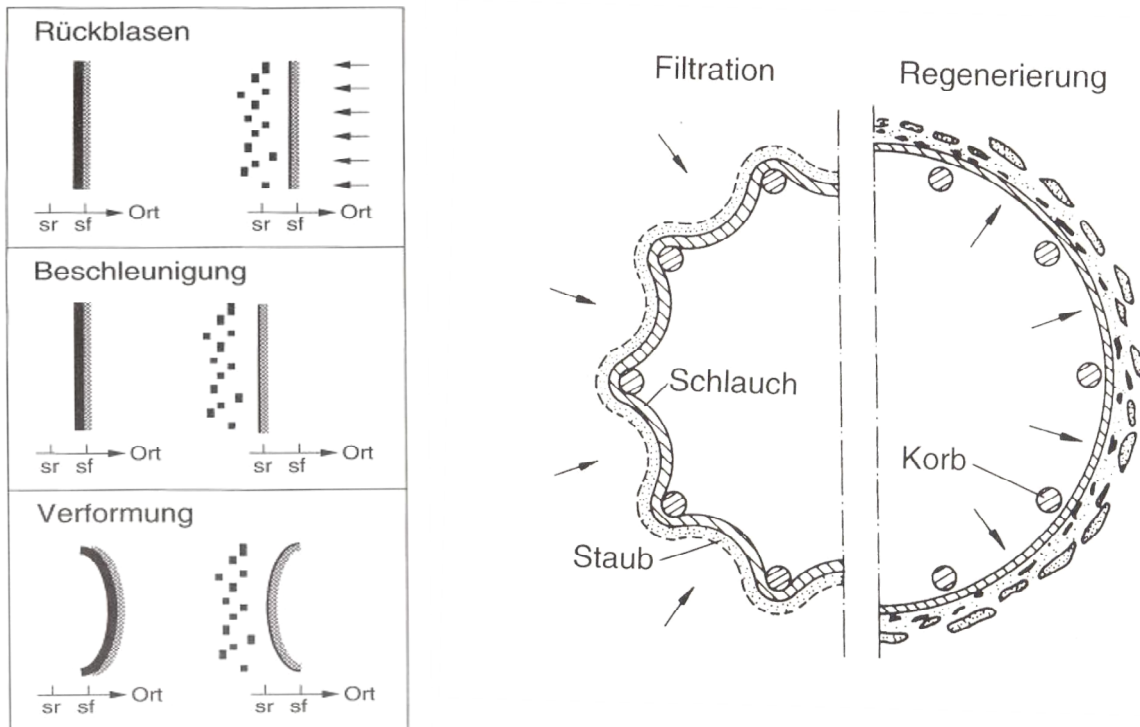


Abbildung 7: Drei wesentliche Mechanismen bei der Regenerierung flexibler Filtermedien. S_r und S_f markieren die Positionen bei Regeneration und Filtration links, Schnitt durch einen Filterschlauch samt Stützkorb während der Abreinigung rechts [4]

Nach der Regenerierung bildet sich sofort wieder ein neuer Kuchen. Jeder dieser Zyklen beeinträchtigt die Lebensdauer eines Filters, steigert den Restdruckverlust (siehe *Abbildung 9*), den Energiebedarf und damit die Betriebskosten. Außerdem kommt es zu einem Konzentrationsanstieg auf der Reingasseite nach jeder Abreinigung. Durch den Luftstrahl ($t=0,2s$) bei der Abreinigung baut sich im Schlauch ein Überdruck auf (siehe *Abbildung 8*), dadurch wird das Filtermedium nach außen beschleunigt und der Kuchen abgeworfen. Am Ende der Regenerierung baut sich wieder ein Unterdruck auf und der Schlauch wird an den Stützkorb zurückgeworfen. Dabei lösen sich Partikel im Inneren oder auf der Oberfläche welche dann zur Reingasseite wandern. Vor allem bei einer online Abreinigung (automatische Abreinigung bei Erreichen eines voreingestellten Maximaldruckes) mit engeren Intervallen kann es hier zu einer beachtlichen Erhöhung der Reingaskonzentration kommen. *Abbildung 8* zeigt den Anstieg der Partikel bei der Erstbestäubung und den weiteren Verlauf bei online Regeneration für Oberflächenfilter.

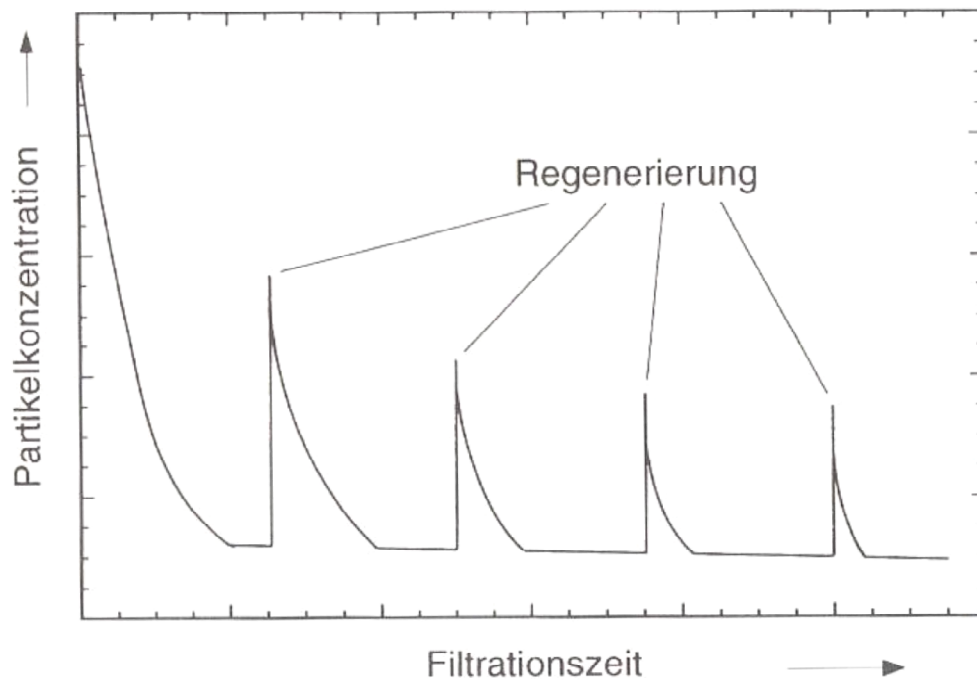


Abbildung 8: Schematischer Verlauf der Partikelkonzentrationen im Reingas bei online Regenerierung und Oberflächenfilter [4]

Wie im Diagramm ersichtlich, nimmt die Partikelkonzentration stetig ab. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Filter mit jedem Zyklus immer mehr Partikeln in den Filter einlagern und sich dieser dadurch nicht mehr vollständig regenerieren lässt. Gleichzeitig nehmen damit auch der Druckverlust und der Restdruckverlust zu. Der Druckverlust ist gerade bei Oberflächenfilter von sehr großer Bedeutung. Durch die Einlagerung verbleibender Partikel nach der Regenerierung, ist nach jedem Abreinigungszyklus auch ein Anstieg des Druckverlustes zu verzeichnen. Diese Einlagerungen sind für die Bildung eines neuen Kuchens erforderlich, bedeuten aber auch einen höheren Energieaufwand für jede Regenerierung. Ab einer gewissen Anzahl von Zyklen geht das Verhalten in einen instabilen Betrieb über. Die Anzahl der Zyklen wird meist aus Erfahrungen oder Versuchen ermittelt. [4]

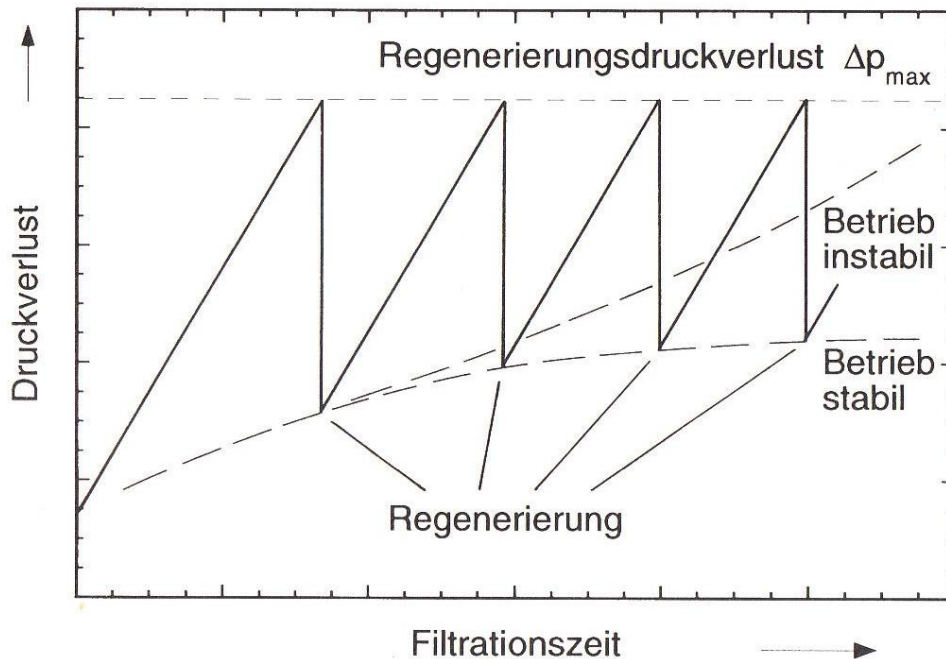


Abbildung 9: Schematischer Verlauf des Druckverlustes eines online regenerierten Oberflächenfilters bei konstanter Anströmgeschwindigkeit [4]

Die Bestimmung des Druckverlustes hingegen kann aus Modellüberlegungen beschrieben werden. Die Ansätze müssen aber empirisch ermittelt werden. Aus der Betrachtung des Druckverlustes einer Periode lässt sich der Gesamtdruckverlust ableiten. Grundlage bildet das Gesetz von Darcy für $Re < 1$. Man geht davon aus, dass sich der Gesamtwiderstand aus dem Druckverlust des Filtermediums und des Filterkuchens zusammensetzt. [7]

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (1)$$

$$\Delta p_{ges} = \frac{\mu}{B_1} L_1 \vartheta + \frac{1}{B_2} \mu L_2 \vartheta \quad \text{mit} \quad L_2 = \frac{c \vartheta t E}{\rho_p (1 - \varepsilon)} \quad (2)$$

$$\Delta p_{ges} = \frac{\mu}{B_1} L_1 \vartheta + \frac{\mu}{B_2} \frac{W}{\rho_p (1 - \varepsilon)} \vartheta^2 \quad (3)$$

$$\Delta p_{ges} = K_1 \vartheta + K_2 W \vartheta^2 \quad (4)$$

- p_{ges} = Gesamtdruckverlust des mit Staubpartikeln versetzten Filtermediums inklusive des Druckverlusts des Staubkuchens [N/m²]
- ϑ = Filtrationsgeschwindigkeit [m/s]
- W = Flächenmasse des Staubkuchens [kg/m²]
- K_1 = Restwiderstand des Filtermediums mit den eingelagerten Staubpartikeln nach der Abreinigung [m⁻¹]
- K_2 = Spezifischer Filterkuchenwiderstand [m/kg]
- μ = dynamische Viskosität des Gases [kg/(m*s)]
- B_1 = Durchlässigkeit des Filtermediums mit eingelagerten Staubpartikeln [m²]
- B_2 = Durchlässigkeit des Staubkuchens [m²]
- L_1 = Dicke des Filtermediums [m]
- L_2 = Dicke des Staubkuchens, berechnet sich aus der Massenbilanz [m] $L_2 = \frac{c\vartheta tE}{\rho_p(1-\varepsilon)}$
- ε = Porosität des Staubkuchens [-]
- ρ_p = Feststoffdichte der Staubpartikel [kg/m³]
- c = Staubkonzentration [mg/m³]
- E = Gesamtabseidegrad [-]
- t = Filtrationszeit [s]

Ausgehend von Gleichung (4) sind folgende Überlegungen zur Optimierung des Druckverlustes möglich. [1]

- **Reduzierung der Filtrationsgeschwindigkeit ϑ :**

Reduziert den Druckverlust führt aber zu unverhältnismäßig großen Filterflächen.

- **Reduzierung der Flächenmasse des Staubkuchens W :**

Eine Reduzierung kann durch eine Vorabscheidung wie zum Beispiel durch einen Elektrofilter oder Zyklon gegeben sein.

- **Reduzierung des Restwiderstandes vom Filtermediums K_1 :**

Der Widerstand K_1 hängt hauptsächlich vom Filtermedium ab. Ein niedriger K_1 – Wert bedeutet auch ein schlechtes Abscheideverhalten. Wie schon im Kapitel 2.2.2 *Partikelabscheidung* erwähnt, kann eine Verbesserung durch das Anlegen eines elektrischen Feldes durch den Filter verbessert werden. Auch die Zugabe von Filterhilfsmitteln und das Verstärken mittels Agglomeration, verbessern ebenfalls den K_1 – Wert. Dabei werden kleinere Partikel, welche durch das Eindringen in den Filter den K_1 – Wert erhöhen, in einer Vorkammer zu größeren Partikel modifiziert, wodurch sich schneller ein Kuchen aufbauen kann. Dies führt dann direkt zu Kuchenwiderstand K_2 .

- **Reduzierung des spezifischen Kuchenwiderstandes K_2 :**

Durch die Verdichtung des Kuchens erhöht sich K_2 . Deswegen wird versucht, durch Partikelaufladung und eines durch den Filter durchdringenden elektrischen Feldes, einen porösen Kuchen zu erzielen.

3. Elektrisch unterstützte Filtration

Die elektrisch unterstützte Filtration besteht aus einem Elektrofilter und einem in Kombination geschalteten Abreinigungsfilter. Diese Kombinationen können direkt im Elektrofilter (siehe Kapitel 3.2 *Anlegen eines elektrischen Feldes am Filtermedium*) am Filtermedium stattfinden oder auch nachgeschaltet. (siehe Kapitel 3.3 *Hybridfiltration*) Auch die Agglomeration von kleinsten Partikeln kann durch elektrisch unterstützte Filtration erhöht werden. Wie schon mehrmals erwähnt ist die elektrische Unterstützung der Filtration mehreren Mechanismen unterlegen. Vor allem die Agglomeration ist ein wichtiger Faktor und wurde in den Untersuchungen von DI Sejla Kurtovic [12] bei der auch von mir verwendeten Hybridversuchsanlage genauer betrachtet und ist ebenfalls in der Arbeit von Dr. Felix Lebl [1] nachzulesen. In der folgenden Auflistung werden alle relevanten Typen und Mechanismen beschrieben.

3.1 Agglomeration

Unter Agglomeration versteht man das Zusammenfügen von einzelnen Partikeln zu einem größeren Partikel. Dadurch kommt es zu einer Verbesserung der Abscheidung am Filter. Zur Steigerung der Agglomerationsrate werden drei Methoden beschrieben. [13]

Erhöhung der Relativbewegung der Partikel untereinander:

Durch Anlegen eines oszillierenden elektrischen Wechselfeldes kommt es zu Relativbewegungen zwischen geladenen und ungeladenen Partikel. Die geladenen Partikel beginnen zu oszillieren, wobei die ungeladenen Partikel sich unbeeinflusst weiter bewegen. Durch die unterschiedlichen Richtungen kommt es zu Relativbewegungen.

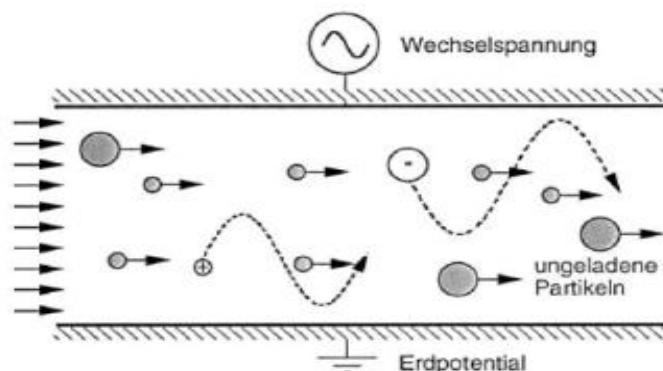


Abbildung 10: Schema zur Erhöhung von geladenen und ungeladenen Partikel durch ein elektrisches Wechselfeld [13]

Vergrößerung der lokalen Partikelkonzentration:

Durch die fokussierende Wirkung inhomogener elektrischer Felder wandern die Partikeln in Richtung der Sprühelektrode, welche sich in dessen Nähe aufkonzentrieren.

Erzeugung anziehender Wechselwirkungen zwischen den Partikeln:

Neben Schwerkraft und Polarisationskraft ist die Coulombkraft die effektivste Kraft. Dadurch erfolgt eine erhebliche Steigerung der Agglomerationsrate.

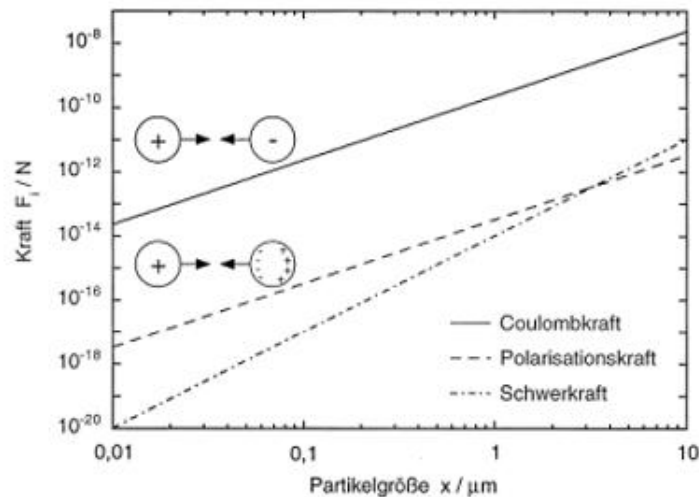


Abbildung 11: Vergleich zwischen Coulomb -, Polarisations- und Schwerkraft [13]

In der Literatur finden sich viele Methoden zur Agglomeration die nicht unerwähnt bleiben sollten. Die zwei Haupttypen sind die elektrisch induzierte und die akustische Agglomeration. In dieser Arbeit wird die elektrisch induzierte Agglomeration genauer beschrieben, da diese der akustischen Agglomeration überlegen ist. Außerdem fand die akustische Agglomeration keine Verwendung im Laufe dieser Untersuchungen.

3.1.1 Elektrisch induzierte Agglomeration

Hier werden durch eine Voraufladung der Teilchen (unipolare -, bipolare Aufladung) und durch eine Nachschaltung einer Agglomerationsapparatur die notwendigen Maßnahmen ergriffen, um die drei vorher erwähnten Methoden zu erfüllen. Nachgeschaltet werden Wechselfelder, Gleichstromfelder sowie strömungsmechanische Einbauten (Verengungen, turbulente Durchmischung). Vor allem die bipolare Aufladung bringt gute Ergebnisse. Zu Übersichtszwecken folgt eine kurze Aufzählung

- Bipolare Agglomeration in einem Wechselfeld
- Bipolare Agglomeration durch Koronaaufladung mit einer Gleichstrom-Korona
- Bipolare Agglomeration durch Koronaaufladung mit einem Wechselfeld (bipolare AC-Koronaaufladung)

In diesen Versuchen wurde die bipolare Aufladung mit Wechselfeld angewendet. Details und weitere Informationen sind folgender Literatur zu entnehmen: [1] [12] [14]

3.2 Anlegen eines elektrischen Feldes am Filtermedium

Hier wird in dem Filtermedium ein elektrisches Feld erzeugt. In der Regel werden Elektroden direkt in einen Schlauchfilter eingebaut oder das Filtermedium befindet sich zwischen den Elektroden. Der Vorteil dieser Technik ist die Reduzierung des Durchströmwiderstandes am Filterkuchen und damit die Reduzierung des Druckverlustes. Das passiert durch eine geringere innere Einlagerung der Partikel im Filter und führt dazu, dass sich die Partikel mehr an der Oberfläche ansiedeln. Auch das Reingas ist durch eine Reduktion des Partikeldurchtritts im Filter sichtlich weniger belastet. Der Nachteil besteht in der teuren Anschaffung sowie in der Gefahr eines Funkenüberschlages in den Filter und damit dessen Zerstörung. Bis jetzt hat sich diese Variante auf Grund der Nachteile noch nicht durchsetzen können. [7]

3.3 Hybridfiltration

Die Kombination aus einem Elektrofilter und einem nachgeschalteten Abreinigungsfilter bezeichnet man als Hybridfilter. Die Partikel werden durch den Elektrofilter vorabgeschieden bzw. elektrostatisch aufgeladen und agglomeriert. Dadurch werden bis zu 90% der Reinigung durch einen fast wartungsfreien Elektrofilter übernommen und die anderen 10% von einem Abreinigungsfilter. Außerdem wirken sich die aufgeladenen Partikel positiv auf die Schlauchfiltration aus und es können auch höhere Anströmgeschwindigkeiten ermöglicht werden. Es tritt ein Synergieeffekt auf. Gleichzeitig sinkt auch der Druckverlust um ca. 40%. [16] Durch diese Kombination erhält man einen Einfluss auf die Kuchenkonsistenz und auf den spezifischen Kuchenwiderstand K_1 , da in der elektrischen Einheit hauptsächlich größere Partikel abgeschieden werden.

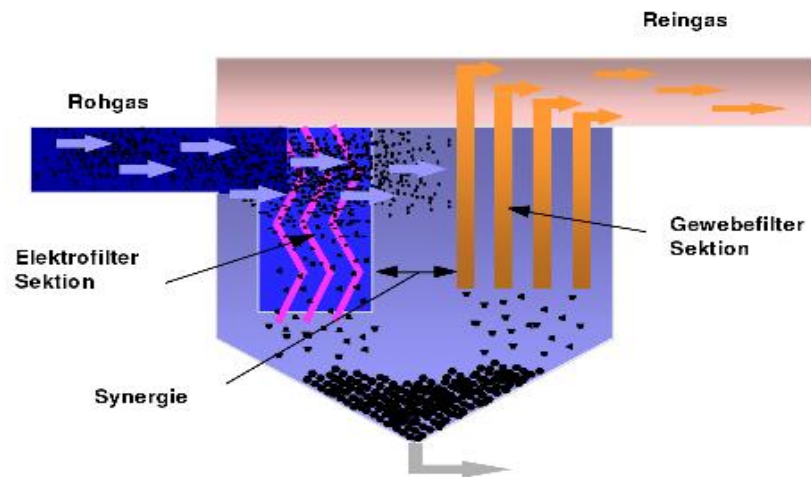


Abbildung 12: Schema eines Hybridfilters in Kompaktbauweise der Firma Elex [16]

Vor allem in der Industrie setzt sich diese Technik immer mehr durch. Einerseits können auf diesem Weg mit bestehenden Elektroanlagen neue Emissionswerte eingehalten werden, gleichzeitig wird auch durch weniger Abreinigungsintervalle das Filtermedium geschont und dabei Energie eingespart. Damit verringern sich sowohl Wartungs- als auch Betriebskosten. Einsatz findet der Hybridfilter in Zementwerken, Müllverbrennungsanlagen, Kohlekraftwerken, Biomasseanlagen usw.

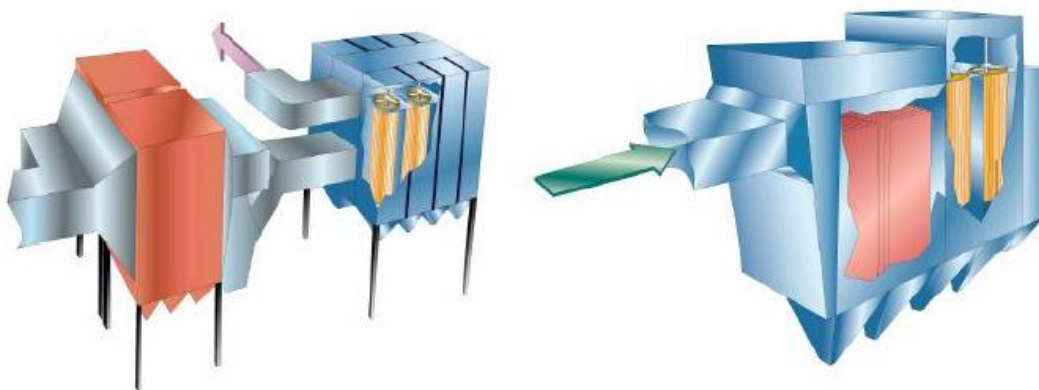


Abbildung 13: Schema eines Hybridfilters in getrennter Bauweise (links) und in gemeinsamer Bauweise (rechts) [17]

4. Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, an einer elektrisch unterstützten Laborfiltrationsanlage den Restdruckverlauf, die Zyklusdauer sowie die Partikelanzahl im Reingas zu untersuchen, die Daten zu dokumentieren und anhand anschaulicher Diagramme gegenüberzustellen und zu diskutieren. Die Anlage besteht aus einem modifizierten Filtermittelprüfstand, welcher mit einer elektrischen Aufladeeinheit kombiniert ist. Die erforderliche Staubkonzentration wird durch einen automatisch gesteuerten Staubdispersierer eingestellt.

Für zwei unterschiedliche Filtermedien werden verschiedene elektrische Aufladungsarten und Filtrationsgeschwindigkeiten untersucht. Diese bestehen aus Membran und Nadelfilz. Die verschiedenen elektrischen Aufladungsarten und Filtrationsgeschwindigkeiten sind aus *Tabelle 1: Übersicht der Versuche* zu entnehmen. Gesucht wird das unterschiedliche Verhalten des Restdruckverlustes, der Zykluszeit und der Partikelanzahl bei elektrischer Unterstützung im Vergleich zu einer nicht elektrisch unterstützten Filtrationsanlage. Die Arbeit ist ein Teilprojekt zur Unterstützung der Dissertation von Dr. Felix Lebl und wird auf der von ihm entwickelten Hybridfiltrationsanlage durchgeführt. Näheres siehe [1].

Zusammengefasst heißt das:

- Untersuchung und Datenerfassung verschiedener Variationen der Filtrationsgeschwindigkeiten, der elektrischen Aufladungen und der Filtermedien.
- Überlegungen für eine aussagekräftige Auswertung
- Diskussion der Ergebnisse sowie eine Gegenüberstellung der Versuche

Elektrische Aufladungen:	Filtrationsgeschwindigkeiten			
	2m/min	3m/min	4m/min	5m/min
unipolar Negativ	✓	✓	✓	✓
unipolar Positiv	✓	✓	✓	✓
bipolar	✓	✓	✓	✓
bipolar + Wechselfeld	✓	✓	✓	✓
ohne Aufladung	✓	✓	✓	✓

Tabelle 1: Übersicht der Versuche

5. Ausführung der Versuche

5.1 Laboranlage und Versuchstand

Wie schon erwähnt, wurde die Anlage im Rahmen einer Dissertation von Dr. Felix Lebl [1] entwickelt, konstruiert und aufgebaut. Die Anlage wurde zum Teil von der Firma FLSmidth und der Firma Palas zur Verfügung gestellt. Der eigentliche spezielle Umbau wurde von Dr. Lebl in der universitätseigenen Werkstatt realisiert. Dieser Umbau bestand aus den gesamten elektrischen Einheiten, den Steuergeräten, dem Schutzkäfig und dessen Verkabelung und Erdung, sowie alle notwendigen Schutzmaßnahmen, da hier mit hohen Spannungen gearbeitet wurde.



Abbildung 15: Gesamte Anlage mit Schutzkäfig, Arbeitsplatz und Steuergeräte



Abbildung 14: Seitenansicht von rechts und links

5.1.1 Fließschema

Es wird ein Kolben mit dem Teststaub Plural NF nach Norm gestopft um eine homogene Dichte und Verteilung des Staubes zu erreichen. (Details *siehe 5.5 Versuchsdurchführung*). Der Kolben wird in einer dafür vorgesehen Halterung im Staubdispergierer eingespannt und mittels einer automatischen Steuerung (Palas MMTc) durch Druckluft und einer rotierenden zylindrischen Kohlebürste in den Strömungskanal eingeblasen. Durch das Gebläse wird auch weitere Umgebungsluft mit angesaugt. Im Strömungskanal befindet sich die elektrische Einheit, welche durch Umstecken der verschiedenen Anschlüsse variiert werden kann. Nach dem Durchlaufen des Strömungskanals und der ersten Vorabscheidung durch den Elektrofilter bzw. bei Versuchen ohne Aufladung durch geringe Sedimentation, gelangt der Staub zu dem Filtermittelpfandstand (Norm VDI 3926, Typ 2 [18]), welcher dort gefiltert und anschließend gravimetrisch gemessen werden kann. Dort befinden sich auch Sensoren für die Druckdifferenzmessung. Nach dem Testfilter befindet sich die Abreinigungseinheit, welche mit Druckstoßimpulsen den Filter während des Versuches in den einzelnen Zyklen abreinigt sowie eine Sonde für die isokinetische Absaugung für die Partikelverteilung und Reingaskonzentrationsmessung mittels eines PCS (siehe 5.3.1 *Welas[®] digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem*). Vor dem Gebläse befindet sich noch ein Absolutfilter, welcher ebenfalls gravimetrisch gemessen werden kann um alle durchkommenden Partikel zu erfassen.

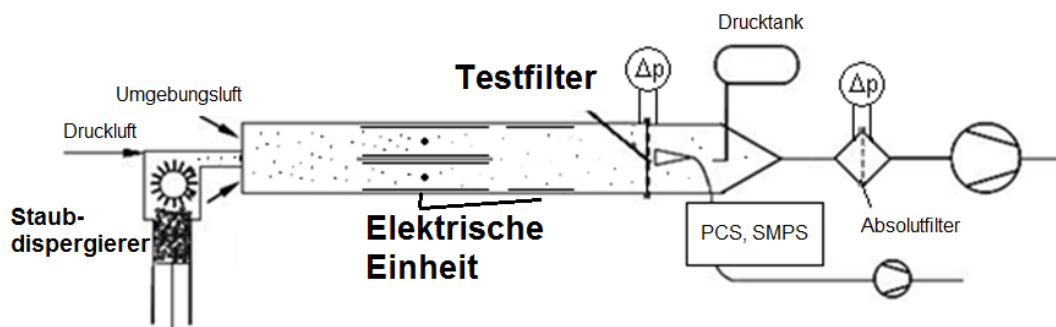


Abbildung 16: Fließschema der Anlage [1]

5.1.2 Versuchsaapparatur

Die elektrische Einheit wurde noch zusätzlich mit einem geerdeten Schutzkäfig ausgestattet um eventuelle Überschlüge der Sprühelektroden abzufangen.

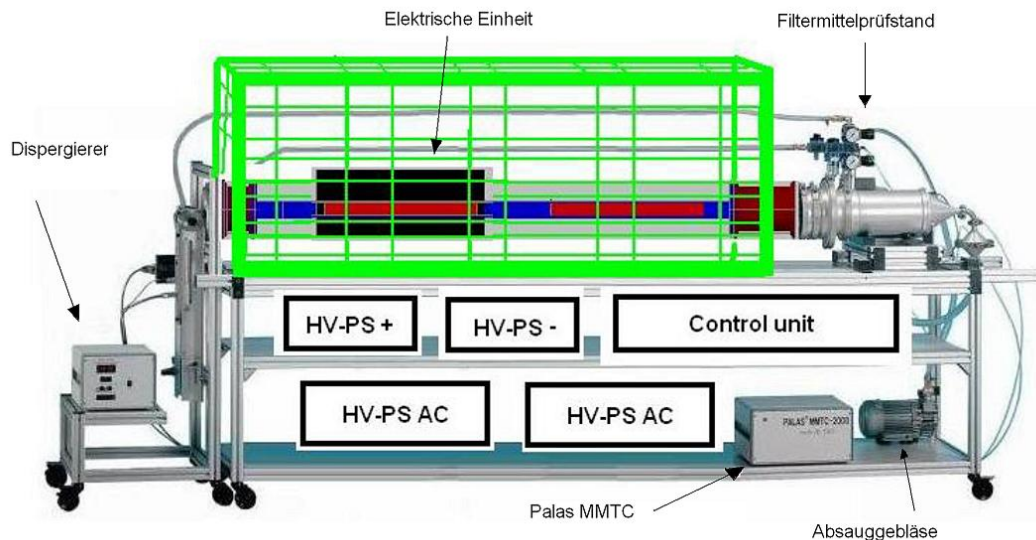


Abbildung 17: Versuchsaapparatur mit Schutzkäfig [12]

Technische Eckdaten

- Pulverdispergierer: RBG 2000 für nicht kohäsive Pulver und Stäube, wie z. B. Pural NF, Pural SB, ISO A2 fine, ISO A4 coarse, verschiedene Arten von TiO₂ und anderen Pulvern aus der Praxis Massenstrom: ca. von 0,2 g/m³ bis zu 90 g/m³ (abhängig von der Pulvergröße und -dichte)
- Prüffläche: 177 cm²
- Anströmgeschwindigkeit: 3 cm/s bis 8,8 cm/s
- Volumenstrom: 1 m³/h bis 5,5 m³/h, geregelter Luftmassenstrom
- Differenzdruck Testfilter: Messbereich 0 – 5000 Pa
- Differenzdruck Testfilter absolut: Messbereich 0 – 5000 Pa
- Druck für Druckluftabreinigung: einstellbar bis zu 6 bar
- Ventilöffnungszeit: 50 ms bis 500 ms
- Abmessungen (H x B x L): MMTC 2000: ca. 1200 x 630 x 1700 mm
- Druckluftversorgung: 6 - 8 bar
- Elektrischer Anschluss: Ein-Phasen-Anschluss (120/230 V; 2 A) Anschlussleistung: ca. 500 W

Anwendungsbeispiele

- Standardisierte Prüfung gemäß VDI 3926
- Individueller, realitätsnaher Test wie durch die verschiedenen Verfahrensbedingungen vorgegeben, z. B. in der Zementindustrie, in der Holz verarbeitenden Industrie, der pharmazeutischen Industrie, Chemieindustrie, Kernkraftwerken und anderen [16]

Besondere Vorteile

- International vergleichbare Messergebnisse aufgrund der weiten Verbreitung des Prüfsystems MMTC 2000
- Hohe Reproduzierbarkeit des Testverfahrens
- Verschiedene Stäube aus der Praxis können verwendet werden
- Schnelle und einfache Einstellung der Rohgaskonzentration
- Simulation des Girlandeneffekts
- Einsetzbar für In-Situ-Messungen
- Online-Messungen der Partikelgröße und –konzentration mit dem Streulichtspektrometer Welas® digital
- MMTC 2000 CC: Dieser Prüfstand kann bis 250°C beheizt werden; die relative Feuchte ist festlegbar bis 80 % (bei einer Temperatur von 90°C)
- Einfache Handhabung, einfache Reinigung
- Geringe Rüstzeiten, äußerst wartungsarm [19]

5.1.3 Teststaub Pural NF

Der in dieser Arbeit verwendete Teststaub PURAL NF hat die chemische Zusammensetzung Al_2O_3 , freies fließendes Verhalten und ist ein Bauxit. Die Herstellung erfolgt aus Aluminiumhydroxid mittels Dehydrierung. Mindestens 99% der Partikel weisen einen Durchmesser von kleiner als 100 μm auf. Desweiteren besitzt er gute Eigenschaften bezogen auf den elektrischen Widerstand. Je nach Feuchtegehalt in der Luft ergaben sich zwischen $1,4 \times 10^8$ und $1,1 \times 10^9$. (siehe Anhang: A2 Staubwiderstand)

Die Partikelgrößenverteilung wurde mit einem Malvern Instruments Mastersizer 2000 vermessen. Charakterisierende Volumenbezogene Teilchengrößen sind: $d_{10,3} = 0,81 \mu\text{m}$, $d_{50,3} = 0,77 \mu\text{m}$ und $d_{90,3} = 25,34 \mu\text{m}$. Die Einteilung des Staubwiderstands erfolgt nach

- $10^4 - 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ niedriger elektrischer Staubwiderstand
- $10^7 - 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ normaler elektrischer Staubwiderstand
- größer $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ hoher elektrischer Staubwiderstand

Es wurde eigens für diese Arbeit eine Staubwiderstandsmessung für Pural NF durchgeführt. Es zeigt sich das Pural NF je nach Feuchtegehalt, einen Staubwiderstand zwischen $1,4 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ und $1,1 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ aufweist. [1]

Der Staubwiderstand ist bei diesen Versuchen ein wichtiger Parameter. Wenn dieser zu gering ist, verlieren die Partikeln leicht ihre Ladung in der Nähe der Sammelelektrode und damit die Coulombsche – Kraftwirkungen. Ohne diese Kraftwirkung können Partikel durch den Luftstrom wieder abgetragen werden. Ist der Widerstand zu hoch kann es zu einem Rücksprühen der Elektrode kommen wobei ebenfalls die Möglichkeit besteht, dass Partikel explosionsartig wieder zurückgeschleudert werden können. [1]

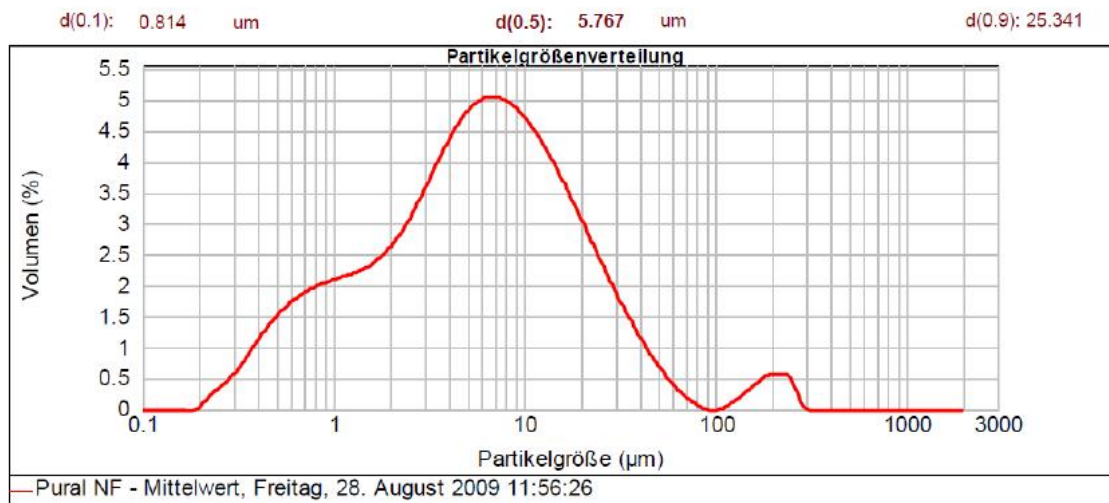


Abbildung 18: Volumenverteilung der Partikelgröße von Pural NF [1]

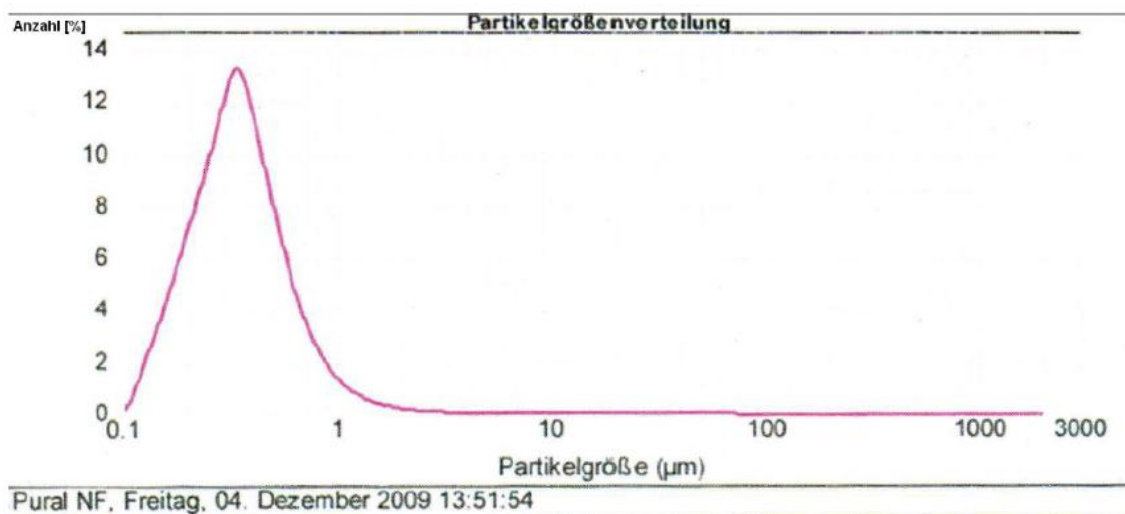


Abbildung 19: Anzahlverteilung der Partikelgröße von Pural NF [1]

5.1.4 Staubdispergierer

Das zu dispergierende Pulver wird in einen zylindrischen Behälter gestopft und so verdichtet, dass sich das Pulver gleichmäßig in einer homogenen Verteilung und Dichte darin befindet. Der zylindrische Behälter wird durch einen exakt geregelten Vorschub gegen eine rotierende Bürste transportiert. Ein Luftstrahl aus einem Druckluftanschluss befördert anschließend die Partikel von den Bürsten in den zu untersuchenden Versuchsraum. Die exakte Dosierung lässt sich einfach und reproduzierbar mit dem Querschnitt des Vorratsbehälters, dem Vorschub und der ermittelten Stopfdichte (gravimetrisch) einstellen.

- $Massenstrom = \varnothing Vorratsbehälter * Vorschub * Stopfdichte$
- $Massenkonzentration = \frac{Massenstrom}{Volumenstrom}$



Abbildung 20: Staubdispergierer Palas RGB 2000

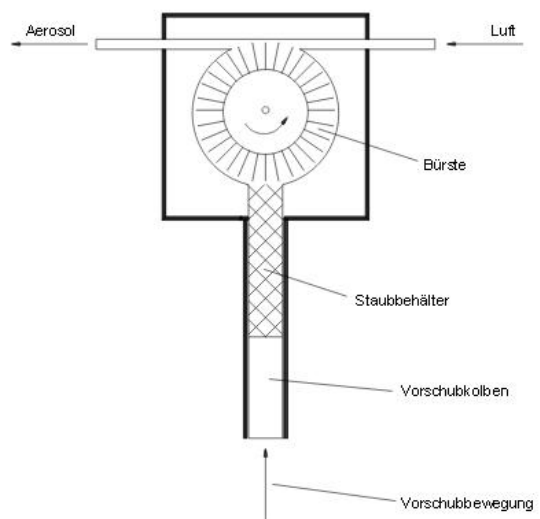


Abbildung 21: Schema von Dispergierer [19]

Technische Eckdaten:

- Partikelmaterial: nicht kohäsive Pulver
- Partikelgröße: $\leq 100 \mu\text{m}$
- Massenstrom abhängig vom Pulver:
200 mg/h - 560 g/h (bei theoretischer Stopfdichte von 1 g/cm^3)
- Volumenstrom: 2,5 - 5,0 m^3/h
- Max. Gegendruck: Standardversion bis 200 mbar
- Abmessungen: 1160 x 530 x 500 mm (H x B x T),
- Gewicht 40 kg

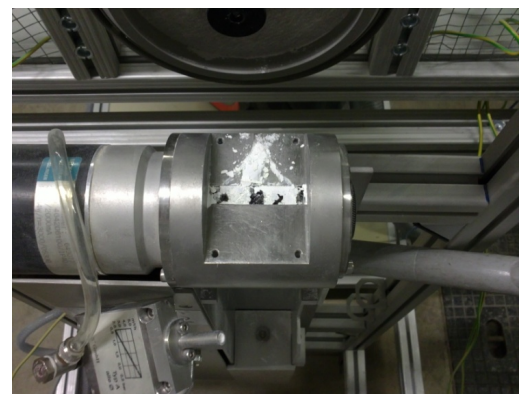


Abbildung 22: Geöffneter Dosierer mit Blick auf die Bürste nach Druckluftausfall

5.1.5 Elektrische Einheit

Die elektrische Einheit befindet sich nach dem Staubdispergierer und vor dem Filtermittelprüfstand. (siehe *Abbildung 17: Versuchsanlage mit Schutzkäfig*) Entwickelt und gefertigt wurde sie von Dr. Felix Lebl [1] und hat im Inneren eine Abmessung von 94 x 102 x 2000 mm (H x B x L).

Die Einheit wird in eine Aufladezone und in eine Agglomerationszone unterteilt. Die Aufladezone ist in der Mitte durch eine Platte getrennt. Daraus ergeben sich ein vorderer und ein hinterer Kanal. Diese Abtrennung ermöglicht eine bipolare Aufladung. Vorne eine positive, hinten eine negative Aufladung. Die Elektroden werden über das Switchboard umgesteckt wobei in den Versuchen immer die Erste (1, 1') (siehe *Abbildung 25*) verwendet wird da sich diese als am effektivsten erwiesen hat.

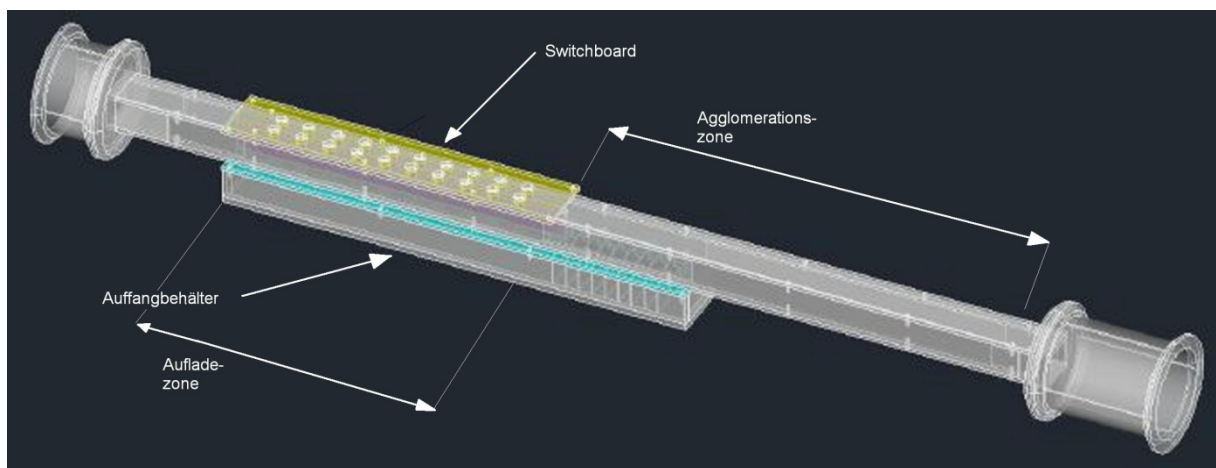


Abbildung 23: 3D-Modell der elektrischen Einheit und Bereichseinteilung [1]

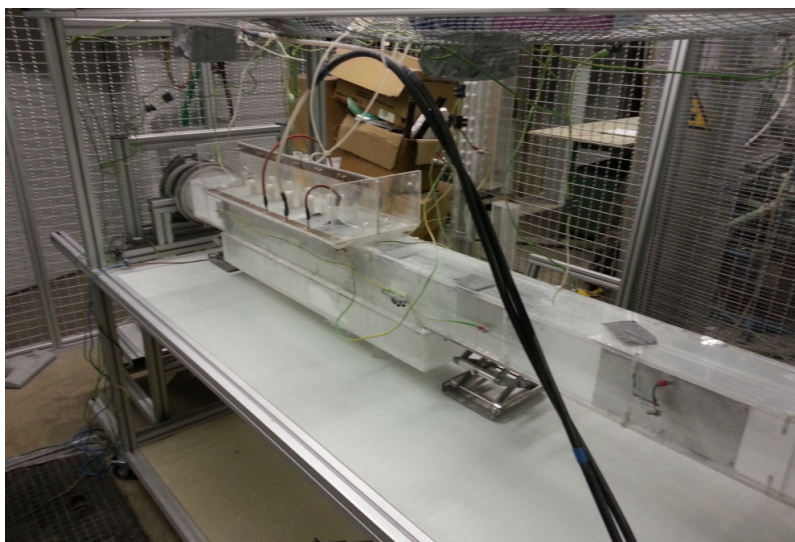


Abbildung 24: Bild der verwendeten elektrischen Anlage ohne Schutzkäfig mit Hochspannungskabeln im Vordergrund

Wie in Abbildung 25 ersichtlich ist es möglich die Sprühelektroden über die Anschlüsse 1, 2,...n zu variieren, wobei in der Vorarbeit von DI Kurtovic [12] sich die optimale Entfernung der Sprühelektrode an erster Stelle (1, 1') herausgestellt hat.

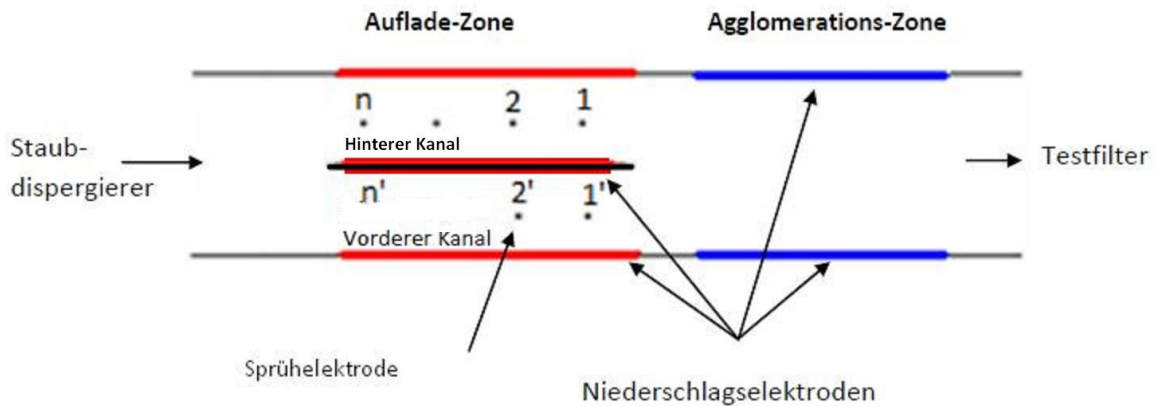


Abbildung 25: Schema der elektrischen Einheit mit Elektrodenanschlüsse [1]

Hier war es möglich mit den Hochspannungskabeln folgende Stromversorgung herzustellen:

- Unipolar negativ (negative Spannung mit Bypasskabel verbunden auf vorderen und hinteren Kanal DC- $n = 1' - 1$)
- Unipolar positiv (positive Spannung mit Bypasskabel verbunden auf vorderen und hinteren Kanal DC+ $n = 1' - 1$)
- Bipolare Aufladung mit Wechselstrom AC+- (vorderer Kanal 1' mit AC positiv – Hinterer Kanal 1 mit AC negativ)
- Bipolare Aufladung mit Gleichstrom DC+- (vorderer Kanal 1' mit DC positiv – hinterer Kanal 1 mit DC negativ)

Als Sprühelektrode wird ein Kupferdraht der Stärke 0,3mm verwendet. Die wirksame Länge des Drahtes im Kanal beträgt 94mm, das der Höhe des Kanals entspricht. Der Abstand der Sprühelektrode zur Sammelektrode beträgt 23mm. Dies ist der wirksame Abstand der elektrostatischen Abscheidung. Unter den Sprühelektroden befinden sich Langlöcher welche in einen Staubsammelbehälter führen um den abgefallenen Staub aus dem Kanal teilweise zu entfernen. Im Gegensatz zu industriellen Anlagen gibt es hier keine automatische Rüttelmechanik um den abgeschiedenen Staub zu entfernen. Es ist deswegen notwendig nach jedem Versuch die Anlage zu reinigen. Der Staubabwurf erfolgt ausschließlich durch gravimetrische Einwirkung. Alle übrigen Langlöcher werden mit Hilfe eines Aluminiumklebebandes isoliert.



Abbildung 26: Aluminiumabdichtung mit Langlöcher im Elektrodenbereich, Sammelbehälter an Unterseite im gereinigten Zustand (links) und im ungereinigten Zustand (rechts)

Eingespannt werden die Elektroden über eine Halterung die erlaubt mittels eines Gewindes die Drähte zu spannen und zu straffen. Zu Beginn der Versuche hat sich herausgestellt, dass ein lockerer Draht andere Stromstärken liefert als ein straff gespannter. Um reproduzierbare Ergebnisse zu bekommen ist es nötig nach jedem Versuch, während der Reinigung die Drähte nach zu spannen. Kontrolliert wird dies über die Hochspannungswchselgeräte. (siehe 5.2.1 Hochspannungsnetzgeräte) Desweiteren ist es nötig auch die Drähte auf Defekte zu überprüfen, da Spannungsüberschläge häufig auch zu einer Zerstörung der Sprühelektrode führen.

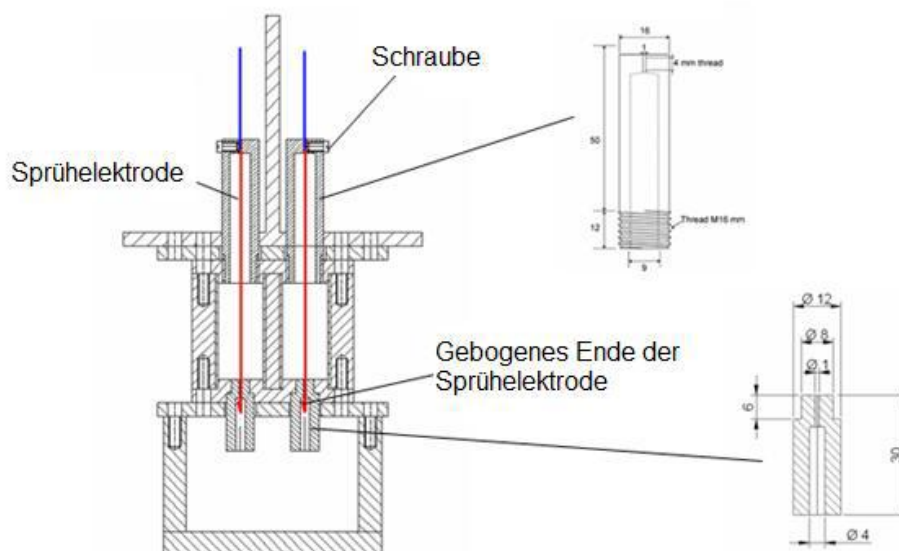


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Einspannung der Sprühelektroden [1]

In der Agglomerationszone werden die getrennten Kanäle aus der Aufladezone wieder zusammengeführt. Außerdem befinden sich in dieser Zone parallel gegenüberliegende Plattenelektroden, an denen ein Hochspannungswechselfeld angelegt werden kann. (180 x 94mm L x H)

5.1.6 Filtermittelprüfstand

Nach dem Durchlaufen des Elektrofilters kommen alle nicht abgeschiedenen Partikel zum Filtermittelprüfstand. Hier wird die Restkonzentration des Staubes aus dem Luftstrom gefiltert. Die Luft nach dem Filter wird als Reingas bezeichnet. Durch den Filtrationsvorgang steigt der Druckverlust am Filter kontinuierlich an. Dieser Druckverlust kann gemessen werden und wird bei Erreichen eines vorab eingestellten Wertes durch einen Druckluftimpuls online abgereinigt. (siehe 2.2.3 *Regenerierung und Druckverlust bei online Abreinigung*) Die Anzahl der Zyklen und damit die Gesamtzeit des Versuches sowie die Staubkonzentrationen im Rohgas werden ebenfalls durch den Prüfstand geregelt und gesteuert. Weiters ist noch ein Anschluss für eine isokinetische Absaugung mit dem Zweck der Partikelmessung mit dem PCS vorhanden. Um die Restkonzentration im Reingas zu messen gibt es auch noch einen Absolutfilter, der nachgeschaltet alle Restpartikel filtert und deren gravimetrische Bestimmung zulässt.

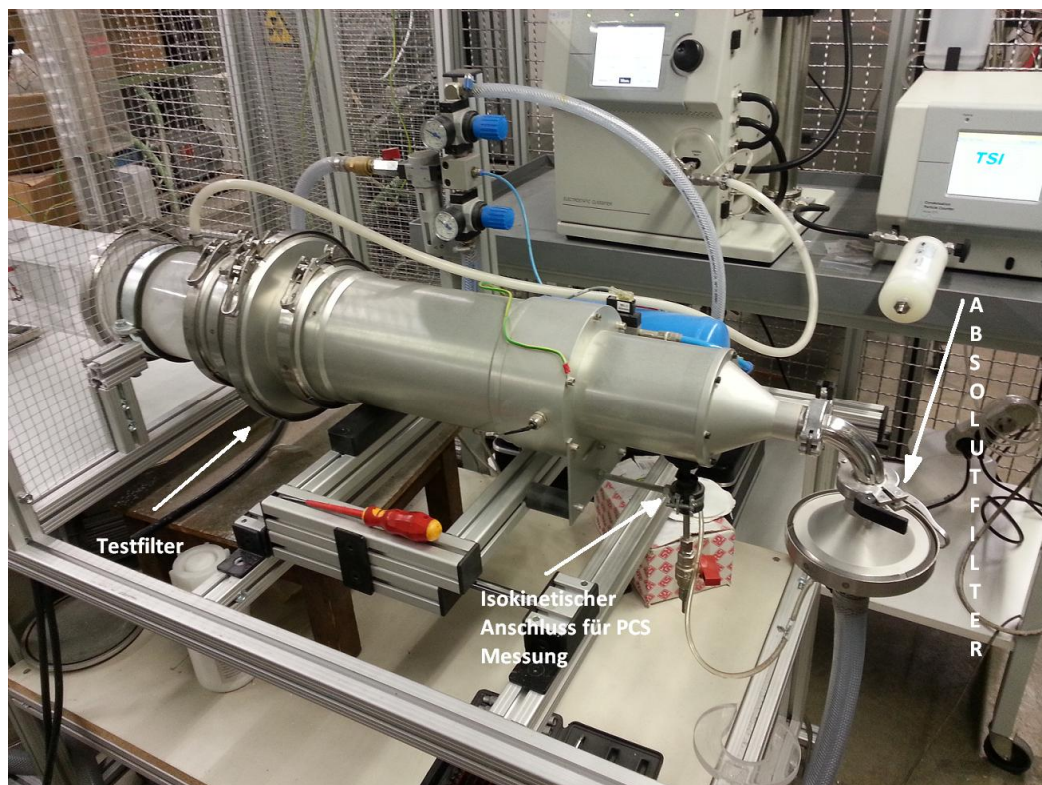


Abbildung 28: Verwendeter Filtermittelprüfstand

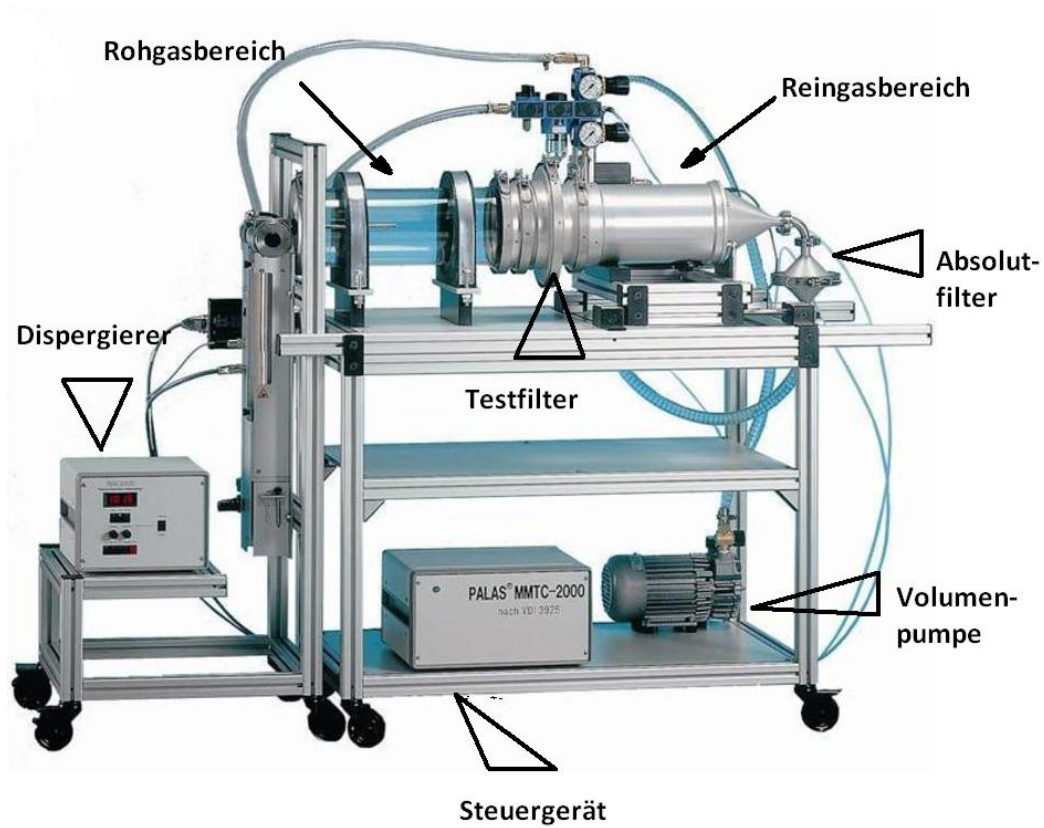


Abbildung 29: Original Palas MMTC 2000 Filterteststand für abreinigbare Filtermedien gemäß VDI 3926 [19]

5.1.7 Filtermedien

Als Testfilter wurden zwei verschiedene Filtermedien verwendet. Alle Versuche wurden mit einem Nadelfilz und einem Membranfilter durchgeführt.

5.1.7.1 Testfilter

Nadelfilz: Der Nadelfilz ist ein robuster Filter. Durch seine Verflechtungen nimmt er selten Schäden an. Vor allem durch die Onlineabreinigung sind die Filter oft hohen Belastungen ausgesetzt. Er ist kratzfest und hat die Eigenschaft, dass er erst nach einer gewissen Bestäubungszeit seine optimale Filterleistung entwickelt. Er besteht aus Polyamide. Das Flächengewicht beträgt ca. 520 g/m².

Membran: Der Membranfilter hat die Eigenschaft, dass er sofort die optimale Filterleistung erreicht. Ein Nachteil ist die dünne Membranschicht die auf das Stützgewebe aufgetragen ist. Diese ist leicht anfällig auf Kratzer, Löcher und andere Beschädigungen was wiederum zu einer erhöhten Partikelanzahl im Reingas führt. Das Stützgewebe besteht aus Fiberglas, die Membran aus PTFE. Das Flächengewicht beträgt ca. 570 g/m².

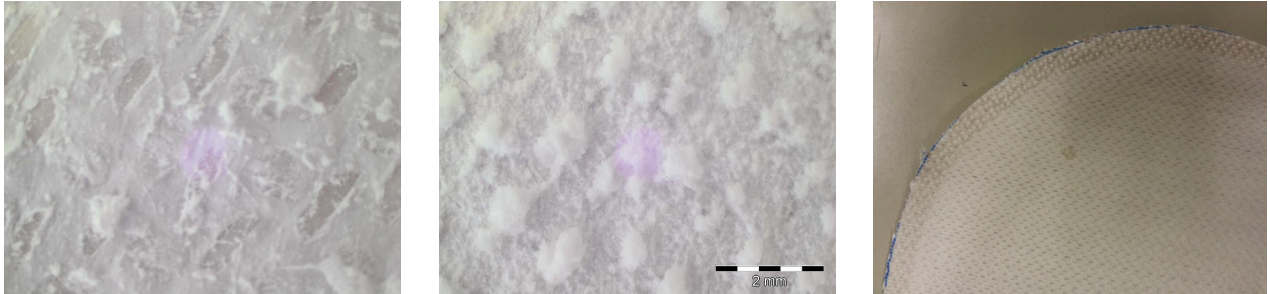


Abbildung 30: Membranfilter unter dem Mikroskop leicht bestäubt (links), stark bestäubt (Mitte), und bestäubter Filter mit Loch in der Membran (rechts)

5.1.7.2 Absolutfilter

Die Aufgabe des Absolutfilters ist es Restpartikel im Reingas herauszufiltern. Verwendet wird dabei ein HEPA Filter der Fima Whatman. Der Filter mit der Bezeichnung Whatmann GF/A, hat einen Durchmesser vom 110mm, bei einer durchschnittlichen Dicke von 260µm und einem Flächengewicht von 53g/m². [20]

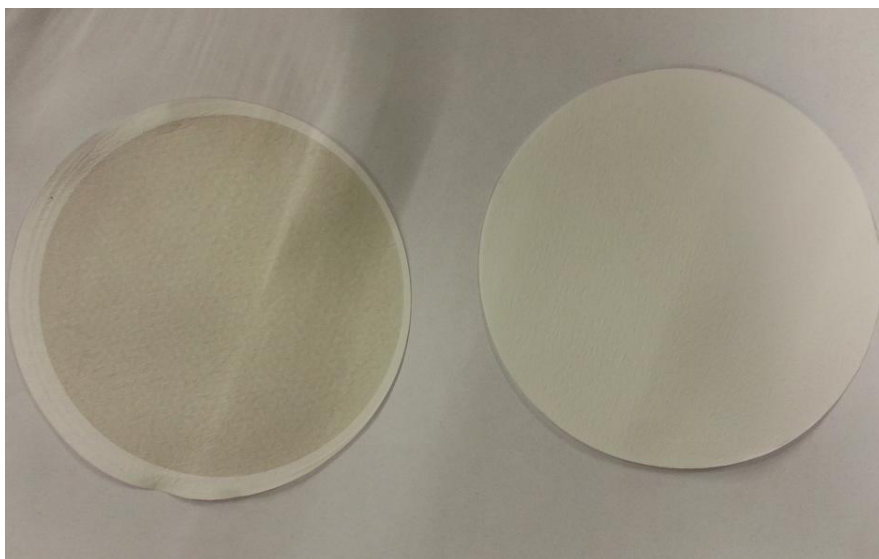


Abbildung 31: Vergleich zweier Absolutfilter. Durch Rauchgas in der angesaugten Umluft verschmutzter Absolutfilter (links). Mit normaler Umgebungsluft betriebener Absolutfilter (rechts)

5.2 Steuergeräte

5.2.1 Hochspannungsnetzgeräte

Um die hohen Spannungen von 9,5kV zu erreichen werden zwei Hochspannungsnetzgeräte benötigt. Diese Netzgeräte sind spannungsgeregelt. Aus der eingestellten Spannung ergeben sich auch die Stromstärke abhängig vom Verbraucher. (Widerstand an Elektrode etc.) Gearbeitet wurde bei einer Spannung von 9,5kV und einem Strom von 0,01mA pro Elektrode. [1]

Beide Geräte waren von der Firma Glassman mit der Kennzeichnung EL30P1.5.

DC+:

- Maximale Ausgangsspannung: 0-30kV
- Maximaler Ausgangsstrom: 1,5mA

DC-:

- Maximale Ausgangsspannung: 0-30kV
- Maximaler Ausgangsstrom: 1,5mA



Abbildung 32: Hochspannungsnetzgeräte DC+ und DC-

5.2.2 Wechselfeldgeneratoren

Beide AC-Hochspannungstransformatoren wurden speziell für diese Arbeit entwickelt und gebaut. Sie werden jeweils über einen Funktionsgenerator (TTi TG315) sowohl hinsichtlich der Spannung und der Frequenz eingestellt. Die Stromstärke ergibt sich wieder anhand der physikalischen Gegebenheiten des Verbrauchers. Das Signal vom Frequenzgenerator wird mit einem Verstärker (FLSmidth, Special design (Ausgang: 90 Vpeak) zum Hochspannungstransformator geschickt. [1]

AC-Korona (Aufladezone):

- 30kV Special-design, Rico-Werk
- Maximale Ausgangsspannung: 30 kVpeak (21,2 kVrms)
- Maximaler Ausgangsstrom: 1,5 mVpeak Frequenzbereich: 5-200 Hz

AC-Feld (Agglomerationszone):

- 50kV Special-design, Rico-Werk
- Maximale Ausgangsspannung: 50 kVpeak (35,4 kVrms)
- Maximaler Ausgangsstrom: 1,5 mVpeak Frequenzbereich: 5-200 Hz [1]



Abbildung 33: AC Hochspannungstransformatoren und deren Verstärker



Abbildung 34: AC Steuereinheit [1]

5.3 Messgeräte

5.3.1 Welas®digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem

Das Welas® digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem, kurz PCS, ist in der Lage Korngrößenverteilungen sowie Partikelkonzentrationen zu messen. Das verwendete Messverfahren beruht auf der Streulichttechnologie am einzelnen Partikel. In den Versuchen wird die Reingaskonzentration gemessen und in den Ausarbeitungen mit einbezogen. Die Ausgabe erfolgt in gewünschten Verteilungen, in Datenblättern sowie in Histogrammform. Vor Beginn der Messung wird das Gerät mittels eines Kalibrierstaubes neu ausgemessen.



Abbildung 35: Welas® digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem [21]

Technische Eckdaten [21]

- Messbereich : 0,2 μm – 100 μm $C_n \leq 106 \text{ P/cm}^3$
- Thermodynamische Messbedingungen: $-90^\circ\text{C} \leq T \leq 70^\circ\text{C}$ Optional: $T \leq 250^\circ\text{C}$, $p \leq 10 \text{ bar}$
- Absaugvolumenstrom: 5 l/min
- Digitale Einzelsignalerfassung: 20 MHz Prozessor, 256 Rohdatenkanäle
- Lichtquelle: 35 W Xenarc Lampe
- Schnittstelle: USB
- Elektrischer Anschluss: 115V/230V, 50/60 Hz
- Gehäuse: Tischgehäuse (19" kompatibel, 4 HE, 84 TE, T = 435 mm), optional mit Befestigungswinkeln für Rack-Einbau

Temperaturbereich Sensoren [21]

- von -90°C bis +70°C (Standard); optional bis 250°C

Druckbereich Sensoren [21]

- Optional bis 10 bar Überdruck

Die hohe Größenklassifiziergenauigkeit und die hohe Größenauflösung werden durch folgende Besonderheiten garantiert

- Weißlicht und 90° Streulichtdetektion: eindeutige Kalibrierkurve
- Patentierte T-Blende: kein Randzonenfehler
- Digitale Einzelsignalverarbeitung: Koinzidenzerkennung und -korrektur am Einzelsignal, wodurch bei höheren Konzentrationen bis zum Faktor 5 gemessen werden kann.

Anwendungsbeispiele [21]

- Abscheidegradbestimmung von KFZ Innenraumfiltern, Motorluftfiltern, Raumluftfiltern, Druckluftfiltern, Staubsaugerfiltern, abreinigbaren Filtern, Elektrofiltern, Ölabscheidern, Kühlschmierstoffabscheidern, Nassabscheidern, Zyklonen und anderen Abscheidern
- Isotherme und isobare Partikelgrößen- und Mengenbestimmung z.B. in der Automobil-, Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie
- Untersuchung schneller, instationärer Prozesse
- Test von Rauchmeldern
- Partikelmessung zur Wolkenbildung
- Emissionsmessungen
- Atemfunktion: Inhalat / Exhalat (Partikelgröße und -anzahl)

Besondere Vorteile [21]

- Kalibrierkurven
- Sehr hoher und reproduzierbarer Zählwirkungsgrad schon ab $0,2\mu\text{m}$
- Hohe zeitliche Auflösung von bis zu 10ms
- Lange Lebensdauer der Lichtquelle von 2000h
- Umfangreiche Software PDControl und FTControl
- Kalibrierung, Reinigung und Lampenwechsel können vom Kunden eigenständig durchgeführt werden
- Wartungsarm

5.3.2 Waagen

Die Auswertung der gravimetrischen Messungen erfolgte mit folgenden Waagen.

- Sartorius BP 211D inkl. LCD Display mit einer Anzeige auf $0,0001\text{g}$
Wird für die Messung der bestäubten Filter verwendet. Sehr genau aber oft reaktionsträge. Vor allem bei der Messung des Absolutfilters sind kleinste Konzentrationen zu messen.



Abbildung 36: Sartorius BP 211D inkl. LCD Display

- Sartorius GP 4102 inkl. LCD Display mit einer Anzeige auf $0,01\text{g}$
Wird hauptsächlich für die Bestimmung der Stopfdichte im Dispergierkolben verwendet.



Abbildung 37: Sartorius GP 4102 inkl. LCD Display

5.3.3 Bestimmung der Umwelteinflüsse

- **Thermometer/Hygrometer: Greisinger GFTH 95**

Da die Anlage mit Umgebungsluft betrieben wird, ist es wichtig diese Daten zu erfassen. Oft bei starken Wetteränderungen (Sommergewitter, starker Anstieg der Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc.) werden die Versuchsergebnisse beeinflusst. Dies wird in der Versuchsdurchführung und Auswertung berücksichtigt und führt oft zu einer Wiederholung der Versuche.



Abbildung 39: Greisinger GFTH 95 Abbildung 38: Greisinger GTD1100

- **Barometer: Greisinger GTD1100**
Zur Bestimmung des Luftdruckes

5.4 Software Palas MMTC

Um die verschiedenen Geschwindigkeiten und Versuchszeiten sowie die Anzahl der Zyklen zu erreichen wird auf die mitgelieferte Software des Palas MMTC zurückgegriffen. Wie schon erwähnt, werden viele Parameter elektronisch gesteuert. Diese Parameter werden hier anhand von Screenshots kurz erläutern. Wie in *Abbildung 40* ersichtlich, gibt die Software einen reichhaltigen Überblick über den Gesamtzustand der Anlage. Hier wird der Versuch gestartet und gestoppt (*Start/continue test – halt testprocedure, Gebläse on/off switch mainflow*) sowie ein Kontrollüberblick über Geschwindigkeiten (*mainflow setpoint*) und verbleibende Reststaubmengen im Dispergierkolben (*remainingtime*) ermöglicht. Desweiteren ist auch die laufende Zeit (*duration*), Zyklen (*cycle*), Umwelteinflüsse, ein Kontrollüberblick über die Onlineabreinigung (*valve pressure pulse*) und eines der wichtigsten Kontrollorgane, die Druckdifferenz zwischen Testfilter und Absolutfilter gegeben.

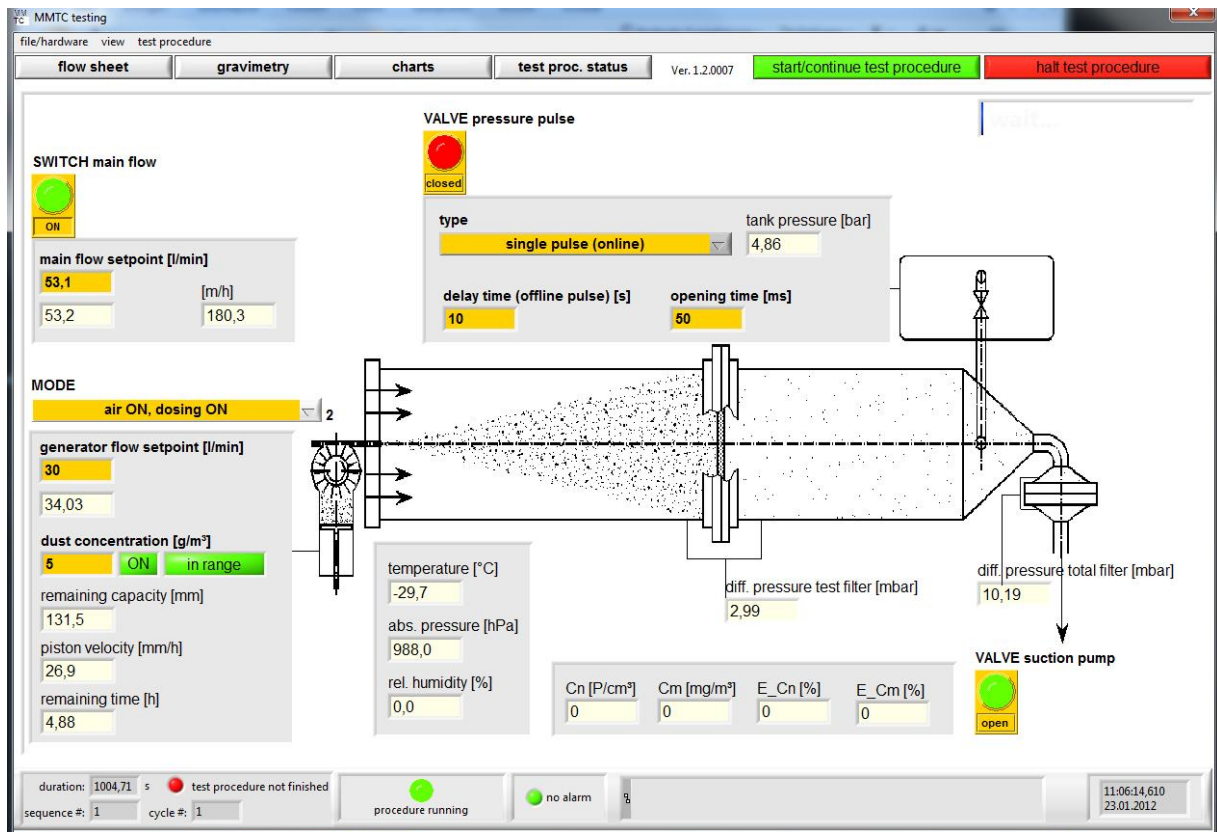


Abbildung 40: Screenshot FLOWSHEET der Steuersoftware Palas MMTC

In *Abbildung 41* ist ein Überblick über die verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten gegeben. *Dedusting* beschreibt die Abreinigung, wobei man hier die Möglichkeit zwischen einer zeitlichen Steuerung und einer zyklusgesteuerten Abreinigung findet.

Abortion beschreibt die verschiedenen Abbruchoptionen des Versuches. Während des Homogenisierungsbetriebes (siehe 5.5 *Versuchsdurchführung*) wurde nach Zeit (*by duration*) und bei den eigentlichen Hauptversuchen nach einer Zykluszahl (*by # of Cycles*) von Acht Zyklen gestoppt.

Gravimetry bezieht sich auf die Eingabe der ausgemessenen gravimetrischen Werte in die Software für die Auswertung und wird nur bei den Hauptversuchen mit einbezogen.

Desweiteren musste man noch die Geschwindigkeiten, die Umwelteinflüsse und die Stopfdichten eingeben um die vorgegebene Konzentration im Dispergierer steuern zu können.

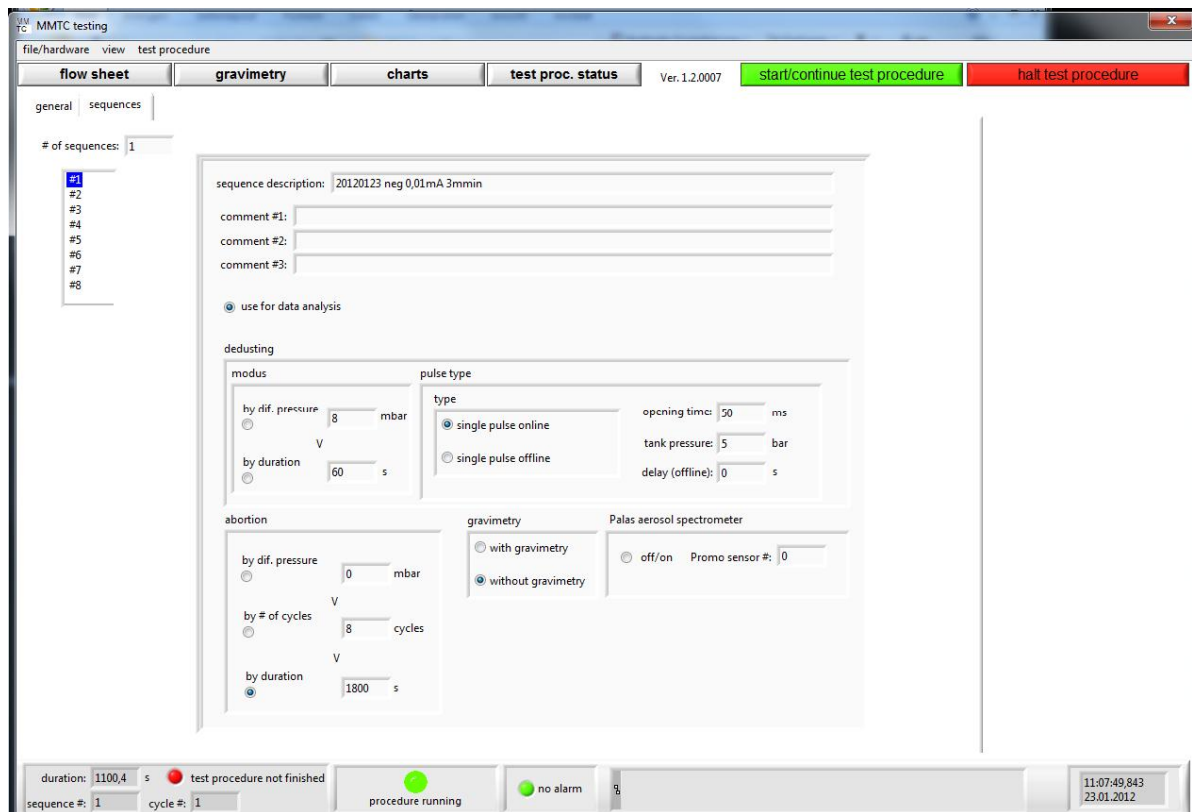


Abbildung 41: Screenshot TESTPROC.STATUS der Steuersoftware Palas MMTC

5.5 Versuchsdurchführung

- **Staubaufbereitung:**

Der Teststaub wird für mindestens vierundzwanzig Stunden in einen Trockenofen gegeben. Danach wird er in einen Glasevaporator zum Abkühlen (auf Umgebungstemperatur) und zur weiteren Staubentnahme dort belassen.

- **Vorbereitung für die Staubdispergierung – Stopfung:**

Die Stopfung des Staubes erfolgt nach Norm, das heißt bei Zugabe kleinerer Mengen wird der Staub durch das Eigengewicht eines Stößels komprimiert. Dadurch kommt es zu einer gleichmäßigen Dichteverteilungen über die gesamte Kolbenhöhe. Der Kolben wird abgewogen und daraus die Stopfdichte ermittelt. Anschließend wird der Kolben in den Dispergierer eingespannt und mittels Vorschub in die Arbeitshöhe befördert.

- **Welas® digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem kurz PCS**

Mit Hilfe eines Kalibrierstaubes und der Software wird das PCS vor jeden Versuch neu ausgerichtet.

- **Homogenisierung:**

Da die Anlage nach jedem Versuch gereinigt wird, benötigt sie einen gewissen Zeitraum der Bestäubung bis sich ein homogener Zustand in der Anlage einstellt. Oft werden durch Luftverwirbelungen, durch Kanten oder Sedimentation inhomogene Zustände verursacht. Die Versuche werden durch die Homogenisierung der Anlage leichter reproduzierbar. Desweiteren haben die Plattenelektroden unbestaubt eine wesentlich höhere Abscheideleistung als solche mit dünner Staubschicht. Als Dauer der Homogenisierung wird die Dauer der gravimetrischen Messung herangezogen.

- **Gravimetrische Messung:**

Die Dauer der gravimetrischen Messung ist abhängig von den einzelnen Geschwindigkeiten im Versuch. Die Intervalle ergeben sich aus den verschiedenen Massenkonzentrationen an Staub, die durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten bei gleicher Konzentration in den Kanal gelangen. Dies wird durch die längeren Bestäubungszeiten bei niedriger Geschwindigkeit kompensiert. Bei dieser Untersuchung werden die unterschiedlichen Massenkonzentrationen an Staub gemessen, welche bei den verschiedenen Versuchsparametern durchgeführt werden. Deswegen wird hier nicht abgereinigt, sondern es wird die volle Massenkonzentration am Filter ausgewogen.

Geschwindigkeit [m/min]	2	3	4	5
Dauer [min]	45	30	22,5	18

Tabelle 2: Dauer der gravimetrischen Messungen auf Grund der verschieden Versuchsgeschwindigkeiten

- **Versuchsdurchführung bei 8 Zyklen mit Onlineabreinigung**

Wie in der Softwarebeschreibung schon erwähnt sind diese hier die eigentlichen Hauptversuche. Dabei wird über einen Zeitraum von acht Zyklen der Druckverlust über die Zeit gemessen. Bei Erreichen eines Maximaldruckes von 8mbar wird die automatische Abreinigung ausgelöst und damit der Druckverlust reduziert.

Die Abreinigungsdrücke von 8mbar sind auch in der Industrie üblich, während sich die Anzahl von acht Zyklen aus der Überlegung eines übersichtliches Ergebnisses und aus dem weiter ansteigenden Restdruckverlustes, welcher ab einer gewissen Anzahl an Zyklen ($n > 30$) zu einem rapiden Anstieg des Restdruckverlustes führt, entstanden ist. Dies wurde in nachfolgenden Versuchen außerhalb des Rahmens der Diplomarbeit noch untersucht. (siehe Anhang: *A1 Langzeitversuche des Hybridfilters*). Außerdem ist die Versuchsdauer bzw. die Anzahl von acht Zyklen auch von der begrenzten Staubmenge im Dispergierer abhängig.

Hier wird die Massenkonzentration im Inneren des Filters ausgewogen. Deswegen wird als Abschluss des achten Zyklus nochmals abgereinigt.

- **Versuchsabschluss**

Testfilter und Absolutfilter werden abgewogen, die Daten abgespeichert und die Anlage anschließend gründlich gereinigt. Im Anschluss wird der Staub für die nächsten Versuche vorbereitet.

6. Auswerteverfahren

6.1 Verteilungen und Charakterisierung der Partikel

Die Anzahlverteilung, auch das erste Moment der Verteilung, wird mit $M_{1,0}$ bezeichnet und repräsentiert das gewogene Mittel der Anzahlverteilung bzw. den arithmetischen Mittelwert. Gemessen wird es automatisch, durch das Palas Welas Streulichtspektrometer. Es kann aber auch wie folgend aufgelistet, aus den Gleichungen (5) – (7) berechnet werden. Mittels Gleichung (8) kann die Verteilungsdichte bestimmt werden. Gleichung (9) beschreibt die Anzahl der Partikel in einer bestimmten Partikelklasse, Gleichung (10) die Klassenbreite und Gleichung (11) beschreibt die Größenverteilung in der Mitte des Intervalls. [22]

$$M_{1,0} = \sum_v \bar{x}_v \cdot q_0(\bar{x}_v) \cdot \Delta x_v \quad (5)$$

$$M_{1,0} = \frac{1}{N_{total}} \sum_v \bar{x}_v \cdot \Delta N_v(\bar{x}_v) \quad (6)$$

$$M_{1,0} = \frac{1}{N_{total}} \cdot (\bar{x}_1 \cdot \Delta N_1(\bar{x}_1) + \bar{x}_2 \cdot \Delta N_2(\bar{x}_2) + \bar{x}_3 \cdot \Delta N_3(\bar{x}_3) + \dots + \bar{x}_v \cdot \Delta N_v(\bar{x}_v)) \quad (7)$$

$$q_0(\bar{x}_v) = \frac{\Delta N_v(\bar{x}_v)}{N_{total} \cdot \Delta x_v} \quad (8)$$

$$\Delta N_v(\bar{x}_v) = N_{v+1}(x_{v+1}) - N_v(x_v) \quad (9)$$

$$\Delta x_v = x_{v+1} - x_v \quad (10)$$

$$\bar{x}_v = \frac{1}{2}(x_v + x_{v+1}) \quad (11)$$

$M_{1,0}$	Gewogenes Mittel der Partikelgröße
\bar{x}_v	Partikelgröße in der Mitte des Intervalls zwischen v und $v+1$
$q_0(\bar{x}_v)$	Verteilungsdichte
Δx_v	Intervallbreite der jeweiligen Klasse
x_v	Bestimmte Partikelgröße
N_{total}	Gesamtanzahl aller Partikel
$\Delta N_v(\bar{x}_v)$	Gesamtzahl aller Partikel innerhalb des Intervalls
$N_v(x_v)$	Partikelanzahl aller Partikel kleiner x_v
v	Nummer der Partikelklasse (Laufvariable 0, 1, 2...)

6.2 Zyklusdauer

Die Zyklusdauer sagt aus wie lange die Filtration bis zum Erreichen eines bestimmten Druckverlustes benötigt. In den Versuchen ist die Druckdifferenz auf 8mbar eingestellt. Je länger ein Zyklus für einen bestimmten maximalen Druckverlust dauert, umso besser wirkt sich dies auf das Filtrationsverhalten, die Lebensdauer des Filtermediums und auch auf die Ökonomie des Energieaufwandes aus. Wie in *Abbildung 42* ersichtlich kommt es zu einer Verkürzung der Zyklusdauer während der Filtration. Im ersten Zyklus ist die Zyklusdauer noch sichtlich am längsten, da sich hier zuerst die inneren Verhältnisse im Filtermedium einstellen müssen. Nach jeder Abreinigung wird der Filter immer mehr verlegt und dadurch verkürzen sich auch die einzelnen Abstände. Natürlich ist die Zyklusdauer auch abhängig von der Anströmgeschwindigkeit des Rohgases. Bei niedrigen Geschwindigkeiten werden die meisten Partikel durch die elektrostatische Vorabscheidung abgeschieden, wobei sich in dieser Vorabscheidung hauptsächlich größere Partikel abscheiden lassen und damit die innere Verstopfung am Filter fördern. Höhere Geschwindigkeiten neigen dazu, zu viele Partikel bei der Vorabscheidung durchzulassen, was sich ebenfalls negativ auf die Abreinigungsfiltration auswirkt und damit die Zyklusdauer reduziert. In den Versuchen werden das Verhalten der einzelnen Auflademechanismen sowie die verschiedenen Geschwindigkeiten gegenübergestellt und verglichen.

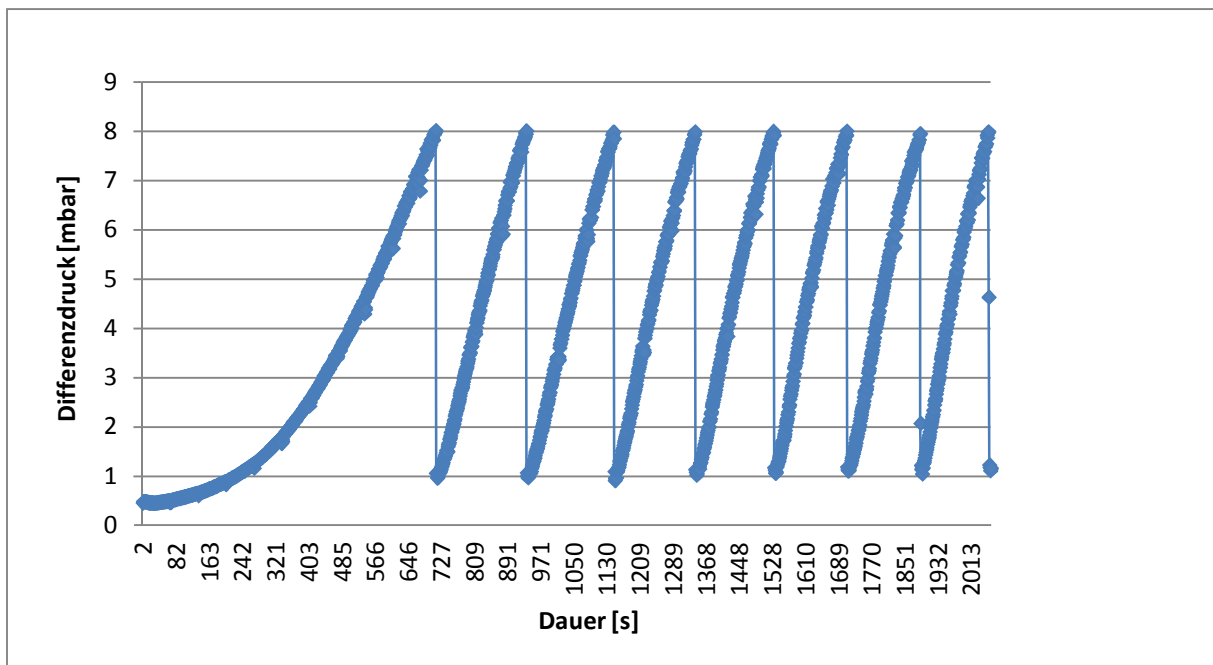


Abbildung 42: Typisches Druckverlaufschema bei 8 Zyklen und einer Geschwindigkeit von 3m/min mit Nadelfilz als Filtermedium

6.3 Restdruckverlust

Der Restdruckverlust charakterisiert das Verhalten des Filtermediums während der Filtration anhand der abnehmenden Durchlässigkeit des Filters. Dies zeigt sich durch einen ständig steigenden Restdruckverlauf. Durch die Zunahme der Einlagerungen im Inneren des Filters steigt der Druckverlust kontinuierlich an. Nach der Abreinigung reduziert sich aber die Druckdifferenz. Mit der Dauer des Filtrationsversuches steigt damit auch der Restdruckverlust an. Ab einem bestimmten Zeitpunkt ist die Durchlässigkeit des Filters zu gering. Der Druckverlust selbst wurde automatisch in 1/10 Sekundenintervallen vom Palas MMTC 2000 erfasst und mittels einer Software ausgegeben. Aus den Daten kann anschließend der mittlere Druckverlust sowie der mittlere Restdruckverlust ermittelt werden. Da sich im ersten Zyklus noch kein homogener Zustand einstellt, wird der Restdruckverlust in dem Bereich des zweiten und achten Zyklus herangezogen.

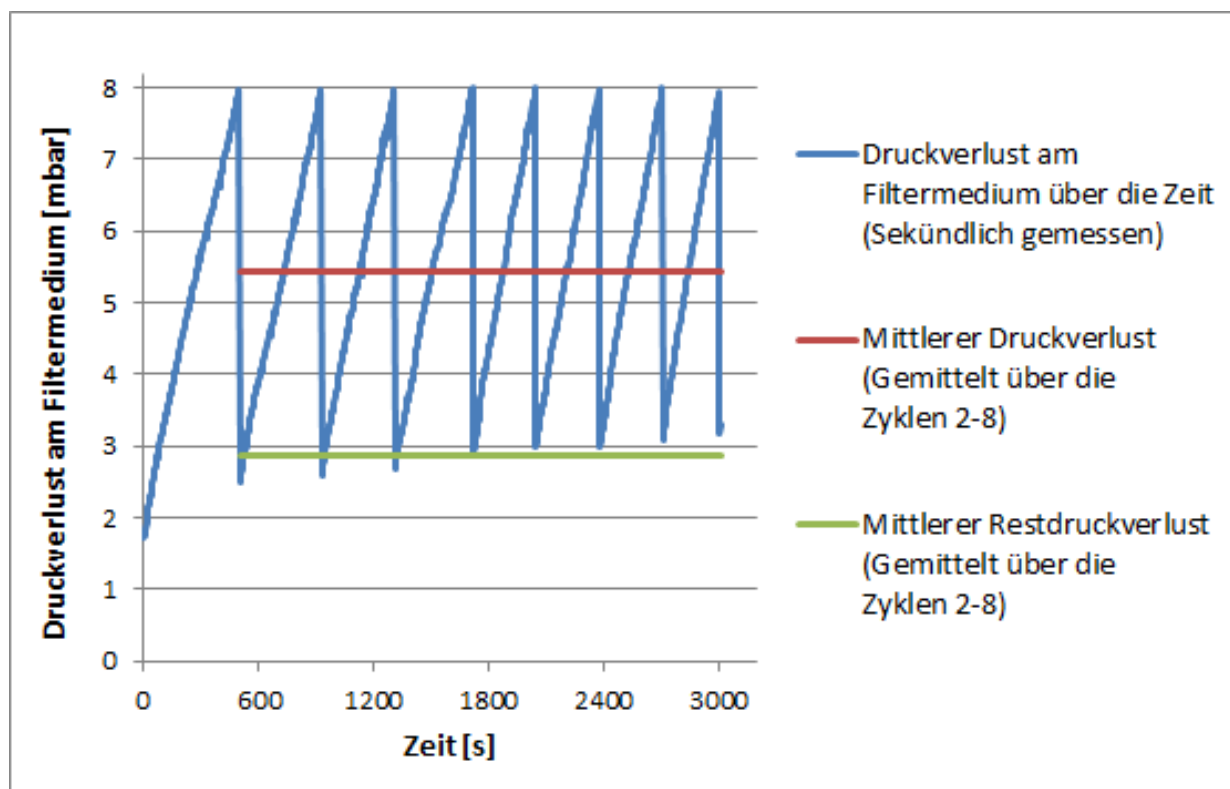


Abbildung 43: Schema der Druckverluste am Filtermedium [1]

6.4 Partikelanzahl im Reingas

Neben den Druckverlusten und dem Arbeitschema der Filter ist auch die Anzahl der Partikel auf der Reingasseite interessant. Die Messung erfolgt mittels Welas® digital 2000 (PCS siehe 5.3.1 Welas® digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem). Die Messungen erfolgen im Minutenintervall und werden summiert ausgegeben. Dadurch kann ein zeitlicher Verlauf der Partikelverteilung, wie in *Abbildung 44* ersichtlich, dargestellt werden. Die Emissionspeaks nach der Onlineabreinigung sind gut zu erkennen. Der voreingestellte Messbereich beträgt $0,3\mu\text{m}$ bis $17\mu\text{m}$.

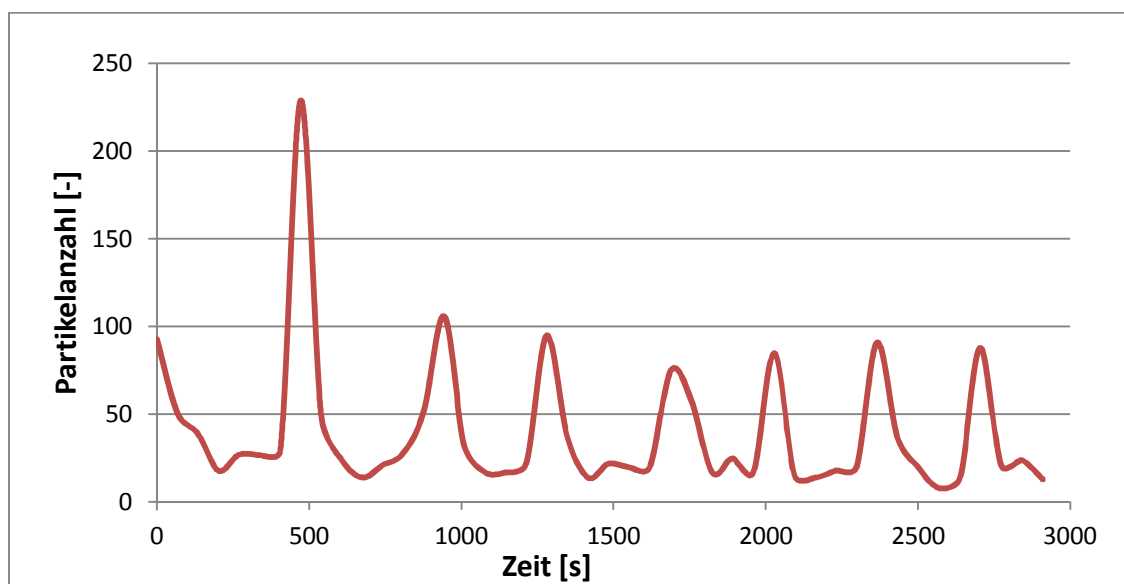


Abbildung 44: Schema einer Partikelanzahlmessung während eines Versuches

7. Auswertungen

7.1 Übersicht der Versuche

Filtermedium	Korona			Teststaub	Staubkonzentration
	Polarität	Spannung [kV]	Strom [mA/Elektrode]		
Membran	wo	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Membran	neg	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Membran	pos	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Membran	bi	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Membran	bi AC	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Nadelfilz	wo	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Nadelfilz	neg	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Nadelfilz	pos	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Nadelfilz	bi	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³
Nadelfilz	bi AC	9,5 [kV]	0,1 mA/e	Pural NF	5g/m ³

konstanter Restdruckverlust	konstante Zyklusdauer	konstante Geschwindigkeit	Filtrationsgeschwindigkeit [m/min]					
			1,5	2	3	4	5	6
✓	✓	✓	x	x	x	x	x	
✓	✓	✓		x	x	x	x	x
✓	✓	✓		x	x	x	x	
✓	✓	✓		x	x	x	x	
✓	✓	✓		x	x	x	x	
✓	✓	✓	x	x	x	x	x	
✓	✓	✓		x	x	x	x	x
✓	✓	✓		x	x	x	x	
✓	✓	✓		x	x	x	x	
✓	✓	✓		x				

Tabelle 3: Versuchsaufstellung und zugehörige Parameter

- wo..... without charging = ohne Koronaströme
- neg..... unipolare negative Koronaströme
- pos..... unipolare positive Koronaströme
- bi..... bipolare Koronaströme (pos & neg)
- bi AC..... bipolare Koronaströme mit Wechselfeld in der Agglomerationszone bei 35kV und 50Hz

7.2 Vergleich der Zyklusdauer bei Membranfiltern

7.2.1 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanter Filtrationsgeschwindigkeit

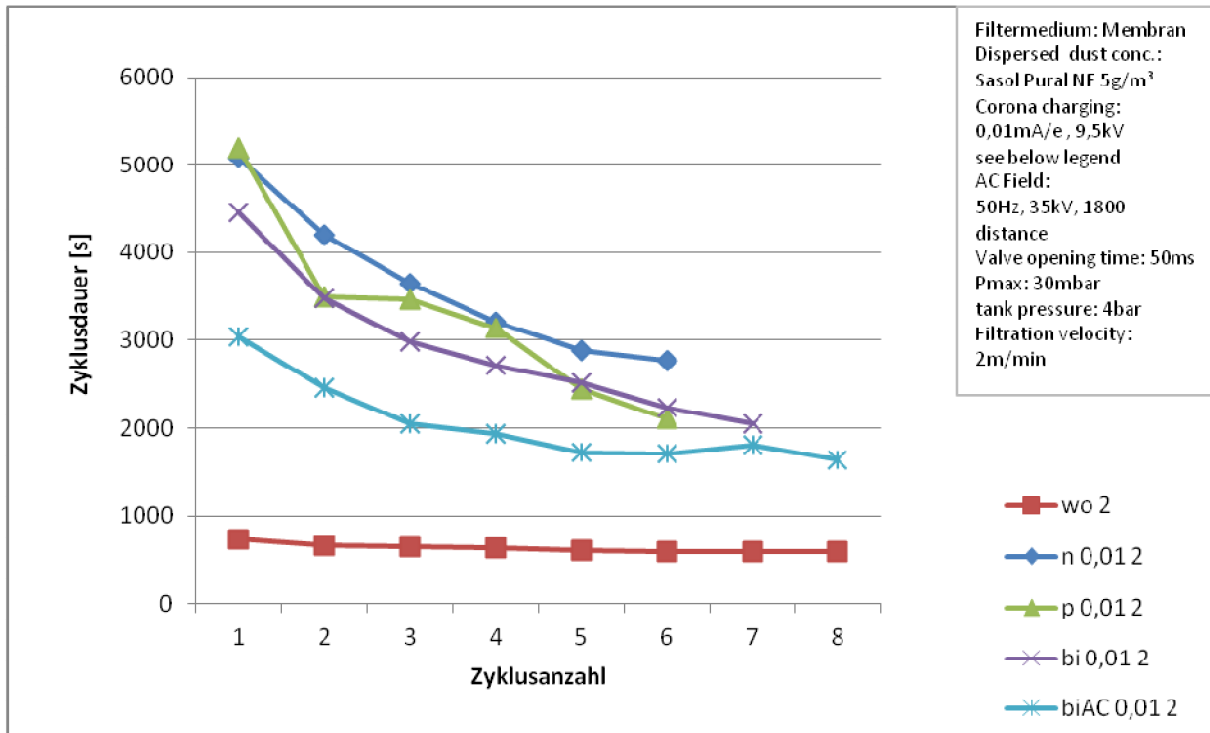


Diagramm 1: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min

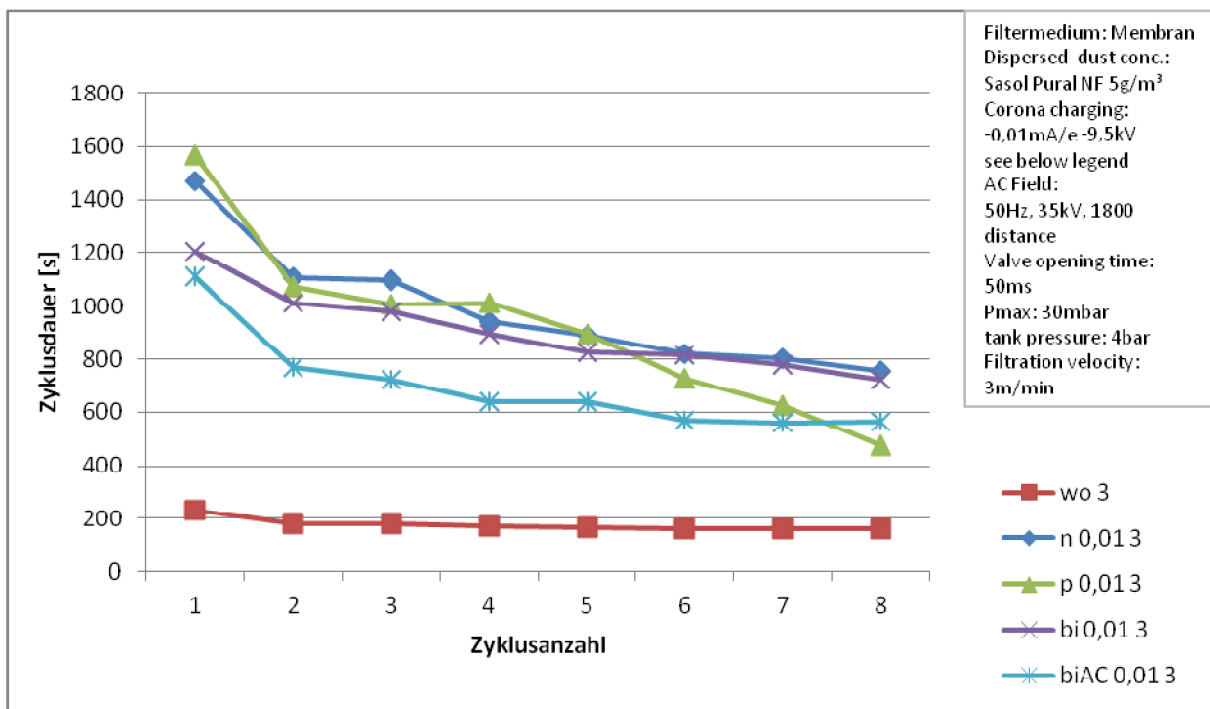


Diagramm 2: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min

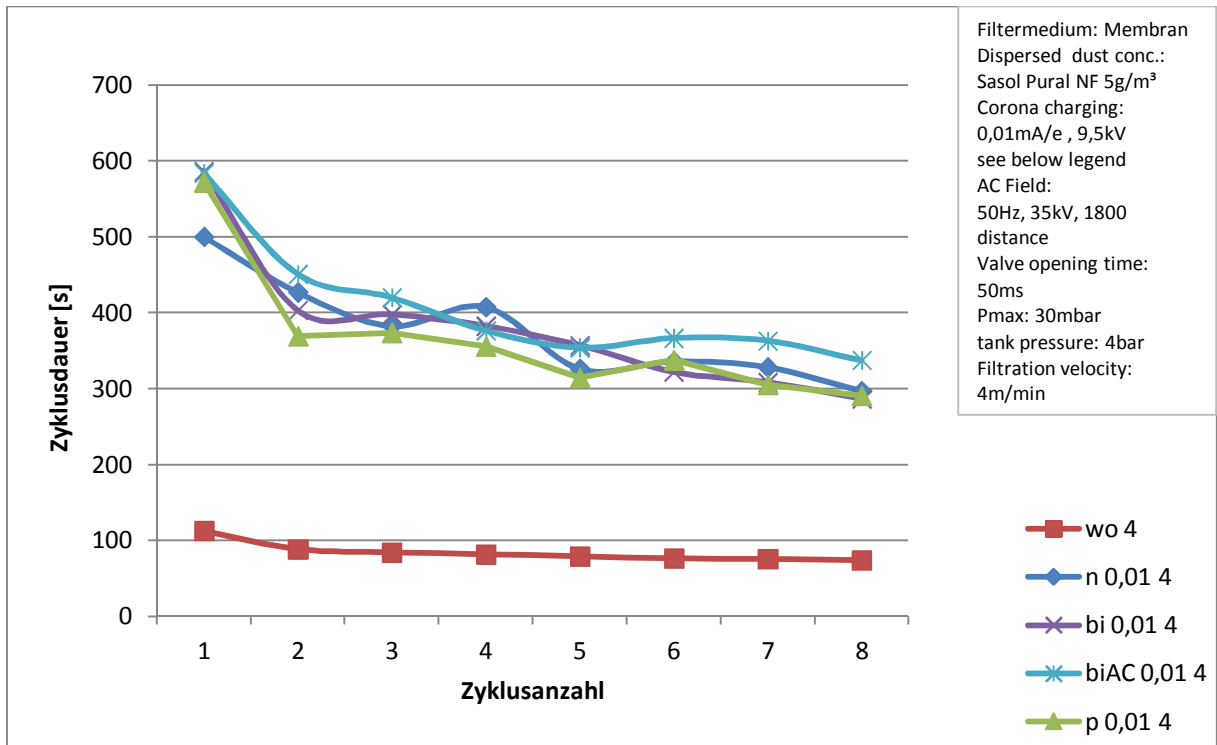


Diagramm 3: Zyklusdauer von Membranfilter mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min

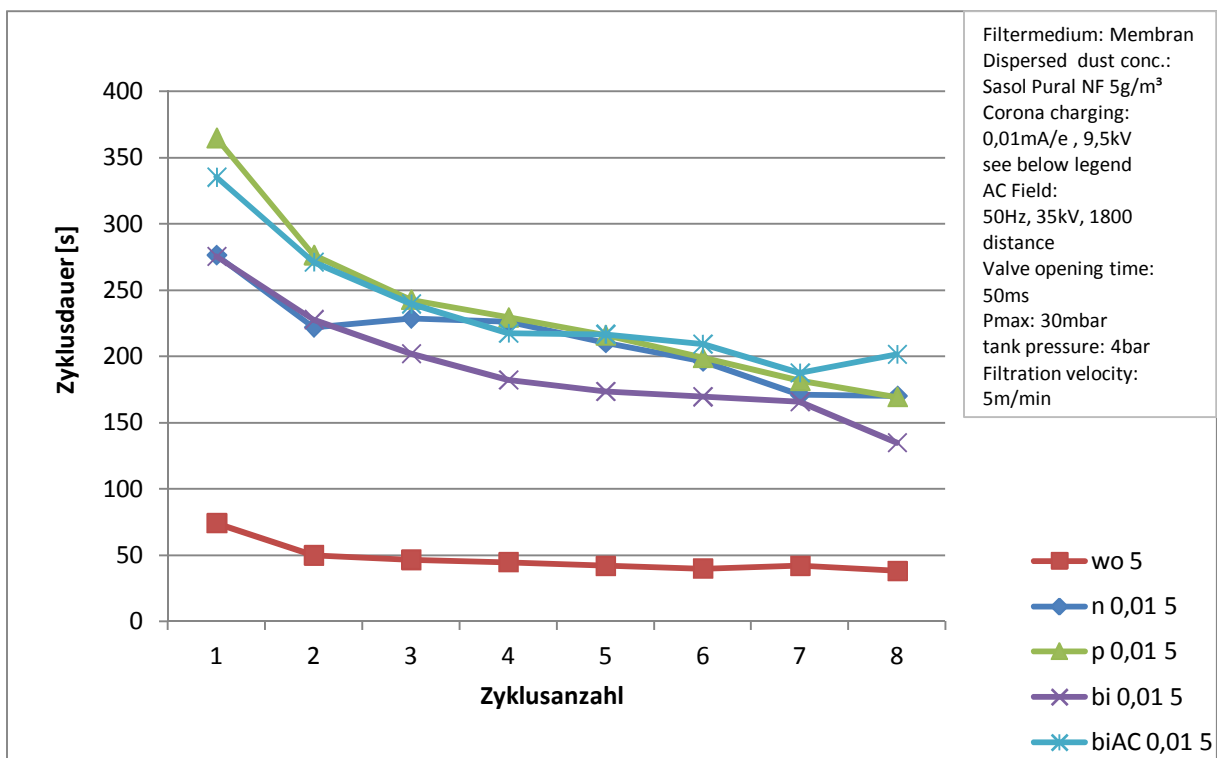


Diagramm 4: Zyklusdauer bei Membranfilter mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/min

7.2.2 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten

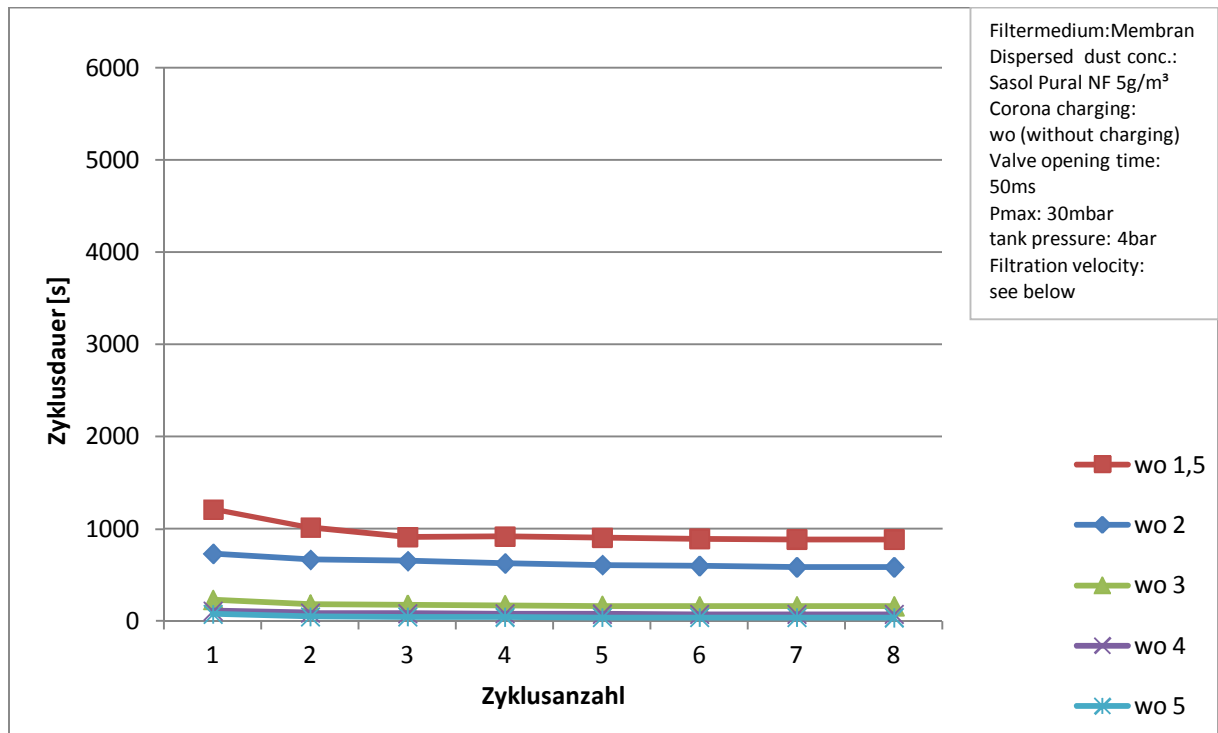


Diagramm 5: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung

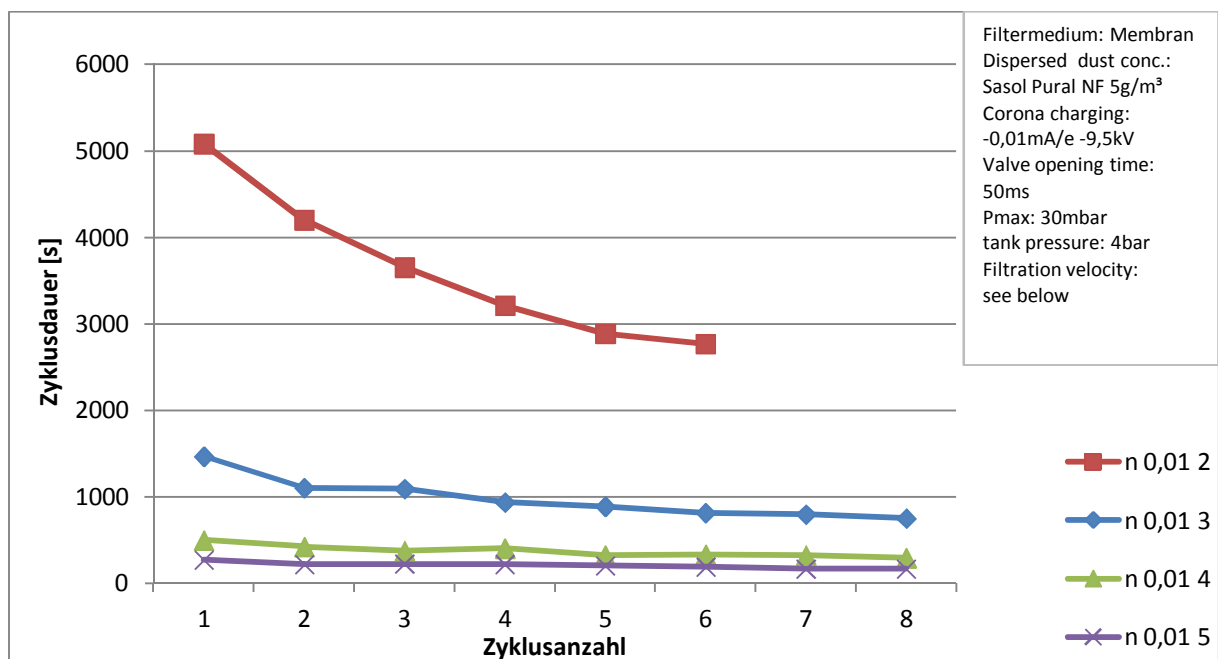


Diagramm 6: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung

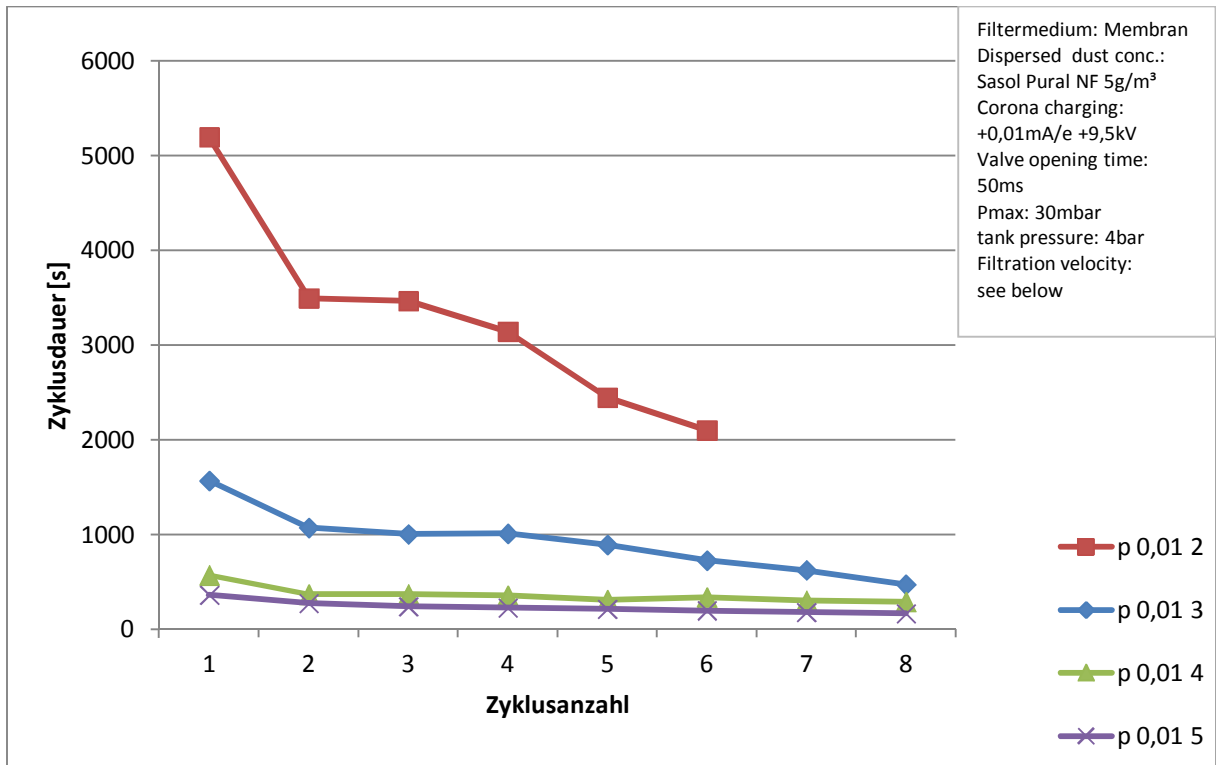


Diagramm 7: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung

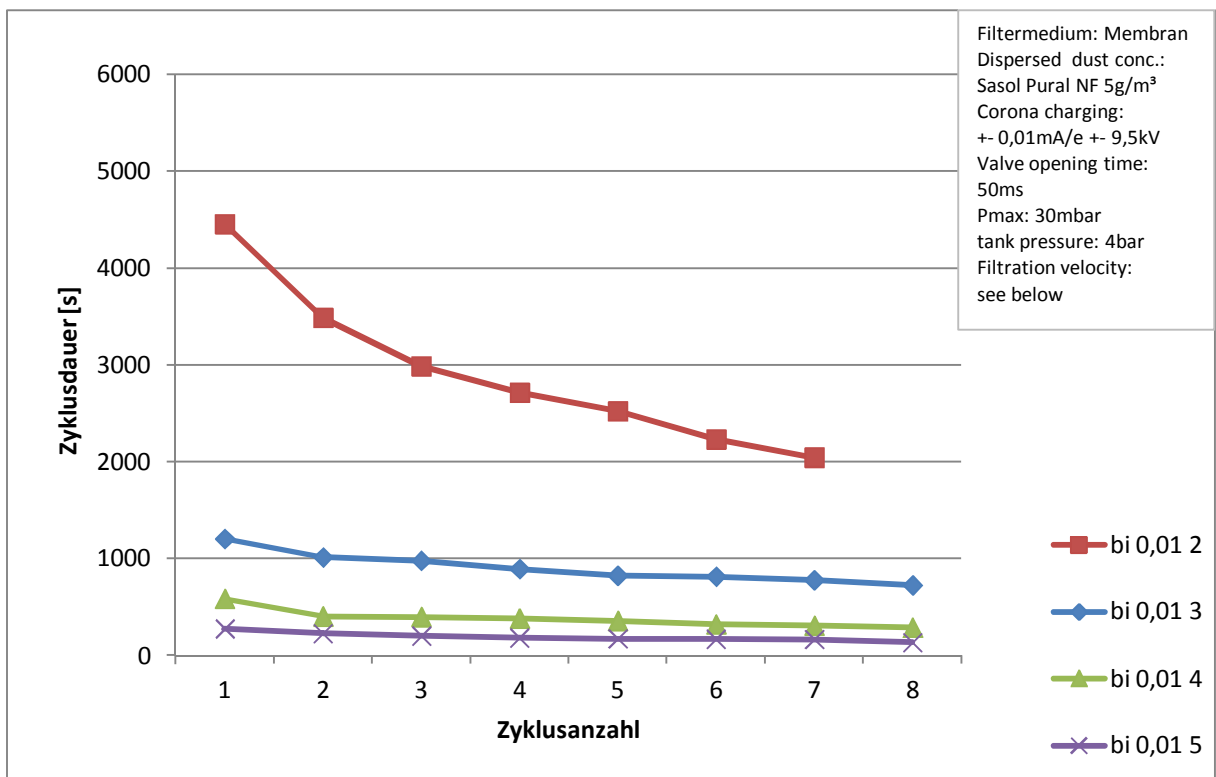


Diagramm 8: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung

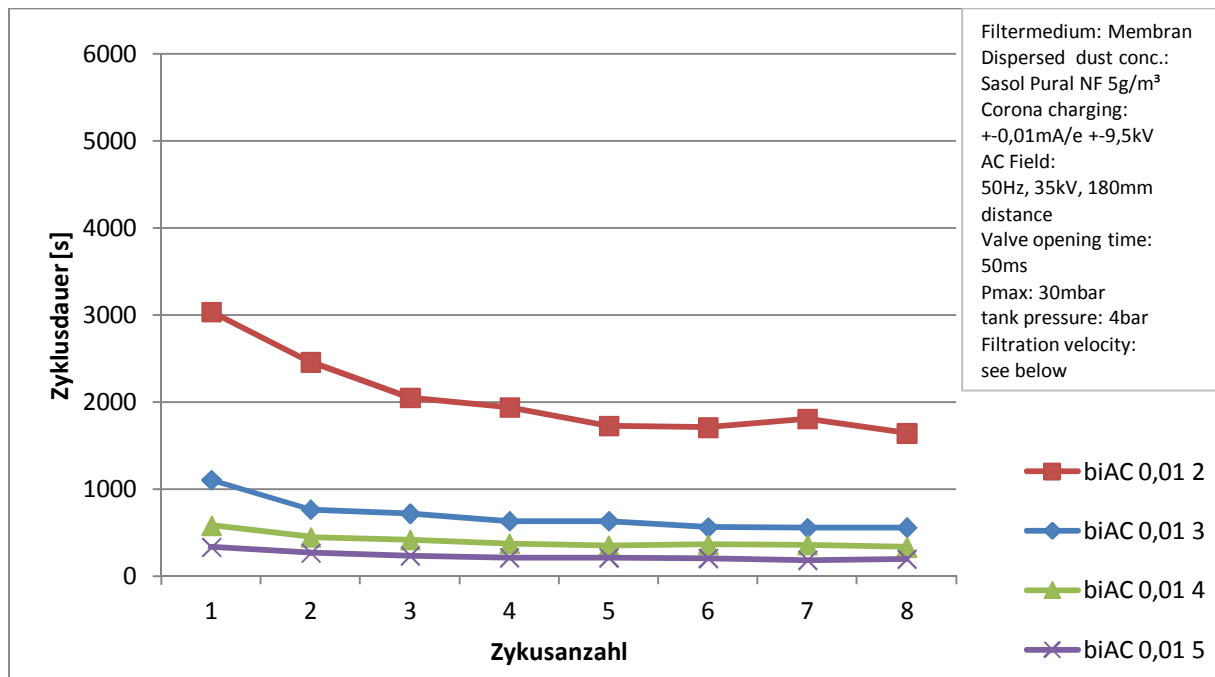


Diagramm 9: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld

7.2.3 Diskussion der Zyklusdauer bei Membranfiltern

Die Versuche ohne Aufladung zeigen eine kürzere Zyklusdauer, während die Versuche mit elektrischer Aufladung eine signifikant längere Zyklusdauer vorweisen. Bei der Geschwindigkeit von 2m/min ist es nicht möglich die maximale Zyklusdauer von 8 Zyklen zu erreichen. Grund dafür ist die begrenzte Staubmenge im Dispergierkolben. Durch die längeren Versuchszeiten und der starken Vorabscheidung durch die elektrische Aufladung werden die 8 Zyklen nicht erreicht. Zwischen den verschiedenen Aufladungsarten lässt sich kein signifikanter Unterschied erkennen. Bei niederen Filtrationsgeschwindigkeiten (2 und 3 m/min) hebt sich die bipolare Aufladung mit Wechselfeld durch eine verkürzte Zyklusdauer ab. Man kann annehmen, dass sich dieser Trend auch bei höheren Geschwindigkeiten fortsetzt, aber auf Grund der Messmethodik nicht mehr direkt erfassbar ist. Beachtlich ist auch der gemittelte Faktor 10 zwischen der langsamsten (2m/min) und der schnellsten (5m/min) Filtrationsgeschwindigkeit. Zusammengefasst kann man sagen, dass alle Aufladungsarten eine Verbesserung in Form einer längeren Zyklusdauer bringen. Unter den verschiedenen Aufladungsarten fällt nur die bipolare Aufladung mit Wechselfeld etwas schlechter aus. Alle anderen kann man als gleichwertig betrachten. Die negative und positive Aufladung zeigen dabei eine leichte Verbesserung gegenüber der bipolaren Aufladung und der Aufladungsart bipolar mit Wechselfeld. Wegen der kurzen Versuchsdauer bei den Versuchen mit Membranfilter ohne Aufladung wird auch ein Versuch mit 1,5m/s durchgeführt, um die Auswirkungen bei geringer Filtrationsgeschwindigkeit zu beobachten und um mehr anschauliche Referenzwerte zu bekommen.

7.3 Vergleich des Restdruckverlustes bei Membranfiltern

7.3.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten

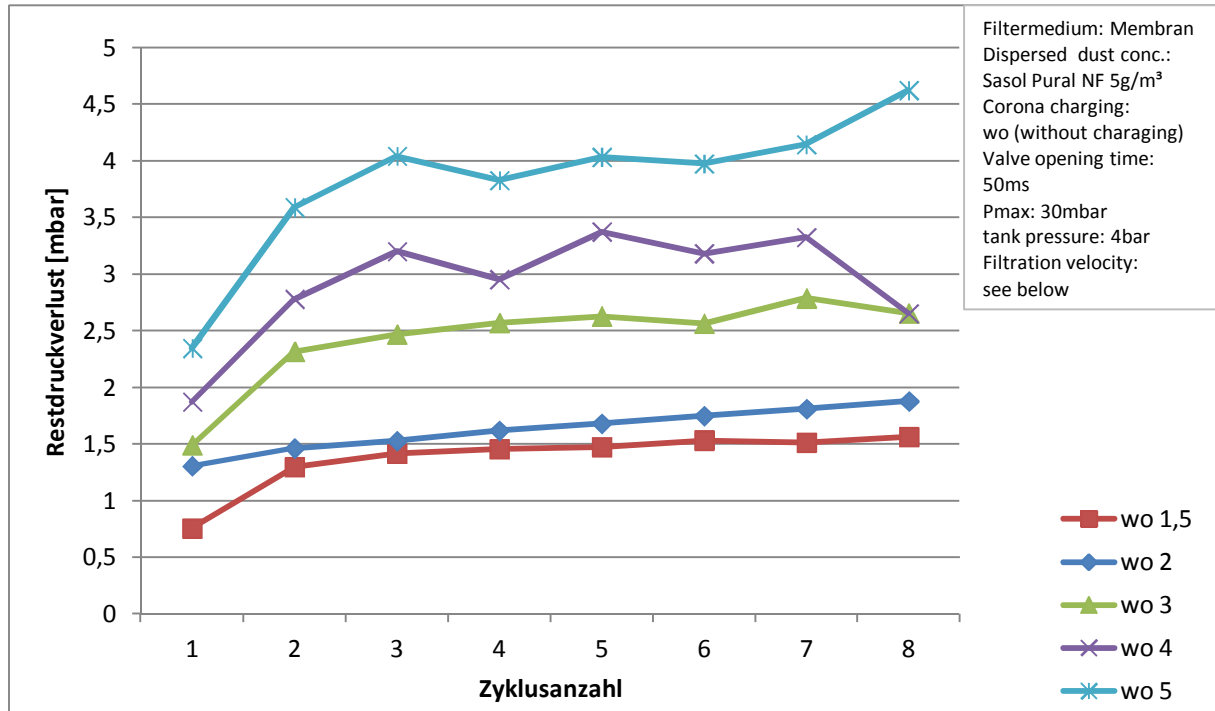


Diagramm 10: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung

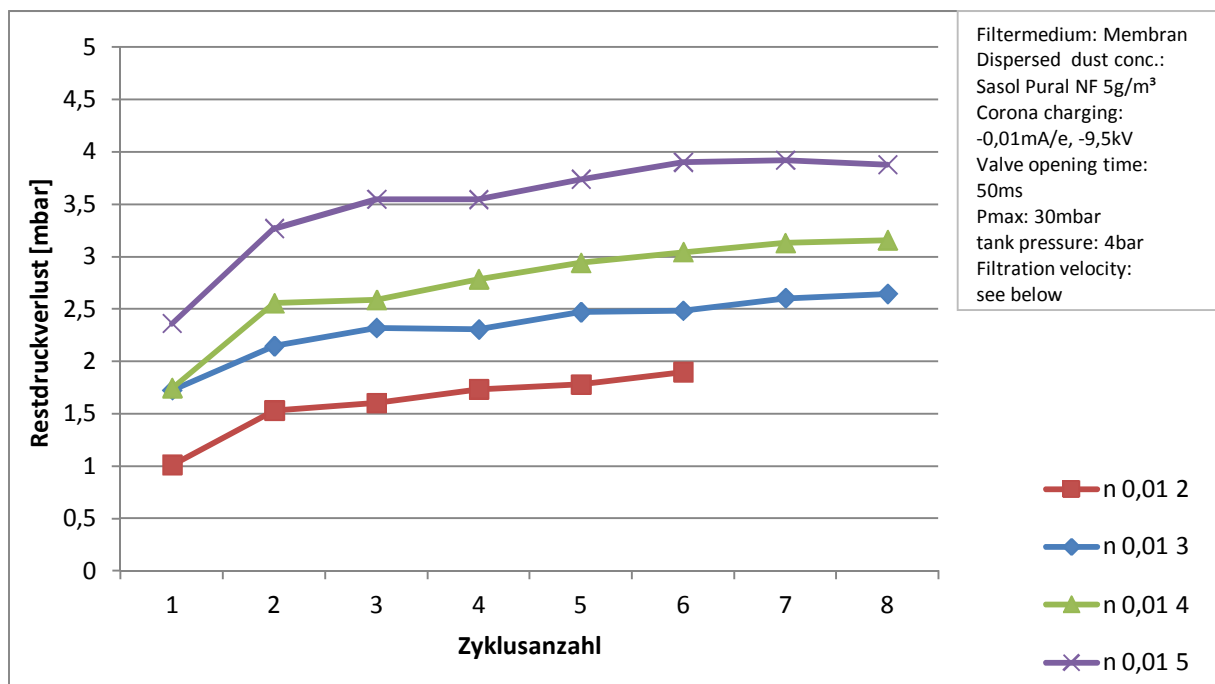


Diagramm 11: Restdruckverlust von Membranfilter mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung

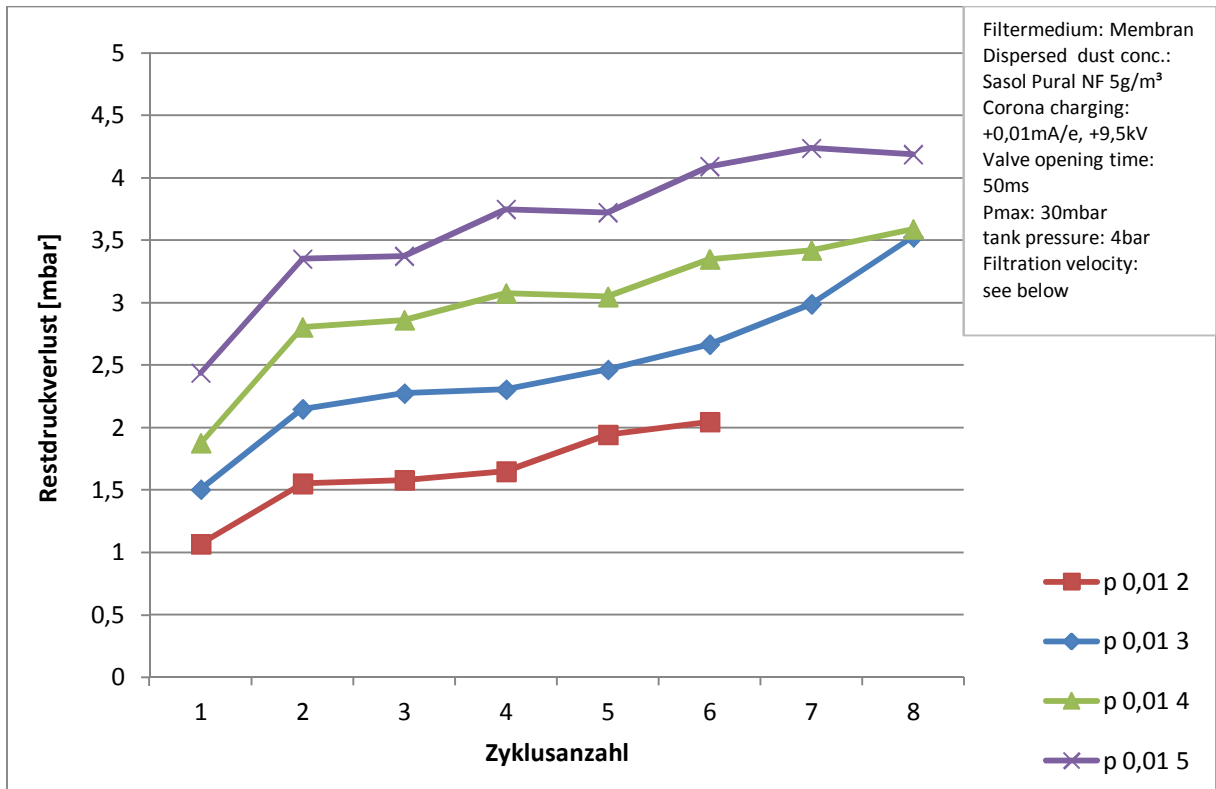


Diagramm 12: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung

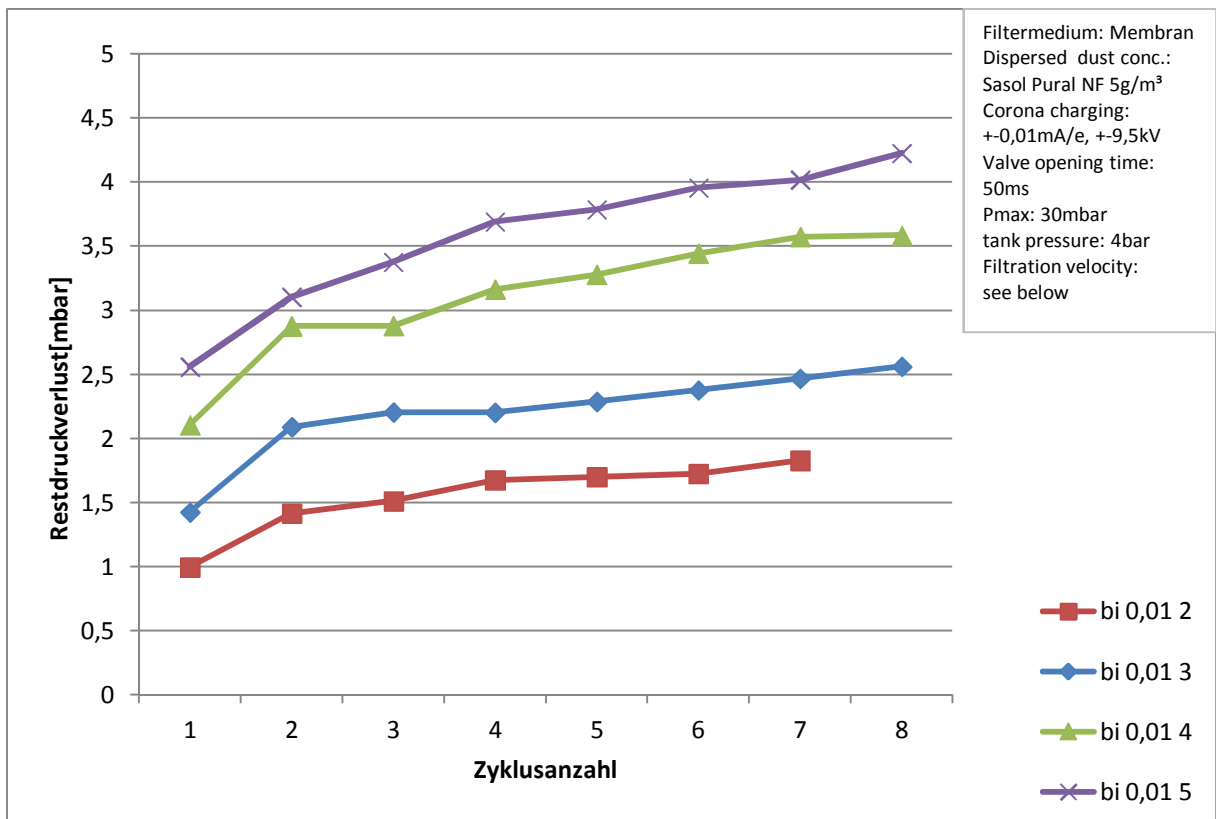


Diagramm 13: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung

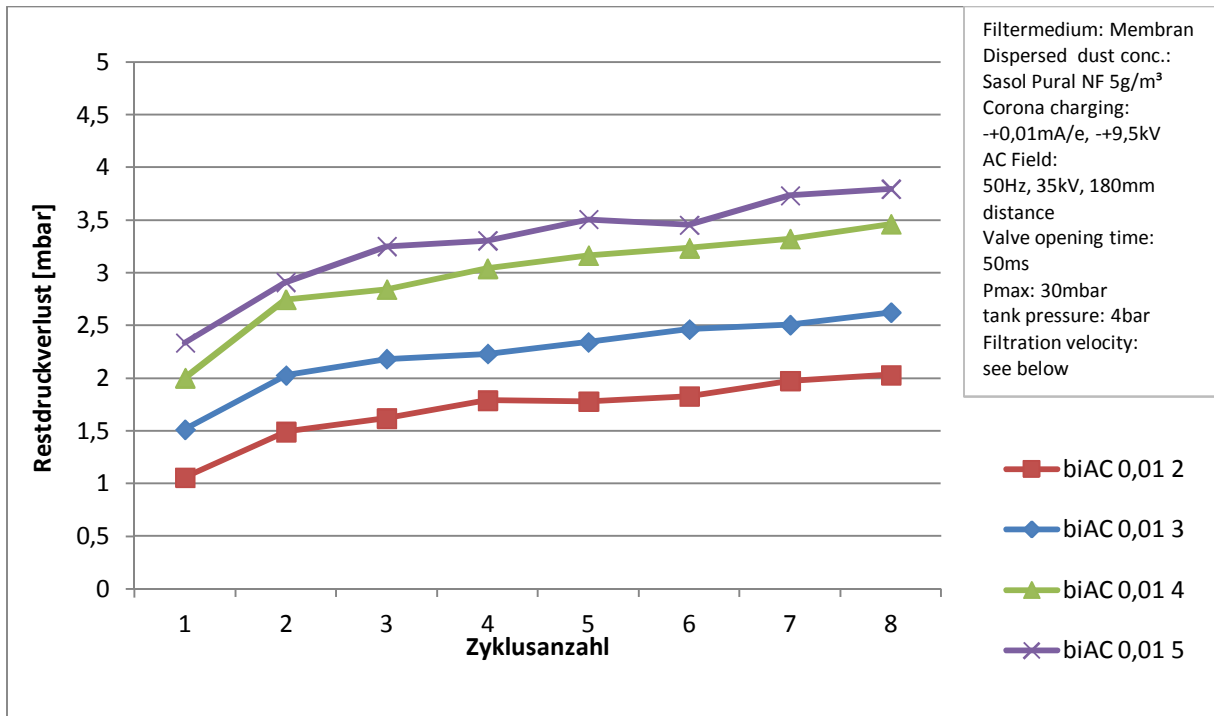


Diagramm 14: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld

7.3.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten

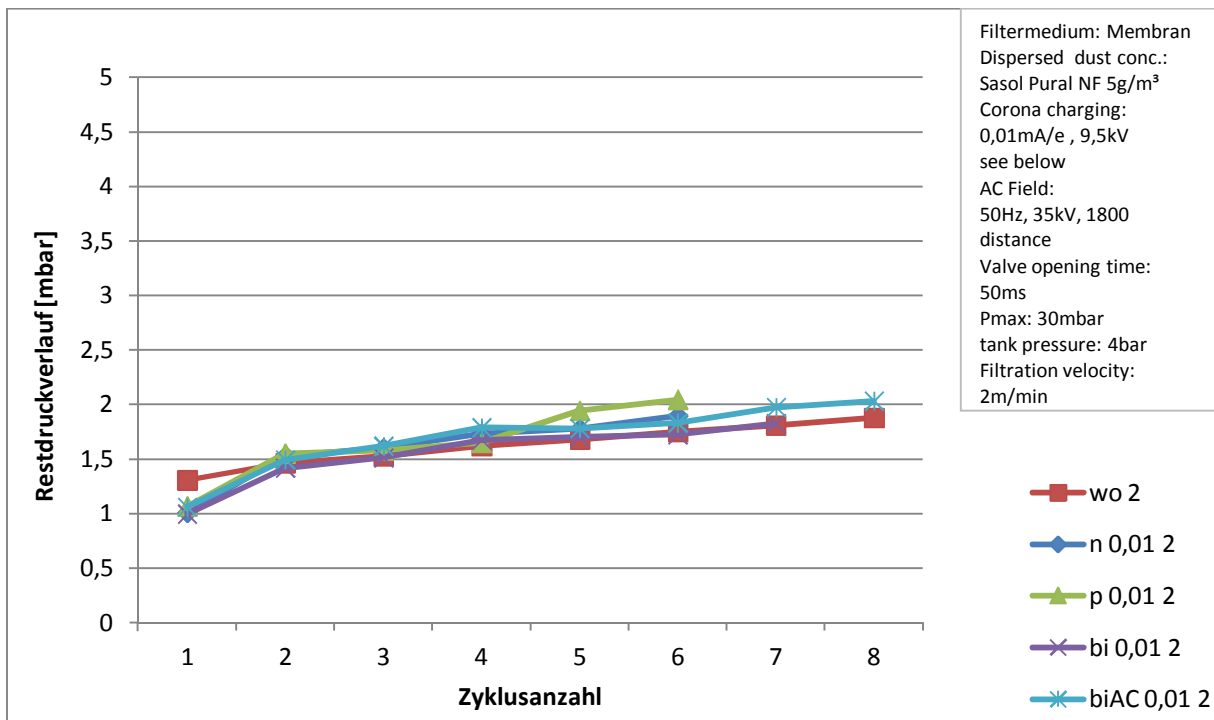


Diagramm 15: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min

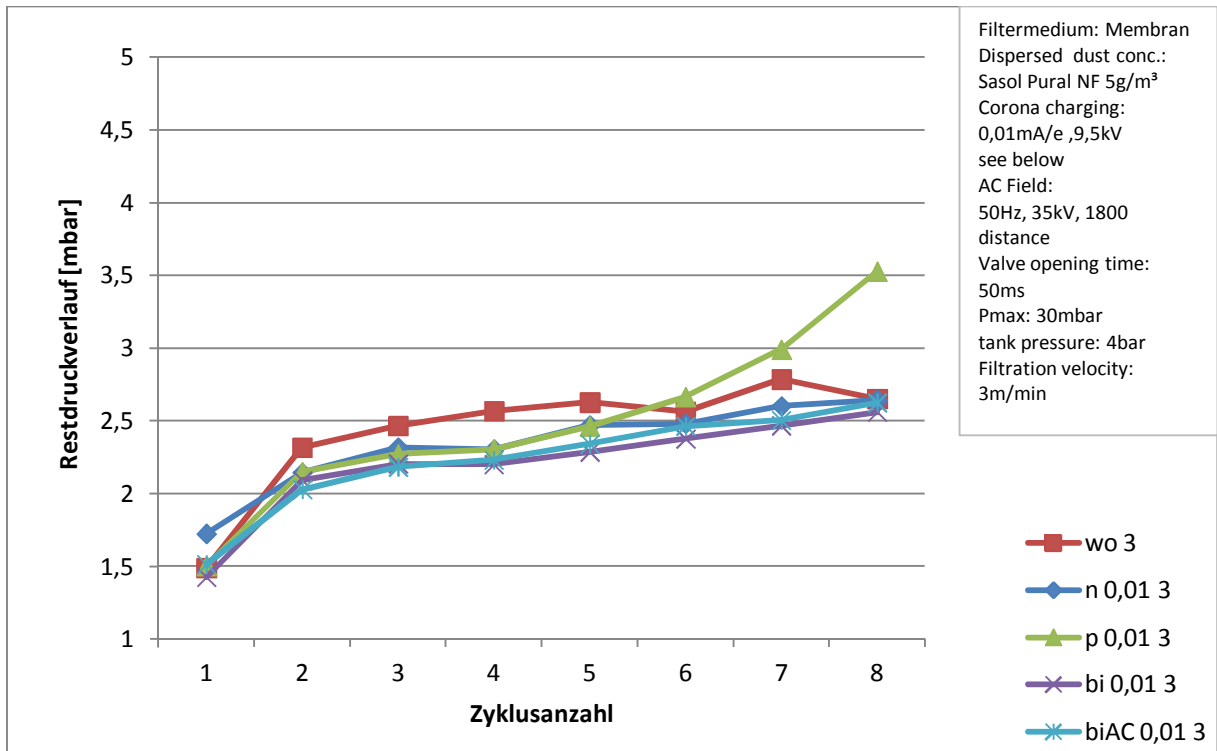


Diagramm 16: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min

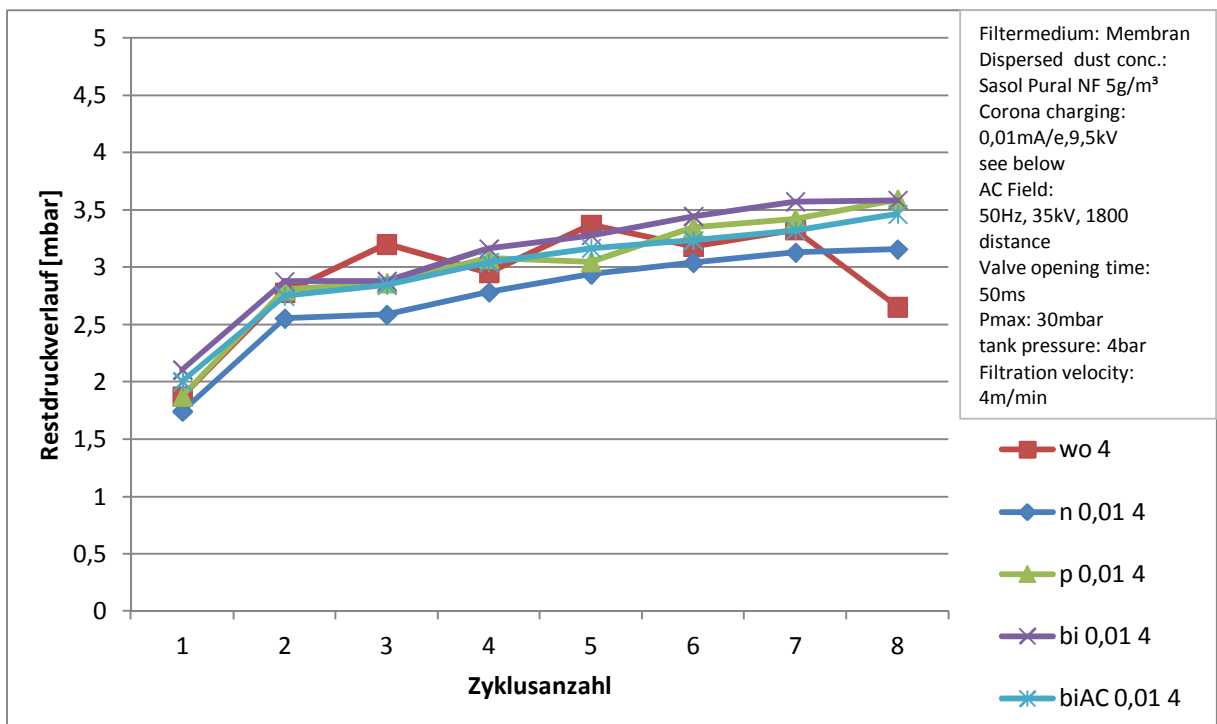


Diagramm 17: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min

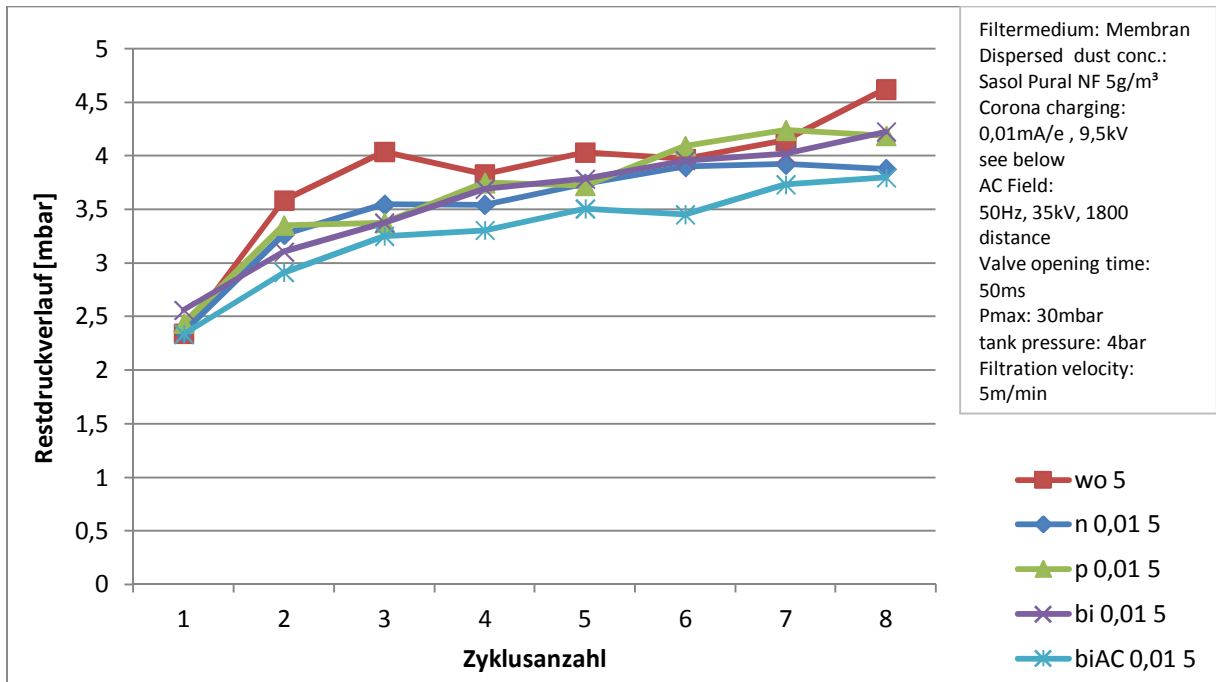


Diagramm 18: Restdruckverlust von Membranfilter mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/min

7.3.3 Diskussion des Restdruckverlustes bei Membranfiltern

Der Restdruckverlust zeigt keine signifikante Veränderung durch die elektrostatische Aufladung. Die untere Abbildung zeigt eine Gegenüberstellung des mittleren Restdruckverlustes bei verschiedenen Geschwindigkeiten und lässt die Gleichheit des Restdruckverlustes leicht erkennen.

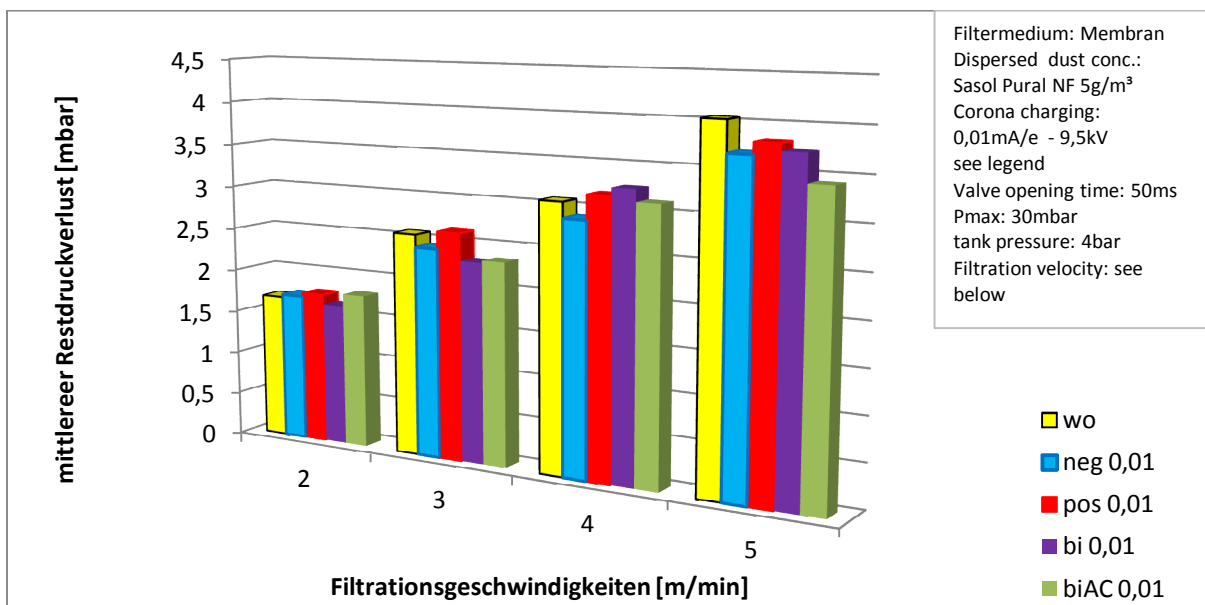


Diagramm 19: Vergleich des mittleren Restdruckverlustes bei Membranfiltern für alle Aufladungsarten und alle Filtrationsgeschwindigkeiten

7.4 Vergleich des Restdruckverlustes bei Nadelfilzfiltern

7.4.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten

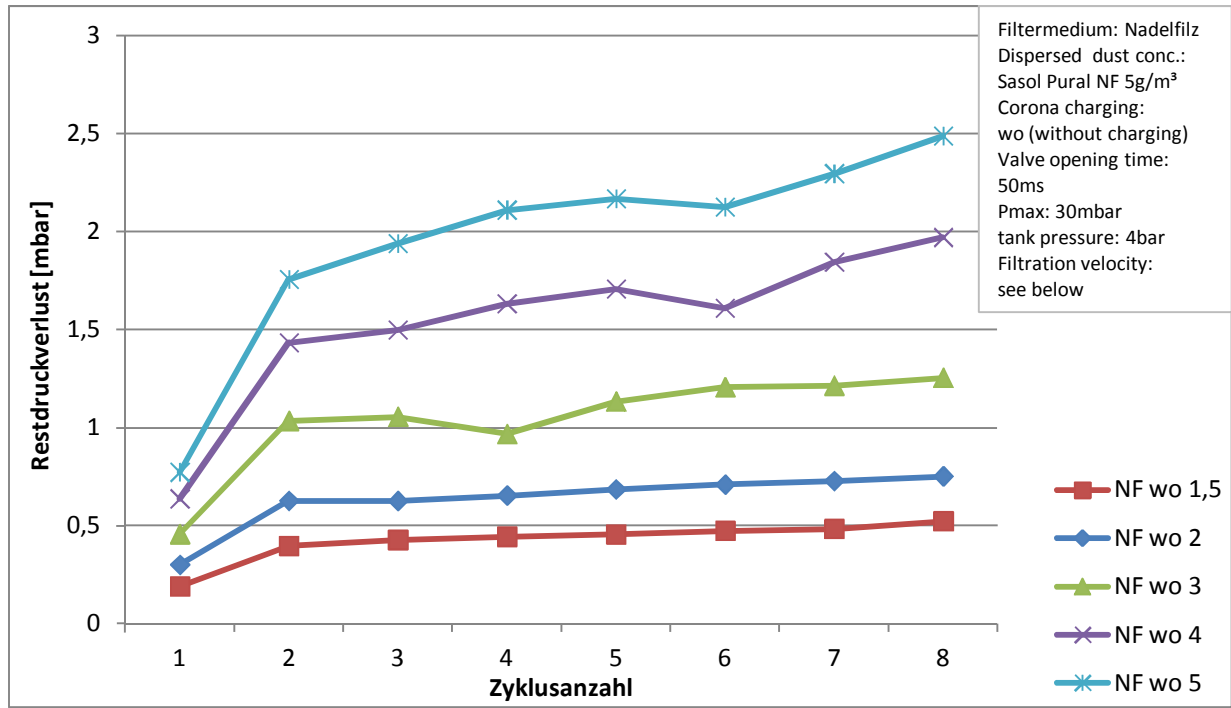


Diagramm 20: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung

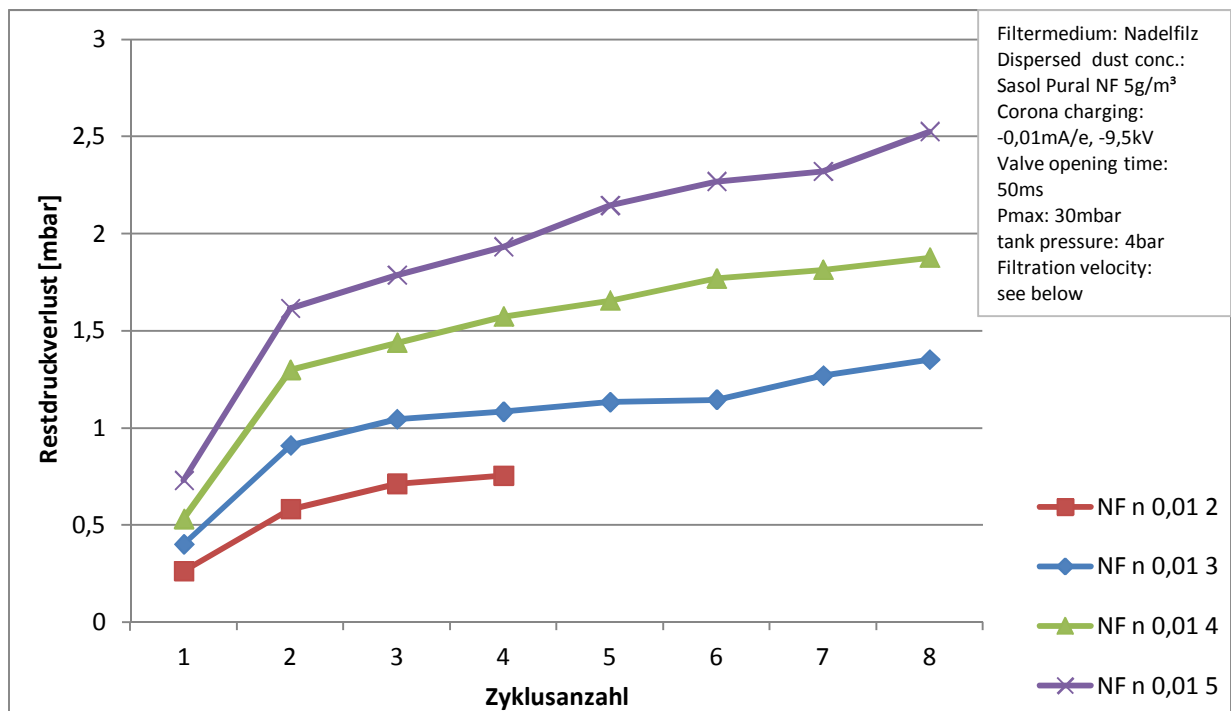


Diagramm 21: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung

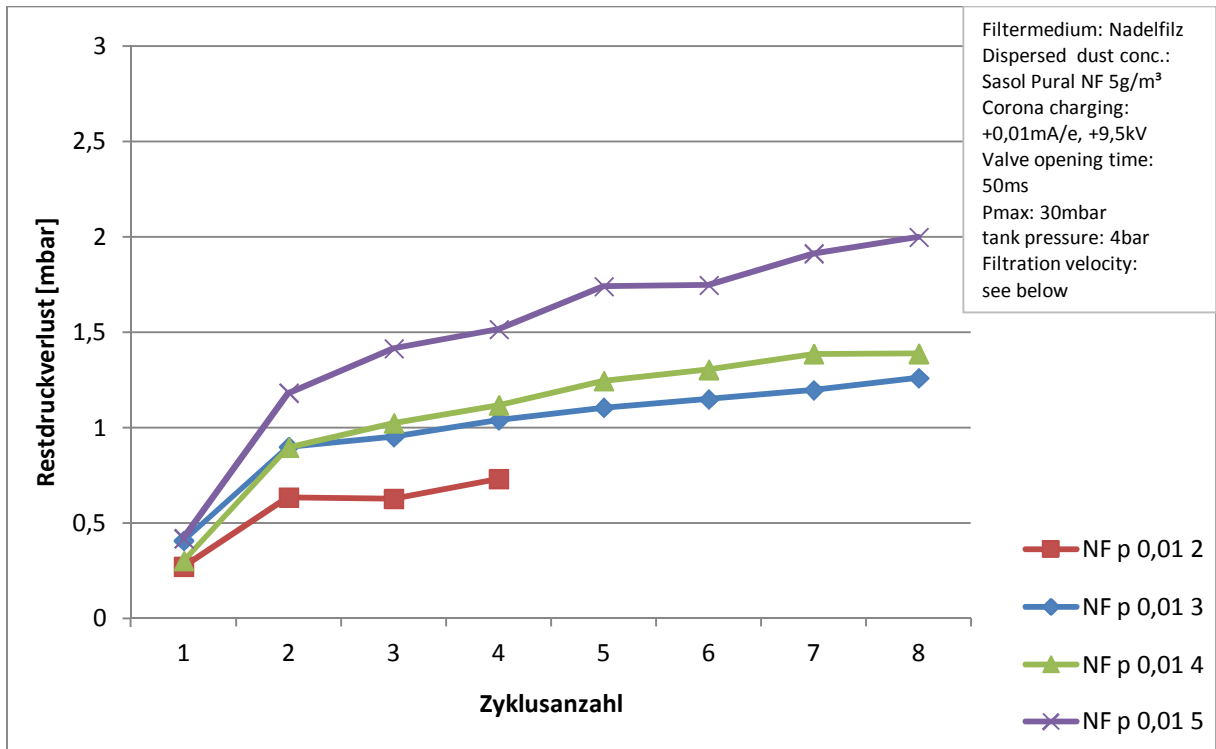


Diagramm 22: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung

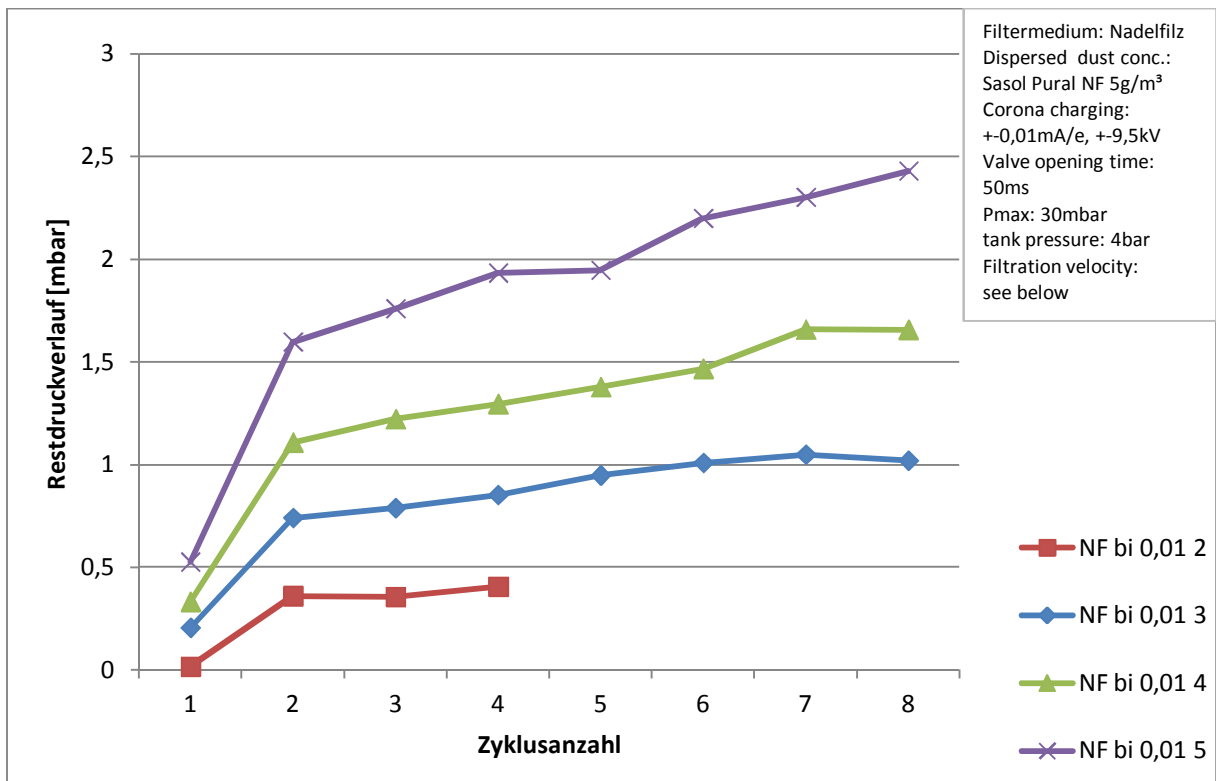


Diagramm 23: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung

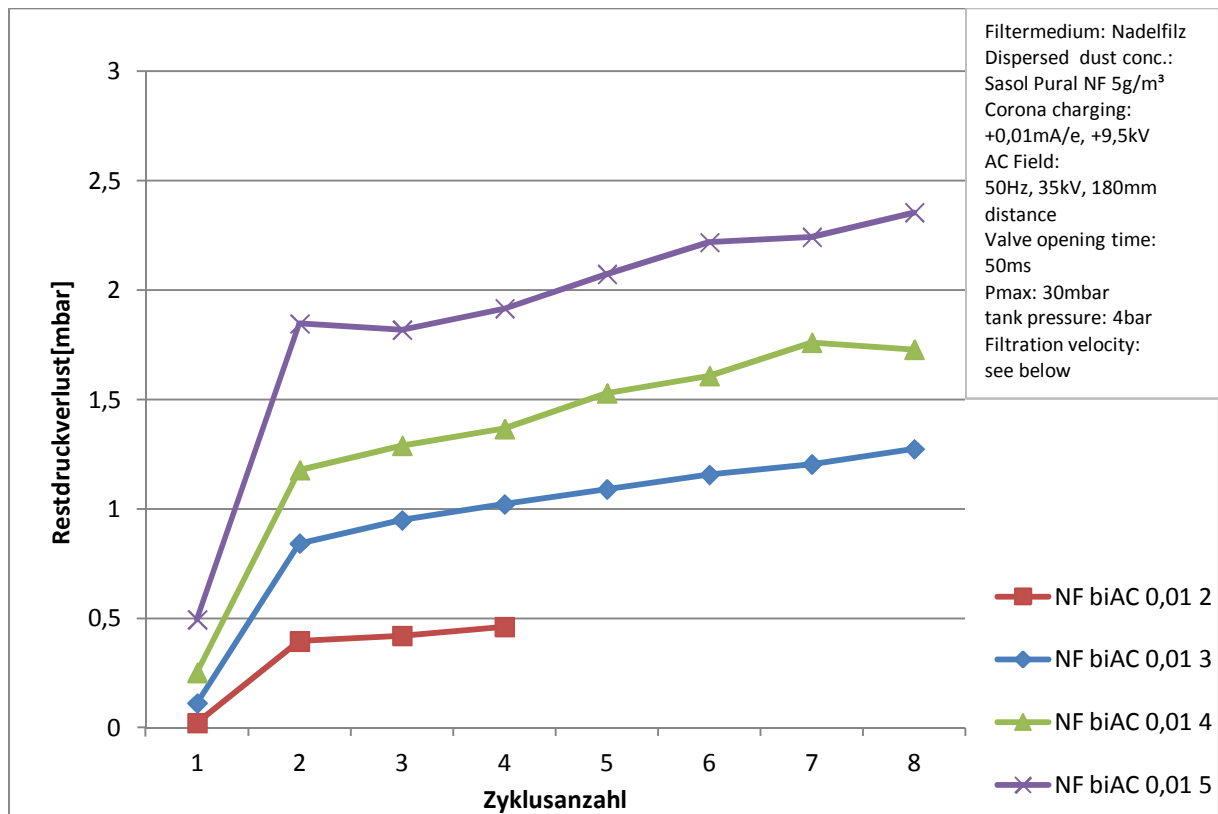


Diagramm 24: Restdruckverlust von Nadelfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld

7.4.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten

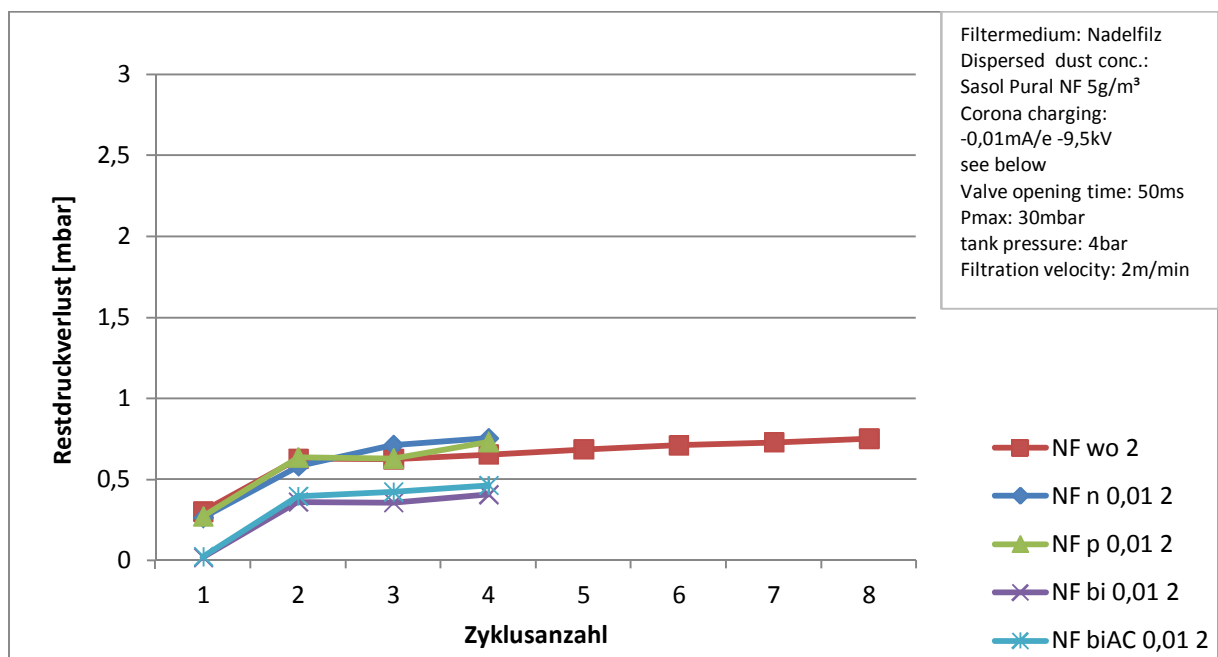


Diagramm 25: Restdruckverlust von Nadelfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/s

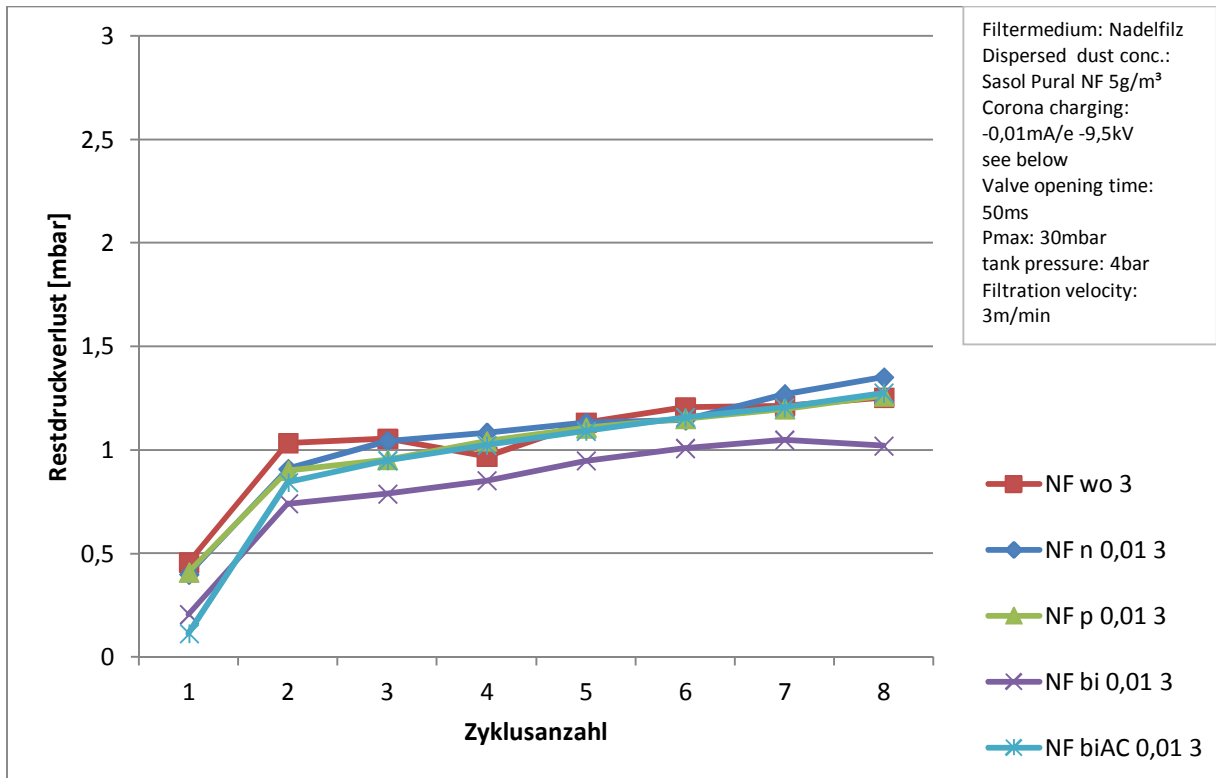


Diagramm 26: Restdruckverlust von Nadelfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/s

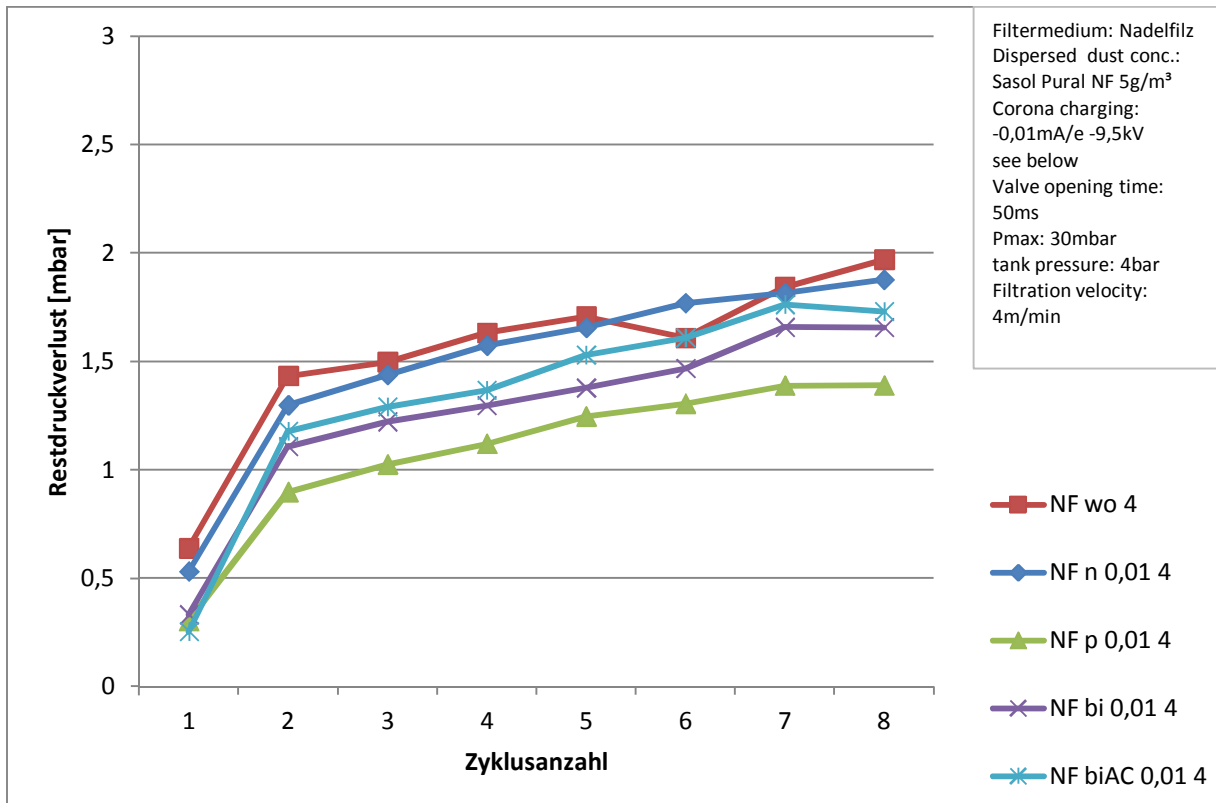


Diagramm 27: Restdruckverlust von Nadelfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/s

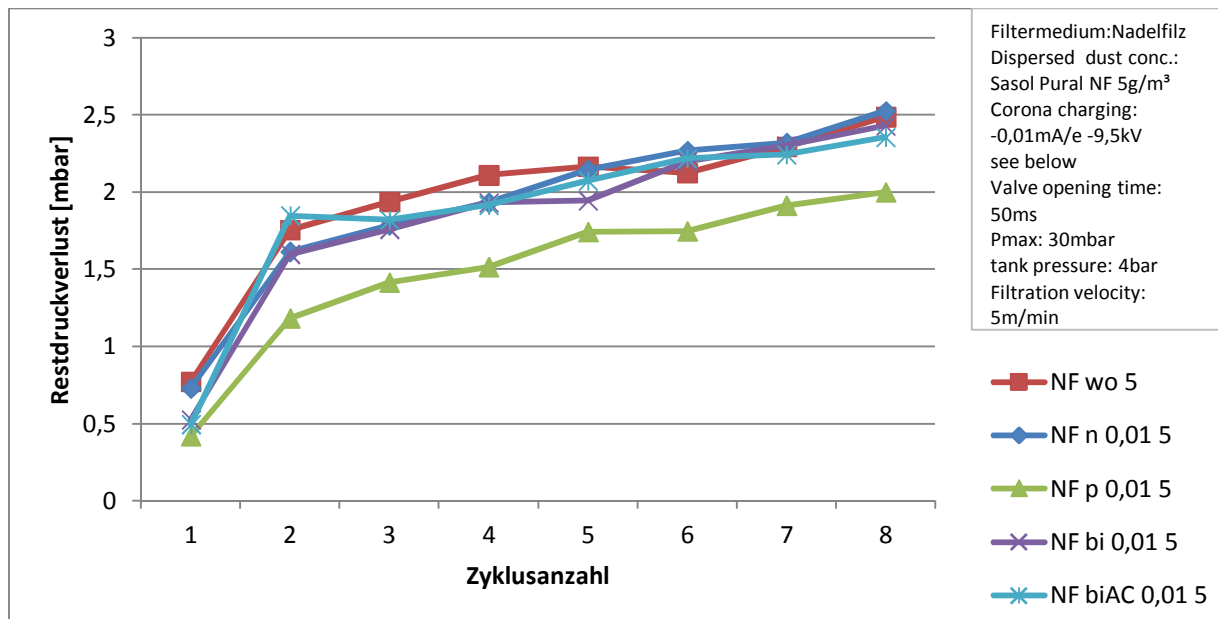


Diagramm 28: Restdruckverlust von Nadelfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/s

7.4.3 Diskussion des Restdruckverlustes bei Nadelfiltern

Auch hier lässt sich wie schon bei dem Membranfilter kein signifikanter Unterschied zwischen Nadelfiltern mit elektrischer Aufladung und solchen ohne elektrischer Aufladung feststellen. Die untere Abbildung zeigt eine Gegenüberstellung des mittleren Restdruckverlustes bei verschiedenen Geschwindigkeiten und lässt die Gleichheit des Restdruckverlustes leicht erkennen. Der Restdruckverlust bei Nadelfilz ist geringer als bei Membranfiltern.

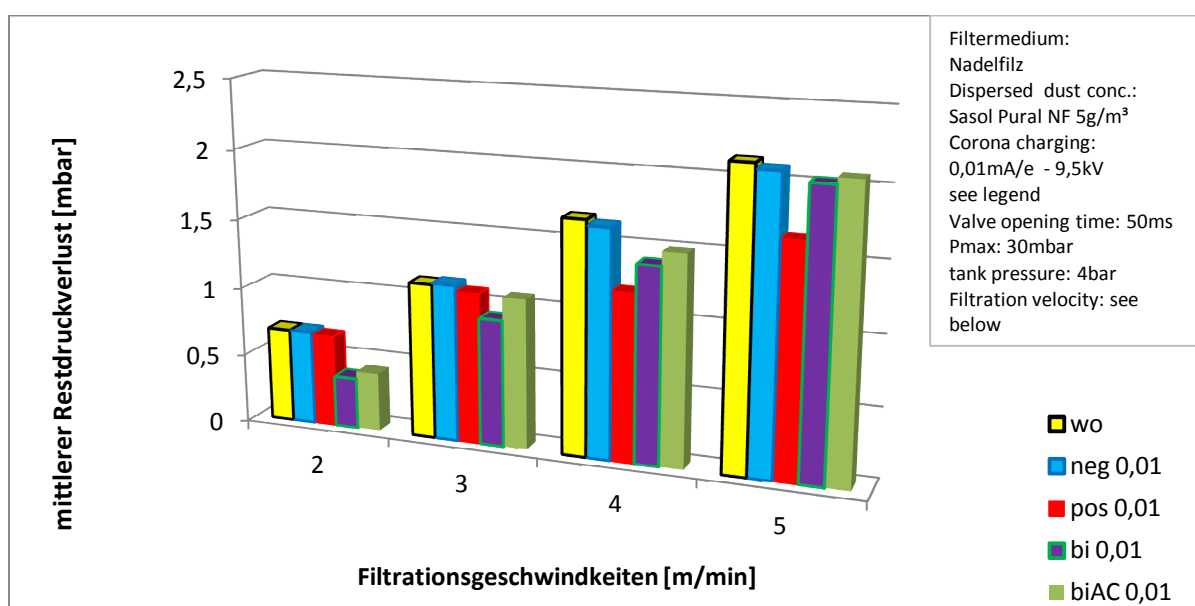


Diagramm 29: Vergleich des mittleren Restdruckverlustes bei Nadelfiltern für alle Aufladungen und alle Filtrationsgeschwindigkeiten

7.5 Vergleich der Zyklusdauer bei Nadelfilzfiltern

7.5.1 Vergleich der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten bei konstanten Aufladungsarten

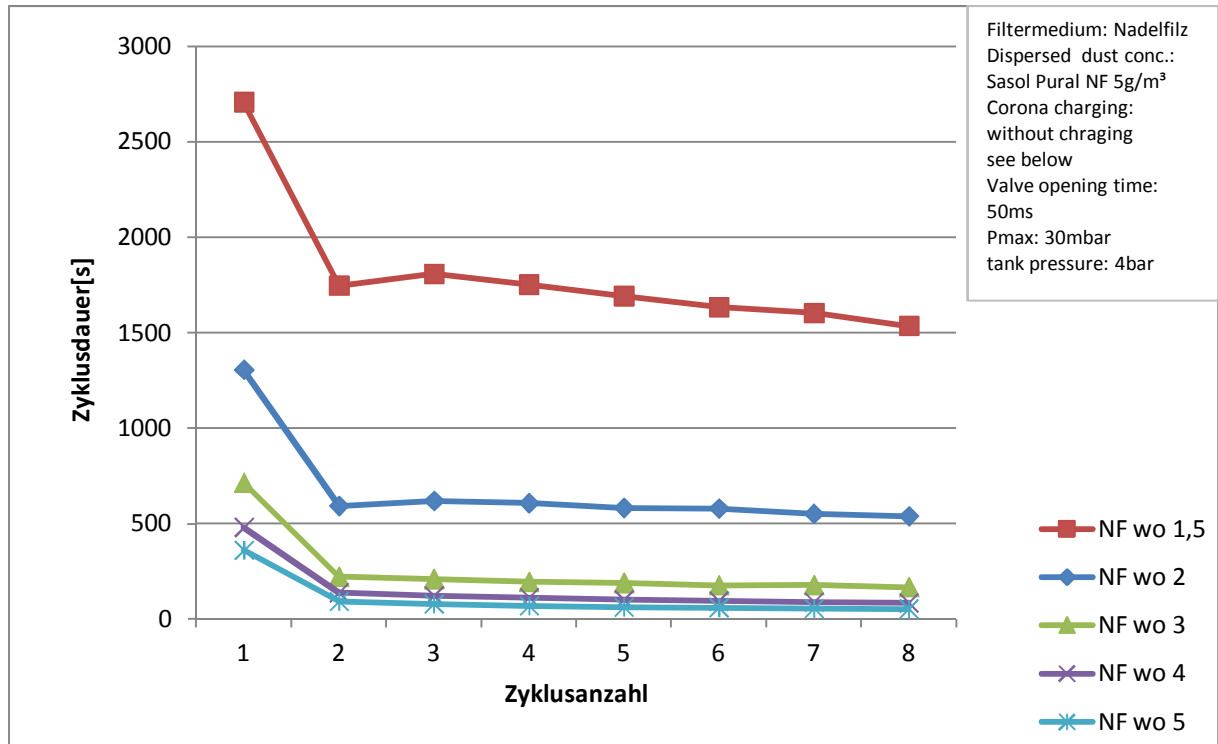


Diagramm 30: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung

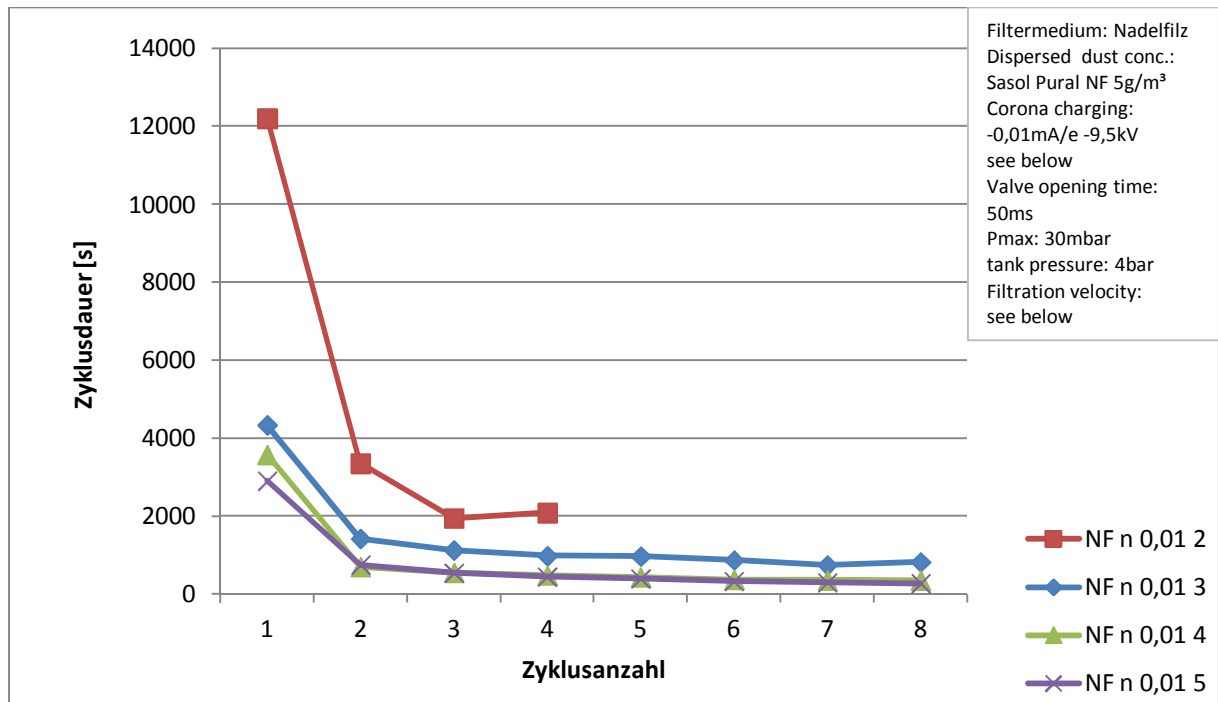


Diagramm 31: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung

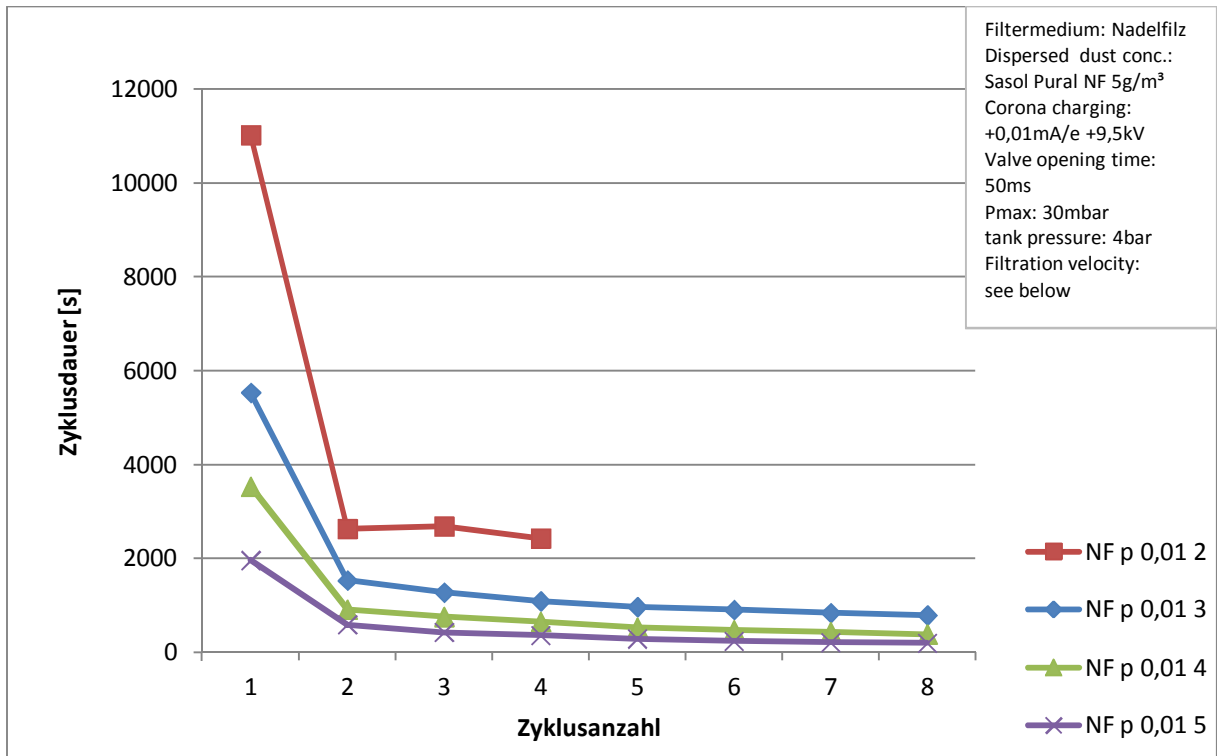


Diagramm 32: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung

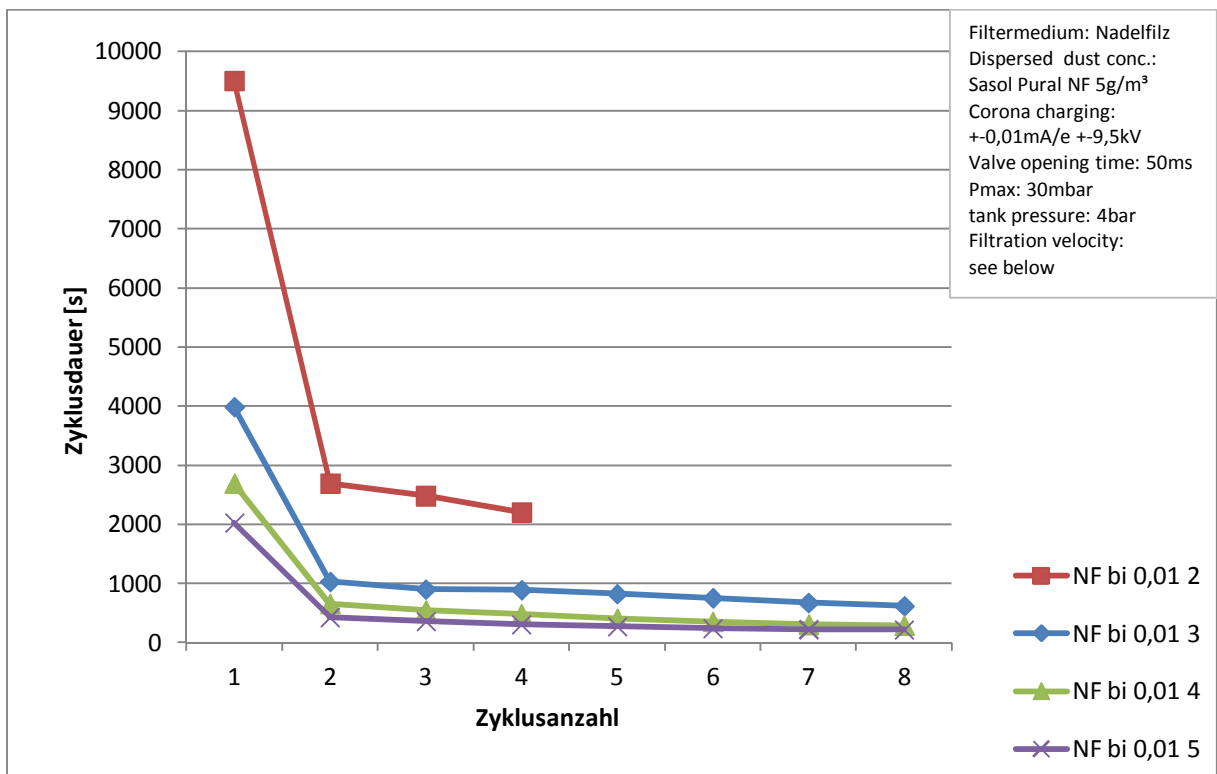


Diagramm 33: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung

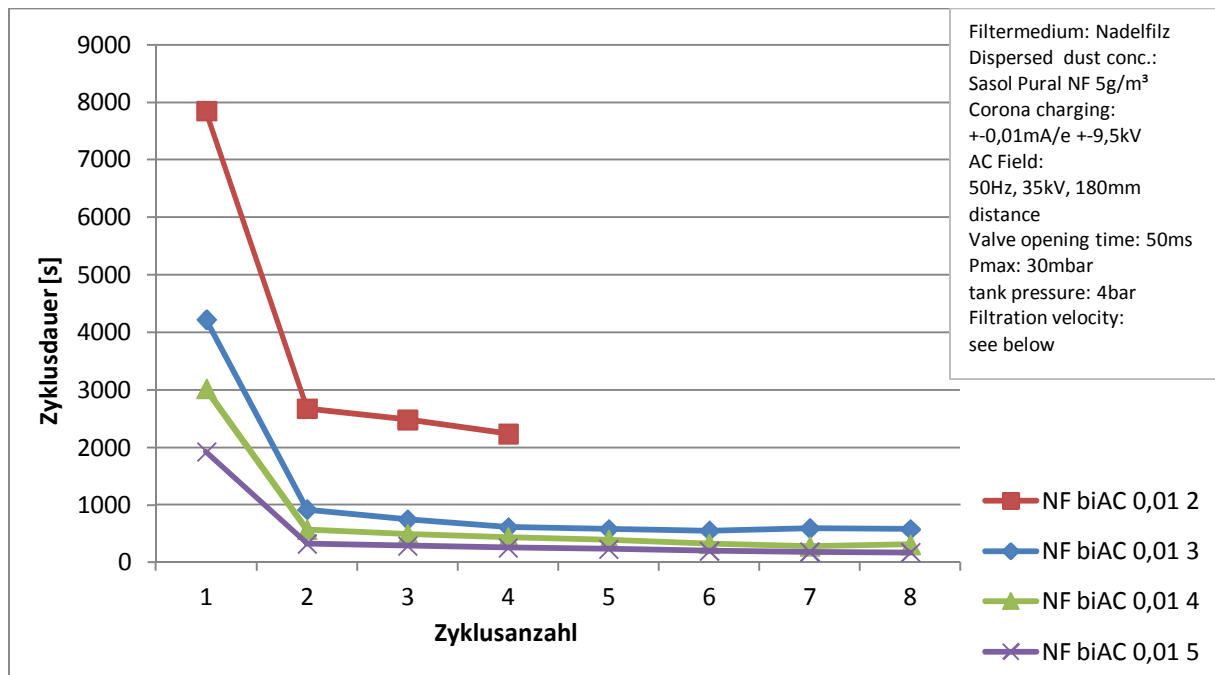


Diagramm 34: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld

7.5.2 Vergleich der verschiedenen Aufladungsarten bei konstanten Filtrationsgeschwindigkeiten

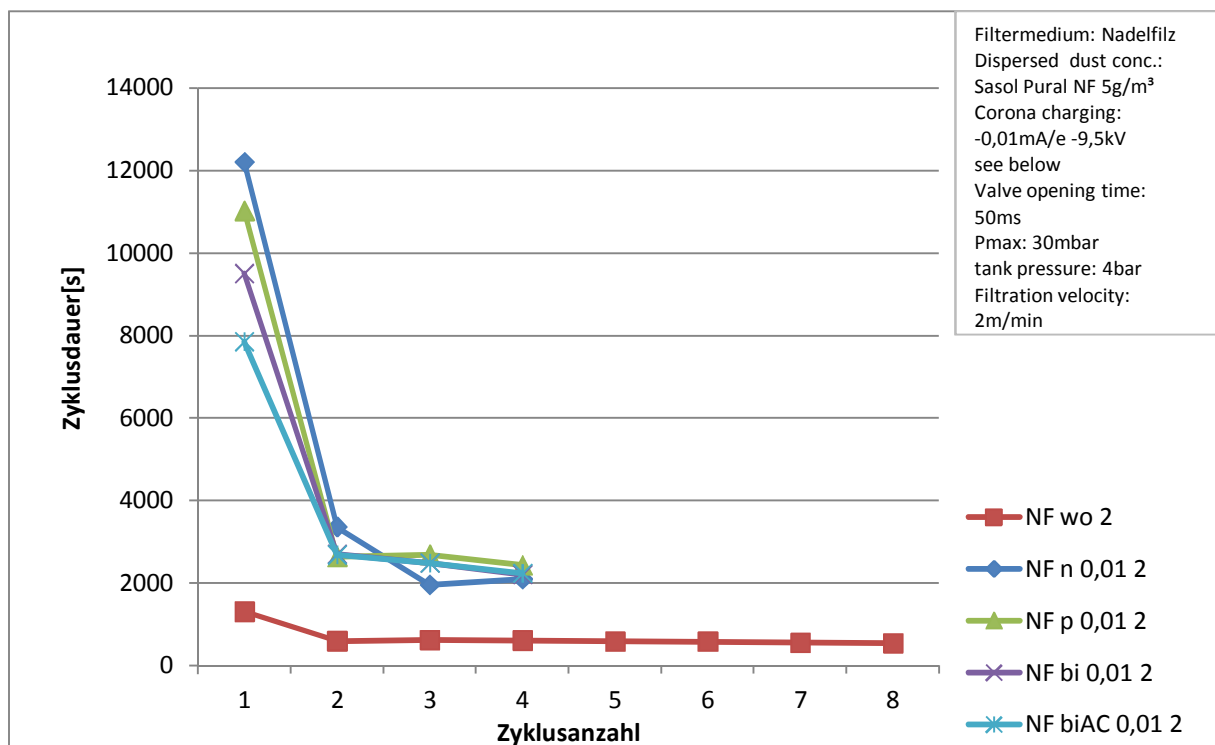


Diagramm 35: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/s

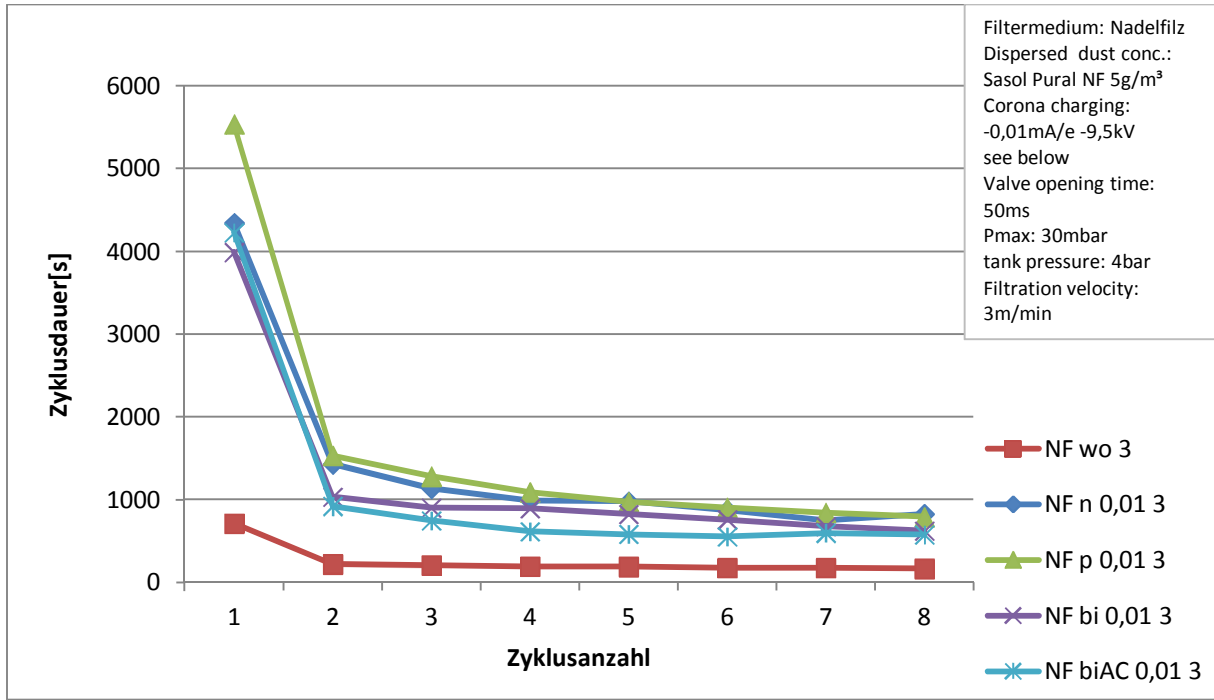


Diagramm 36: Zyklusdauer von Nadelfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/s

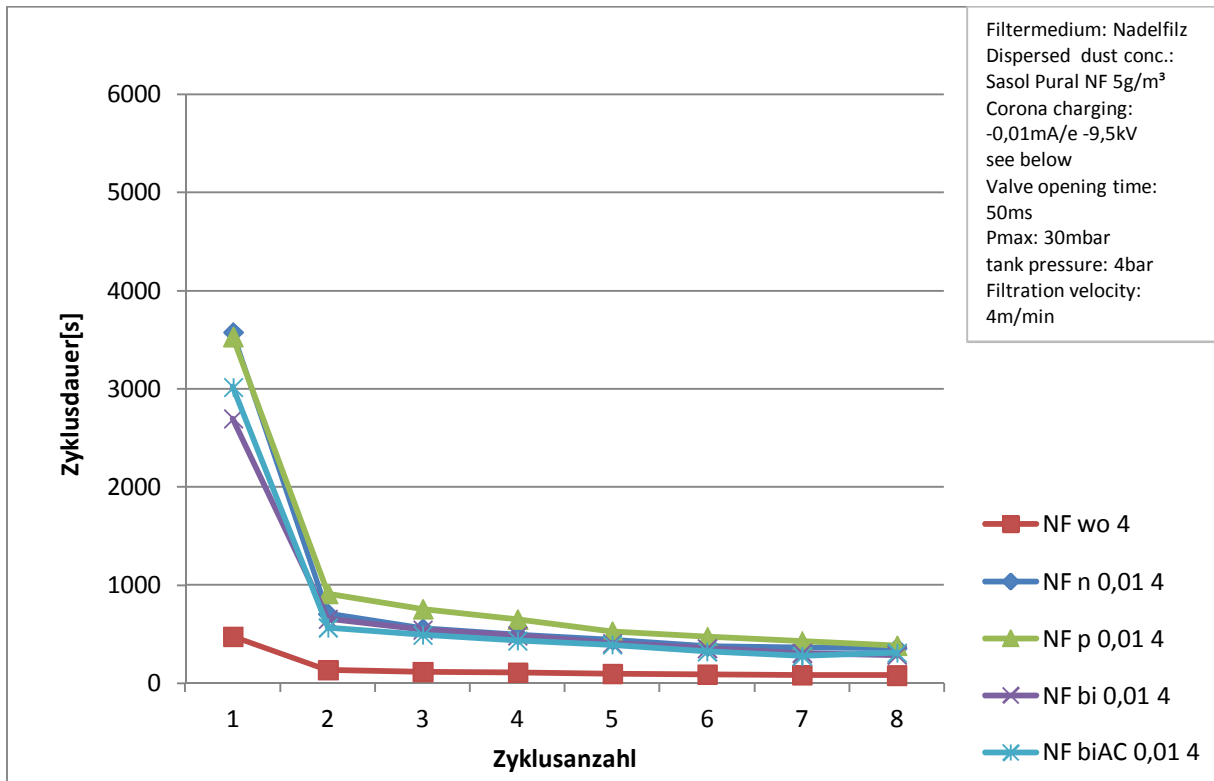


Diagramm 37: Zyklusdauer von Nadelfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/s

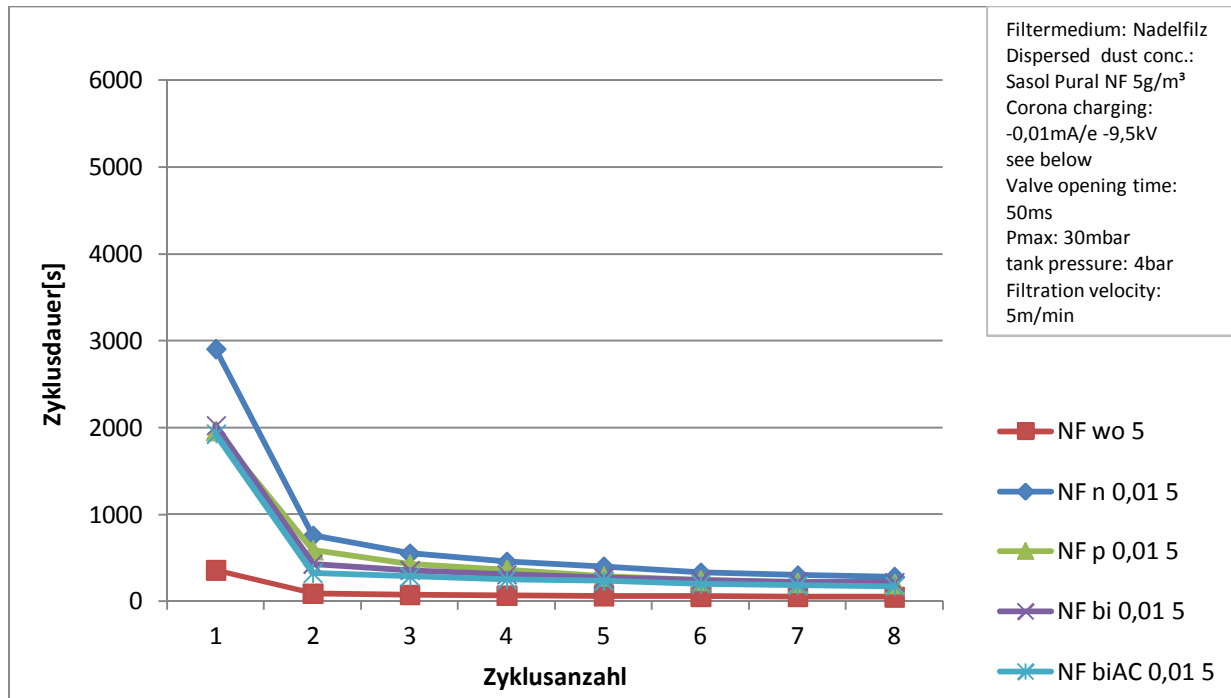


Diagramm 38: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/s

7.5.3 Diskussion der Zyklusdauer bei Nadelfilzfiltern

Die Versuche ohne elektrische Aufladung zeigen wie bei dem Membranfilter eine niedrige Zyklusdauer, während die Versuche mit elektrischer Aufladung eine signifikant längere Zyklusdauer vorweisen. Charakteristisch ist auch die lange Zykluszeit am Anfang. Da der Nadelfilz sich erst im Inneren homogenisieren muss und Partikel einlagern, erreicht er erst nach einer gewissen Arbeitszeit seine optimale Filterleistung. Auch bei den Nadelfilzfiltern ist es bei der Geschwindigkeit von 2m/min, wegen der begrenzten Staubmenge im Dispergierer, nicht möglich die maximale Zyklusdauer von acht Zyklen zu erreichen. Zwischen den verschiedenen Aufladungsarten lässt sich kein signifikanter Unterschied erkennen. Zwischen ungeladener und geladener Partikel ist ein gemittelter Faktor vier in der Zyklusdauer festzustellen. Zusammengefasst kann man sagen, dass alle Aufladungsarten eine Verbesserung in Form einer längeren Zyklusdauer bringen und sie als gleichwertig betrachtet werden können.

7.6 Partikelanzahl im Reingas

7.6.1 Partikelanzahl Nadelfilz

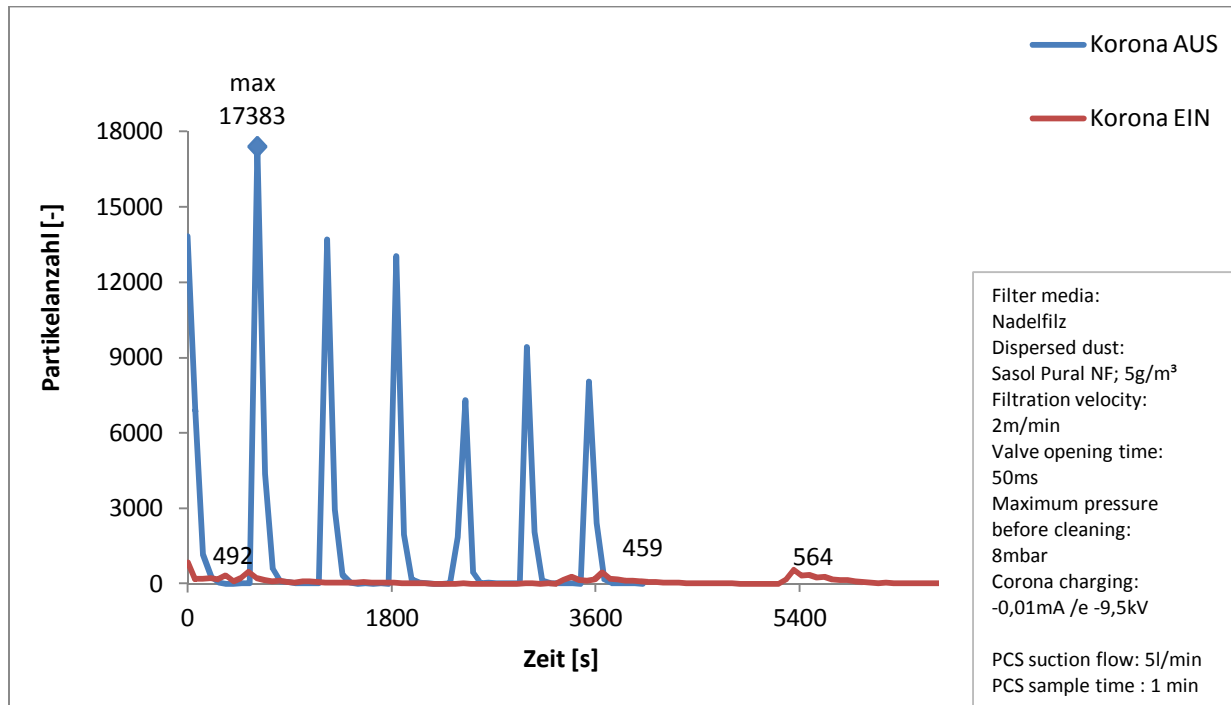


Diagramm 39: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min

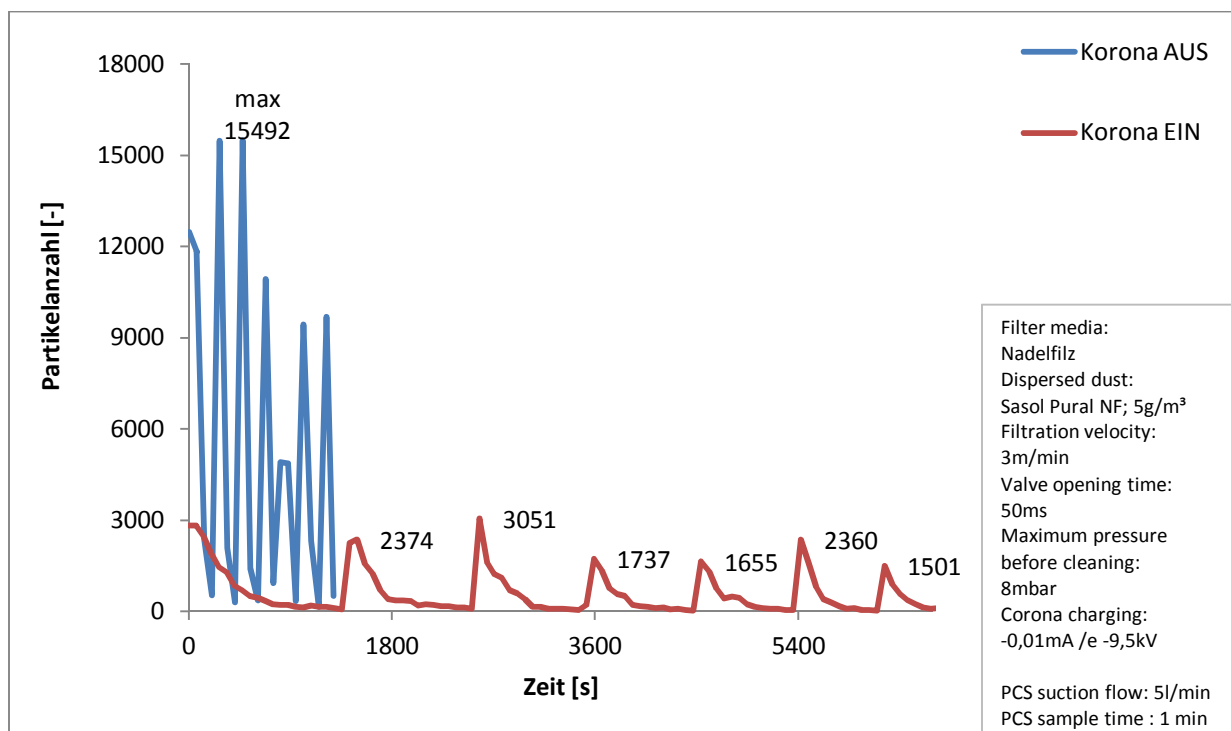


Diagramm 40: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min

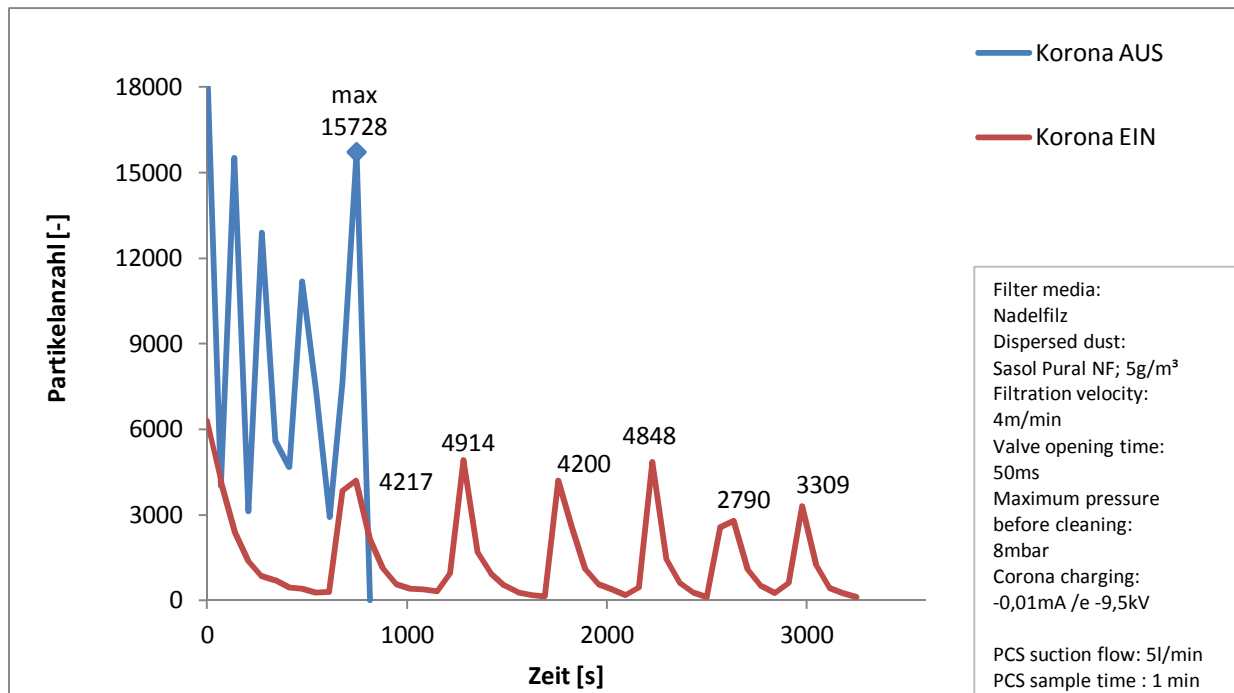


Diagramm 41: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min

7.6.1.1 Diskussion der Partikelanzahl im Nadelfilz

Bei „Korona AUS“ also ohne elektrische Aufladung, sieht man einen signifikanten Unterschied zu den Versuchen mit „Korona EIN“, also mit elektrischer Aufladung. Der Unterschied der Partikelanzahl beträgt, bei 2m/min den gemittelten Faktor 30, bei 3m/min den gemittelten Faktor 5 und bei 5m/min noch immer einen gemittelten Faktor von 3 der jeweiligen Maxima. Der Grund dafür ist, dass die elektrisch aufgeladenen Partikel sich besser an die einzelnen Fasern haften und somit zu einem besseren Filtrationsverhalten neigen. Die einzelnen Peaks entstehen durch die online Druckluftabreinigung. Im Moment der Abreinigung lösen sich Partikel aus dem Filter und treten in das Reingas über. Dadurch kommt es auch zu Schwankungen in der Anzahl der Partikel im laufenden Versuch. Allgemein kann man sagen, dass die Anzahl der Partikel aber abnimmt, da sich der Filter im Laufe der Zeit immer mehr im Inneren verschließt. Bei 2m/min sind auf Grund der begrenzten Staubmenge im Dispergierer nur drei Peaks im Diagramm eingezeichnet. Bei den Versuchen ohne Aufladung, wurde um den Unterschied sichtbar zu machen, nur das Maximum beschriftet.

7.6.2 Partikelanzahl Membran

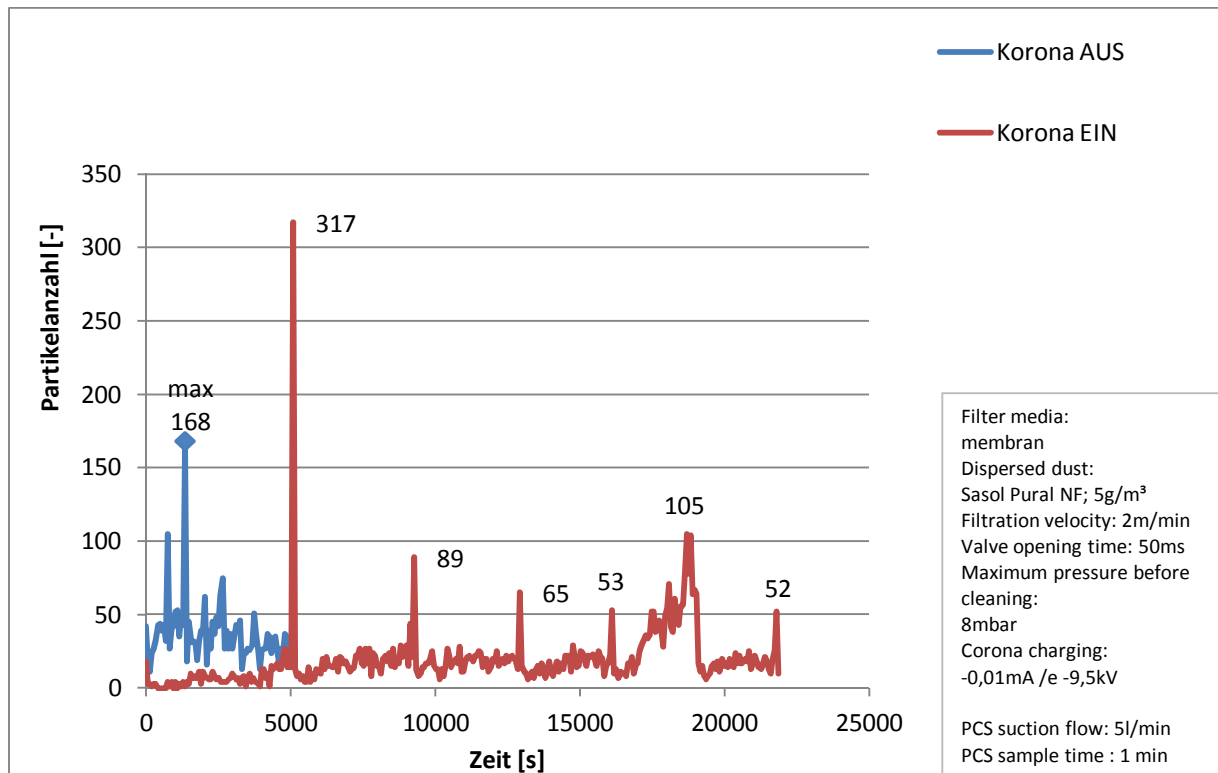


Diagramm 42: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min

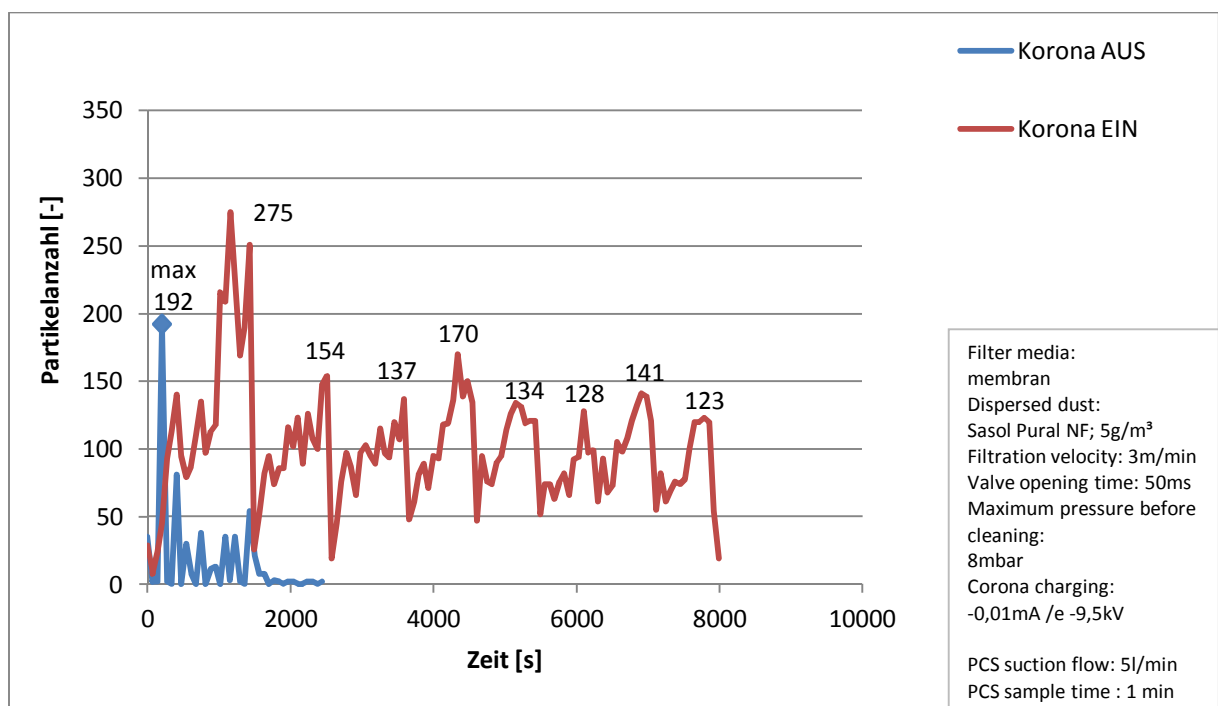


Diagramm 43: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min

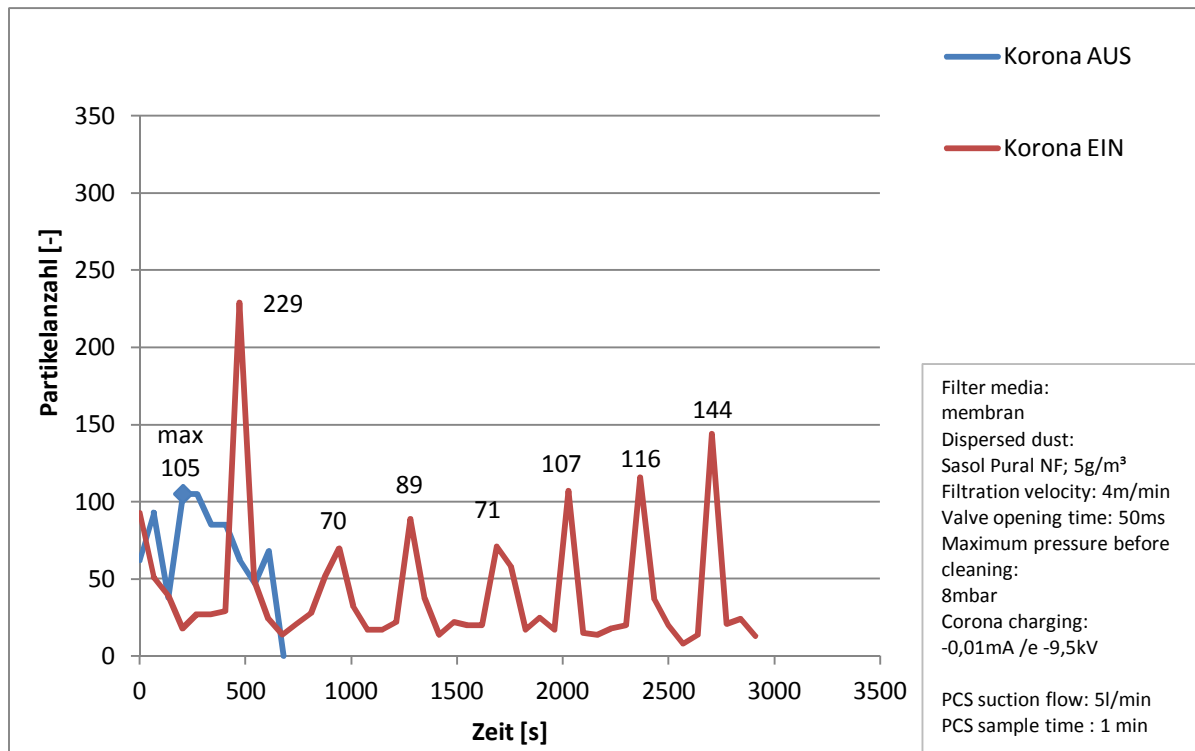


Diagramm 44: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min

7.6.2.1 Diskussion der Partikelanzahl in Membranfilter

Auf Grund der geringen Partikelanzahl bei Membranfilter im Reingas ist es messtechnisch nicht mehr möglich alle Daten zu sammeln. Vor allem bei „Korona AUS“ sind die Versuche innerhalb kürzester Zeit abgeschlossen. Da das PCS nur im Minutenintervall die Partikel misst, ergeben sich zwischen den einzelnen Zyklen der Versuche zehn Messungen bei 2m/min, vier Messungen bei 3m/min und nur eine Messung bei 4m/min. Deswegen wird der Versuch mit 5m/min ausgelassen. Es ist anzunehmen, dass die Partikelanzahl ohne Aufladung höher ist als die mit Aufladung. Der direkte Vergleich zwischen Membran und Nadelfilz zeigt, dass der Membranfilter deutlich besser arbeitet als der Nadelfilz.

8. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit waren Untersuchungen an einer elektrisch unterstützten Filtrationsanlage, um diese anhand des Restdruckverlustes, der Zyklusdauer und der Reingaskonzentration zu analysieren und direkt mit einer Filtrationsanlage ohne elektrischer Aufladung zu vergleichen. Umgesetzt wurde dies durch empirische Untersuchungen an einer modifizierten Versuchsfiltrationsanlage bestehend aus einem Staubdispersierer, einer elektrischen Einheit und einem Filtermittelprüfstand. Um ausreichend Daten zu erhalten wurde eine Variation der Filtrationsgeschwindigkeiten, der Aufladungsarten sowie der Filtermedien vorgenommen. Die Wahl der verschiedenen Filtrationsgeschwindigkeiten, wurde anhand der in der Industrie üblichen Geschwindigkeiten für Abreinigungsfilter getroffen und an die Versuchsanlage angepasst. Daraus ergaben sich Geschwindigkeiten von zwei, drei, vier und fünf Metern pro Minute. Die verschiedenen Aufladungsarten wurden mit unipolar negativ, unipolar positiv, bipolarer Aufladung und bipolarer Aufladung mit Wechselfeld durchgeführt. Es wurden auch alle Versuche ohne Aufladung also ohne elektrischer Unterstützung durchgeführt um einen direkten Vergleich zwischen einer unterstützten und einer nicht unterstützten Filtrationsanlage zu bekommen.

Die Versuche ergaben hinsichtlich der Zyklusdauer einen signifikanten Unterschied zwischen denen mit elektrischer Aufladung und denen ohne elektrische Aufladung. Dabei war die Zyklusdauer bei den Versuchen mit elektrischer Aufladung bei Nadelfilz um das ca. vierfache länger als ohne Aufladung und bei Membran um ca. das Zehnfache länger. Die elektrische Aufladung der Partikel bewirkte, dass bis zu neunzig Prozent der Partikel von der elektrischen Einheit abgeschieden wurden. Dadurch wurde die Staubkonzentration am Abreinigungsfilter geringer und dies führte zu längeren Zykluszeiten. Der Restdruckverlust hingegen zeigte keine signifikante Beeinflussung durch die elektrische Aufladung. Es wurde aber ein Unterschied zwischen Membran und Nadelfilz festgestellt. Dabei war der Restdruckverlust am Membranfilter, um das Zweifache höher als beim Nadelfilz. Die Partikelanzahl im Reingas wurde durch die elektrische Aufladung signifikant reduziert. Beim Nadelfilz war die Partikelanzahl, abhängig von der Filtrationsgeschwindigkeit, zwischen dem Drei- bis Dreißigfachen niedriger. Beim Membranfilter war der Unterschied zwischen Aufladung und ohne Aufladung nicht so signifikant, wobei aber nahezu keine Partikel mehr ins Reingas gelangten (weniger als 100 Partikel pro Minute).

Zusammengefasst kann man sagen, dass mittels elektrischer Unterstützung eine Verbesserung hinsichtlich Zyklusdauer und Reingaskonzentration erzielt werden kann, wobei alle Aufladungsarten gleichwertig waren. Da die bipolare Aufladung und die bipolare Aufladung mit Wechselfeld auf Grund ihrer Anschaffungskosten nicht zu empfehlen sind und sich in der Industrie schon die unipolare negative Aufladung durchgesetzt hat, ist diese auch der unipolar positiven Aufladung vorzuziehen.

Literaturverzeichnis

- [1]. **Felix, Lebl.** *Elektrisch unterstützte Abreinigungsfilter.* Wien : s.n., 2013.
- [2]. **Schneider Jürgen, Spangl Wolfgang, Placer Kerstin, Moosmann Lorenz.** *Abschätzung der Gesundheitsauswirkungen von Schwebstaub in Österreich.* WIEN : Umweltbundesamt, 2005. ISBN: 3-85457-819-9.
- [3]. **Anderl, Gangl, Jobstmann.** EMISSIONSTRENDS 1990 - 2010. Wien : Umweltbundesamt Reports, 2012. ISBN:978-3-99004-196-3.
- [4]. **Heinz, Brauer.** *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik.* Berlin : Springer, 1996. Bde. 3 - Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen. ISBN: 3-540-58060-3.
- [5]. **J., White Harry.** *Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern.* Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969.
- [6]. **Scheuch.** <http://www.scheuch.com/>. *Trockenelektrofilter.* [Online] [Zitat vom: 01. 06 2013.]
http://www.scheuch.com/assets/folder/2.1.3.%20Rauchgasentstaubung/Elektrofilter_deutsch.pdf.
- [7]. **Schmidt, Eberhard.** *Elektrische Beeinflussung der Partikelabscheidung in Oberflächenfiltern.* Deutschland : Universität Karlsruhe (TH),, 1991. Dissertation.
- [8]. **Löffler, Friedrich.** *Staubabscheiden.* s.l. : Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1988. ISBN 3-13-712201-5.
- [9]. **Friedrich, Löffler.** *Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern.* Braunschweig : Springer, 1984. ISBN:3-540-670-629.
- [10]. **Riehle, Claus Dr.Ing.** *Bewegungen und Abscheidungen von Partikeln im Elektrofilter.* Karlsruhe : s.n., 1992.
- [11]. **Dieter, Klumpp.** *Staubaufladung und - Abscheidung in Wechselfeldern und der Rücksprüh - Mechanismus in Elektrofiltern.* Universität Karlsruhe : s.n., 1978.
- [12]. **Wilhelm, Batel.** *Entstaubungstechnik.* Braunschweig : Springer, 1972. ISBN: 3-540-05649-1.
- [13]. **Kurtovic, Sejla.** *Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur elektrostatisch unterstützten Staubabfiltration.* Technische Universität Wien : s.n., 2012.
- [14]. **Schmidt, Eberhard.** *Verfahren zur Konditionierung von Rohgasen – Teil 1: Konditionierung durch elektrische Maßnahmen.* s.l. : Chemie Ingenieur Technik, 2001.

- [15]. **Hautanen, Jukka, et al.** *Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field*. Published online: 26 May 2010, Bd. Volume 22.
- [16]. **ELEX.** Elex.ch. [Online] Elex. [Zitat vom: 01. 07 2013.]
<http://www.elex.ch/produkte/hybrid-filter.html>.
- [17]. **Miller, R. L.** *Enhancing Aging ESP Performance Utilizing COHPAC Hybrid Fabric Filter Technologies*. Hamon Research-Cottrell Somerville : NJ Hamon Research-Cottrell New Products Parts and Customer Service 58, 2003.
- [18]. **Richtlinien, VDI.** Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter VDI 3926. 1994.
- [19]. **Palas, Particle Technology.** *Serie RBG Pulverdispergierer für sehr geringe und mittlere Massenströme*. Particle Technology Palas. [Online] [Zitat vom: 10. 07 2013.]
<http://www.palas.de/file/np976/application/pdf/Produktdatenblatt+RBG-Serie+V0030312.pdf.pdf>.
- [20]. **Whatman.** *Glass Microfiber Binder Free*. [Online] [Zitat vom: 13. 07 2013.]
<http://www.whatman.com/products.aspx?PID=13>.
- [21]. **Palas.** *Welas digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem*. [Online] [Zitat vom: 13. 07 2013.] http://www.palas.de/file/j0582/application/octet-stream/Produktdatenblatt+welas+digital+2000_3000+V0020811.
- [22]. **Wilhelm, Höflinger.** *Mechanische Verfahrenstechnik I*. Wien : s.n., 1995.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Mengenverteilung von TSP, PM 10 und PM 2,5 [3]	5
Abbildung 2: Anteile der Verursachersektionen in Österreich [3]	6
Abbildung 3: Das Prinzip der negativen unipolaren elektrostatischen Abscheidung [6]	9
Abbildung 4: Wirkweise an den Plattenelektroden [6]	9
Abbildung 5: Strom – Spannung – Charakteristiken der negativen Korona in Stickstoff-Sauerstoff – Gemischen und in Luft/Wasser-Gemische bei 200°C und Atmosphärendruck [8]	11
Abbildung 6: Schematische Darstellung der vier Mechanismen die zu einem Kontakt zwischen Partikel und Kollektor führen. [4]	13
Abbildung 7: Drei wesentliche Mechanismen bei der Regenerierung flexibler Filtermedien. S_r und S_f markieren die Positionen bei Regeneration und Filtration links, Schnitt durch einen Filterschlauch samt Stützkorb während der Abreinigung rechts [4]	15
Abbildung 8: Schematischer Verlauf der Partikelkonzentrationen im Reingas bei online Regeneration und Oberflächenfilter [4]	16
Abbildung 9: Schematischer Verlauf des Druckverlustes eines online regenerierten Oberflächenfilters bei konstanter Anströmgeschwindigkeit [4]	17
Abbildung 10: Schema zur Erhöhung von geladenen und ungeladenen Partikel durch ein elektrisches Wechselfeld [13]	20
Abbildung 11: Vergleich zwischen Coulomb -, Polarisation- und Schwerkraft [13]	21
Abbildung 12: Schema eines Hybridfilters in Kompaktbauweise der Firma Elex [16]	23
Abbildung 13: Schema eines Hybridfilters in getrennter Bauweise (links) und in gemeinsamer Bauweise (rechts) [17]	23
Abbildung 14: Gesamte Anlage mit Schutzkäfig, Arbeitsplatz und Steuergeräte	25
Abbildung 15: Seitenansicht von rechts und links	25
Abbildung 16: Fließschema der Anlage [1]	26
Abbildung 17: Versuchsanlage mit Schutzkäfig [12]	27
Abbildung 18: Volumenverteilung der Partikelgröße von Pural NF [1]	29
Abbildung 19: Anzahlverteilung der Partikelgröße von Pural NF [1]	29
Abbildung 21: Schema von Dispergierer [19]	30
Abbildung 22: Geöffneter Dosierer mit Blick auf die Bürste nach Druckluftausfall	30
	81

<i>Abbildung 23: 3D-Modell der elektrischen Einheit und Bereichseinteilung [1]</i>	31
<i>Abbildung 24: Bild der verwendeten elektrischen Anlage ohne Schutzkäfig mit Hochspannungskabeln im Vordergrund</i>	31
<i>Abbildung 25: Schema der elektrischen Einheit mit Elektrodenanschlüsse [1]</i>	32
<i>Abbildung 26: Aluminiumabdichtung mit Langlöcher im Elektrodenbereich, Sammelbehälter an Unterseite im gereinigten Zustand (links) und im ungereinigten Zustand (rechts)</i>	33
<i>Abbildung 27: Schematische Darstellung der Einspannung der Sprühelektroden [1]</i>	33
<i>Abbildung 28: Verwendeter Filtermittelprüfstand</i>	34
<i>Abbildung 29: Original Palas MMTC 2000 Filterteststand für abreinigbare Filtermedien gemäß VDI 3926 [19]</i>	35
<i>Abbildung 30: Membranfilter unter dem Mikroskop leicht bestäubt (links), stark bestäubt (Mitte), und bestäubter Filter mit Loch in der Membran (rechts)</i>	36
<i>Abbildung 31: Vergleich zweier Absolutfilter. Durch Rauchgas in der angesaugten Umluft verschmutzter Absolutfilter (links). Mit normaler Umgebungsluft betriebener Absolutfilter (rechts)</i>	36
<i>Abbildung 32: Hochspannungsnetzgeräte DC+ und DC-</i>	37
<i>Abbildung 33: AC Hochspannungstransformatoren und deren Verstärker</i>	38
<i>Abbildung 34: AC Steuereinheit [1]</i>	39
<i>Abbildung 35: Welas[®] digital 2000/3000 Streulichtspektrometersystem [21]</i>	40
<i>Abbildung 36: Sartorius BP 211D inkl. LCD Display</i>	42
<i>Abbildung 37: Sartorius GP 4102 inkl. LCD Display</i>	42
<i>Abbildung 38: Greisinger GTD1100</i>	43
<i>Abbildung 39: Greisinger GFTH 95</i>	43
<i>Abbildung 40: Screenshot FLOWSHEET der Steuersoftware Palas MMTC</i>	44
<i>Abbildung 41: Screenshot TESTPROC.STATUS der Steuersoftware Palas MMTC</i>	45
<i>Abbildung 42: Typisches Druckverlaufschema bei 8 Zyklen und einer Geschwindigkeit von 3m/min mit Nadelfilz als Filtermedium</i>	50
<i>Abbildung 43: Schema der Druckverluste am Filtermedium [1]</i>	51
<i>Abbildung 44: Schema einer Partikelanzahlmessung während eines Versuches</i>	52

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Übersicht der Versuche</i>	24
<i>Tabelle 2: Dauer der gravimetrischen Messungen auf Grund der verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten</i>	46
<i>Tabelle 3: Versuchsaufstellung und zugehörige Parameter</i>	53

Diagrammverzeichnis

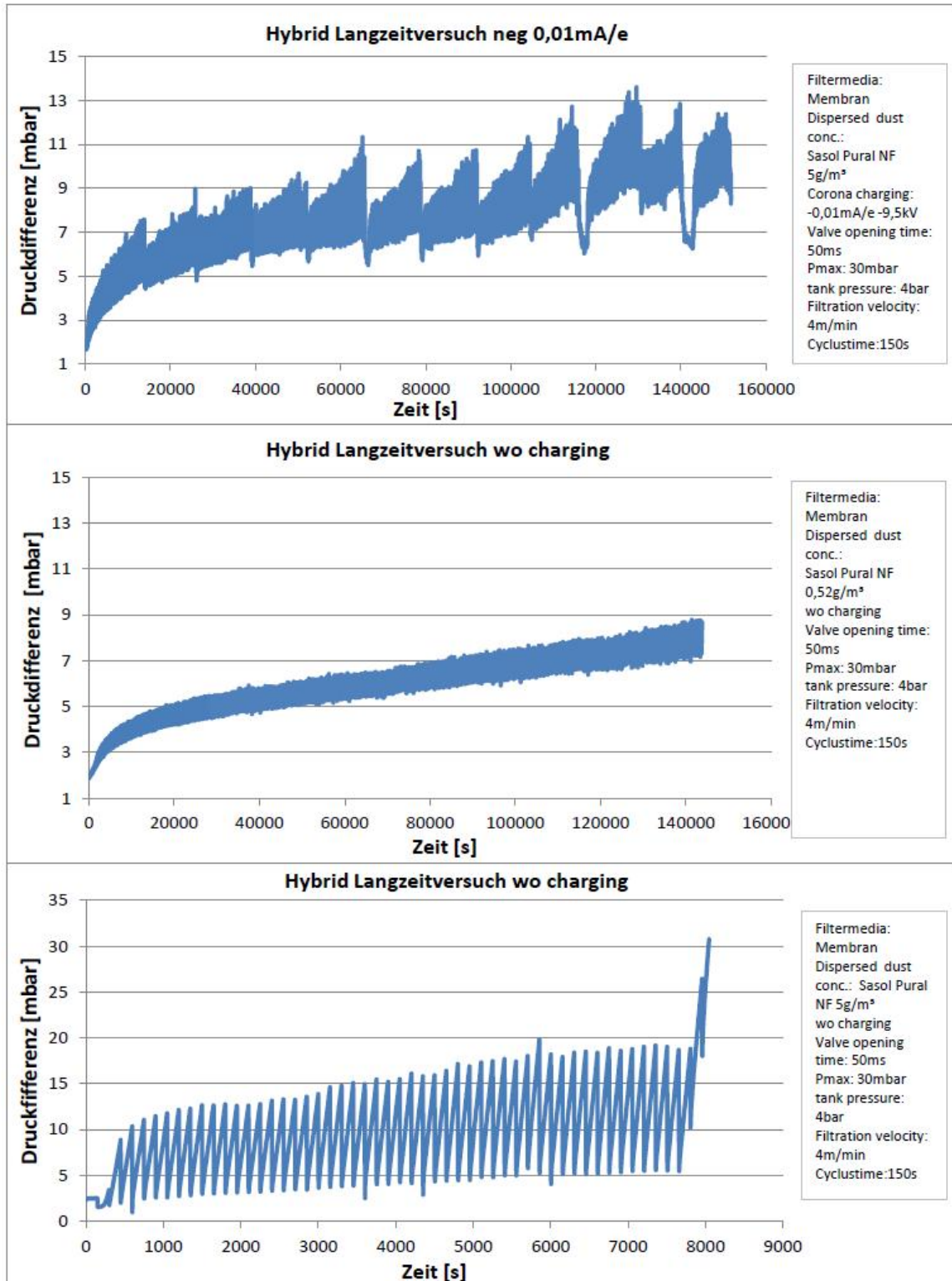
<i>Diagramm 1: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min</i>	54
<i>Diagramm 2: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min</i>	54
<i>Diagramm 3: Zyklusdauer von Membranfilter mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min</i>	55
<i>Diagramm 4: Zyklusdauer bei Membranfilter mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/min</i>	55
<i>Diagramm 5: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung</i>	56
<i>Diagramm 6: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung</i>	56
<i>Diagramm 7: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung</i>	57
<i>Diagramm 8: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung</i>	57
<i>Diagramm 9: Zyklusdauer von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld</i>	58
<i>Diagramm 10: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung</i>	59
<i>Diagramm 11: Restdruckverlust von Membranfilter mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung</i>	59
<i>Diagramm 12: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung</i>	60

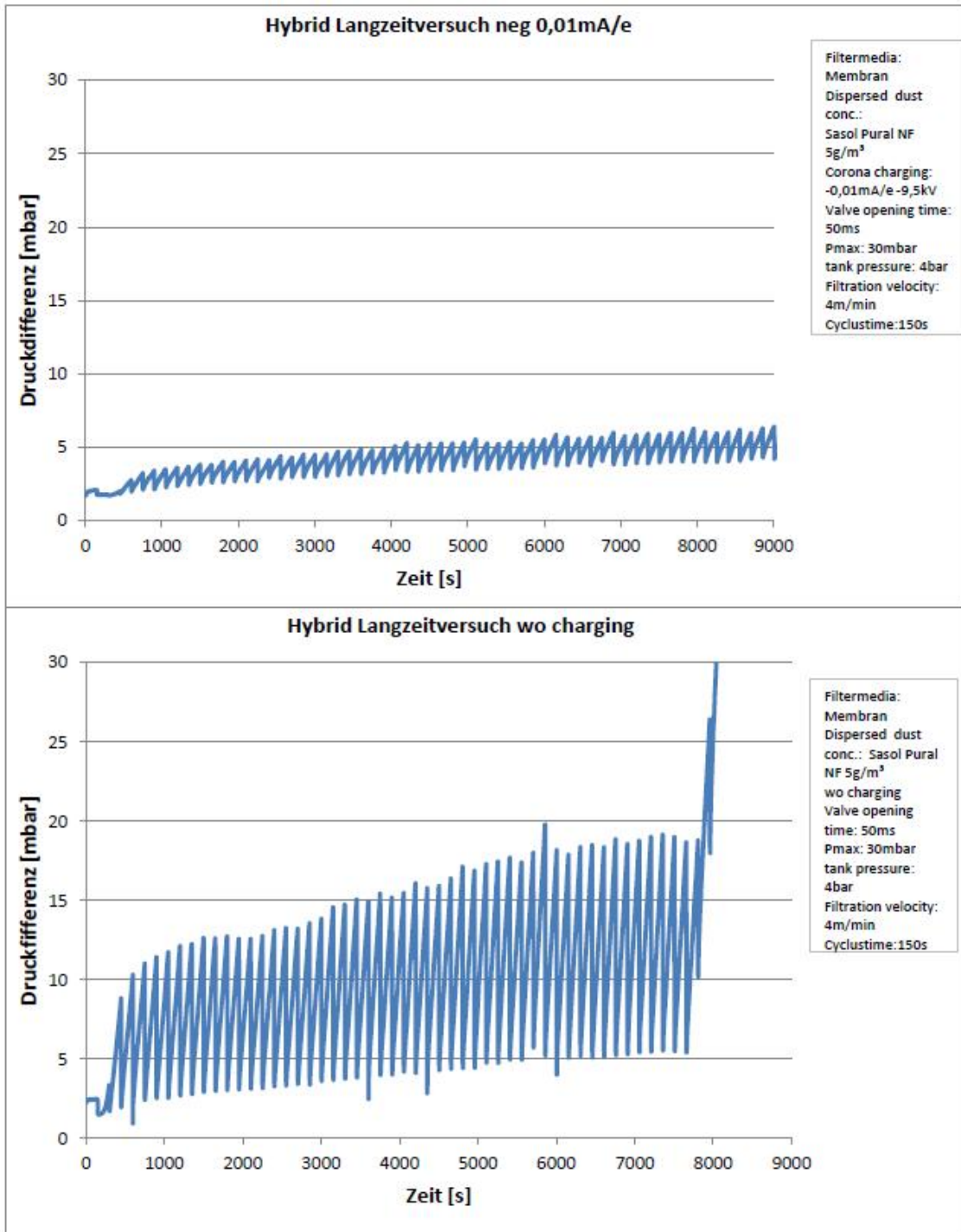
<i>Diagramm 13: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung</i>	60
<i>Diagramm 14: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld</i>	61
<i>Diagramm 15: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min</i>	61
<i>Diagramm 16: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min</i>	62
<i>Diagramm 17: Restdruckverlust von Membranfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min</i>	62
<i>Diagramm 18: Restdruckverlust von Membranfilter mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/min</i>	63
<i>Diagramm 19: Vergleich des mittleren Restdruckverlustes bei Membranfiltern für alle Aufladungsarten und alle Filtrationsgeschwindigkeiten</i>	63
<i>Diagramm 20: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung</i>	64
<i>Diagramm 21: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung</i>	64
<i>Diagramm 22: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung</i>	65
<i>Diagramm 23: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung</i>	65
<i>Diagramm 24: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld</i>	66
<i>Diagramm 25: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/s</i>	66
<i>Diagramm 26: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/s</i>	67
<i>Diagramm 27: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/s</i>	67
<i>Diagramm 28: Restdruckverlust von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungsarten bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/s</i>	68
<i>Diagramm 29: Vergleich des mittleren Restdruckverlustes bei Nadelfilzfiltern für alle Aufladungen und alle Filtrationsgeschwindigkeiten</i>	68
<i>Diagramm 30: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten ohne Aufladung</i>	69
	84

<i>Diagramm 31: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar negativer Aufladung</i>	69
<i>Diagramm 32: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei unipolar positiver Aufladung</i>	70
<i>Diagramm 33: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung</i>	70
<i>Diagramm 34: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Filtrationsgeschwindigkeiten bei bipolarer Aufladung mit Wechselfeld</i>	71
<i>Diagramm 35: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/s</i>	71
<i>Diagramm 36: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/s</i>	72
<i>Diagramm 37: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/s</i>	72
<i>Diagramm 38: Zyklusdauer von Nadelfilzfiltern mit allen Aufladungen bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 5m/s</i>	73
<i>Diagramm 39: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min</i>	74
<i>Diagramm 40: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min</i>	74
<i>Diagramm 41: Vergleich der Partikelanzahl bei Nadelfilzfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min</i>	75
<i>Diagramm 42: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 2m/min</i>	76
<i>Diagramm 43: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 3m/min</i>	76
<i>Diagramm 44: Vergleich der Partikelanzahl bei Membranfiltern zwischen unipolar negativer Aufladung und ohne Aufladung bei einer Filtrationsgeschwindigkeit von 4m/min</i>	77

Anhang:

A1 Langzeitversuche des Hybridfilters





A2 Staubwiderstand

