



Institut für Elektronische Sensorsysteme

Technische Universität Graz



Masterarbeit

Partikelanzahl-Messsystem für automotive Anwendung

Daniel Laggner, BSc.

Betreuer:

Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Alexander Bergmann

September 2019

Eidesstaatliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum

Date

Unterschrift

Signature

Vorwort

Beim Verfassen dieser Arbeit konnte ich mich auf die Unterstützung zahlreicher Personen verlassen, besonders auf die meines Betreuers, Univ.-Prof. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Alexander Bergmann. Er ermöglichte es mir, meine Abschlussarbeit im Zuge dieses interessanten Projektes zu verfassen und zeigte sich bei meinen Fragestellungen stets geduldig und hilfsbereit. Ich danke auch der AVL DiTEST GmbH, die diese Arbeit finanziert hat.

Ebenso gilt mein Dank meinen Kollegen, Philipp Geistlinger-Scherf, Matthias Longin, Manuel Neuhold und vor allem Mario Schriefl, den man wohl als das geniale Mastermind hinter diesem Projekt sehen kann. Es war mir stets eine Freude, mit euch zusammen zu arbeiten und sowohl schwierigere als auch teils sehr unterhaltsame Stunden zu erleben.

Großer Dank gilt meiner Partnerin Agnes Altmanninger, für diverse Motivationsreden und dafür, dass sie mich ständig unterstützte und mich in harten Zeiten vor einem Nervenzusammenbruch bewahrte.

Ich möchte mich zu guter Letzt bei meinen Eltern Veronika Laggner und Klaus Tengg für die Unterstützung während meines gesamten (etwas verlängerten) Studiums, sowohl finanzieller als auch emotionaler Natur, von ganzem Herzen bedanken. Ohne euch wäre das alles nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Historische Entwicklung der Messmethoden	8
1.1.1	Smoke Meter	8
1.1.2	Opazimeter	9
1.1.3	Streulichtverfahren	10
1.2	Motivation	11
1.3	Fragestellung	12
1.4	Umfang	12
2	Messhardware	13
2.1	Messprinzip	13
2.1.1	Diffusion Charger	14
2.1.2	Modulated Precipitator	16
2.1.3	Two-Stage Measurement	17
2.1.4	Sensorsignal	17
2.2	Pneumatikkonzepte	19
2.2.1	Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe	19
2.2.2	Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation	20
2.3	Pneumatikkomponenten	21
2.3.1	Pumpen der 1420-Serie	21
2.3.2	Pumpen der 1620-Serie	23
2.3.3	Messkette	24
2.3.4	Verdünnung	24
2.3.5	Trockner	25
2.3.6	Evaporation Tube	27
2.4	Elektrischer Aufbau	28
2.5	Module	29
2.5.1	Mainboard	29
2.5.1.1	Sensoren	30

2.5.2	Corona-Aufladeeinheit	31
2.5.2.1	Funktionsprinzip	31
2.5.2.2	Einstellbare Parameter	32
2.5.3	Elektrostatischer Abscheider	32
2.5.3.1	Funktionsprinzip	32
2.5.3.2	Einstellbare Parameter	33
2.5.4	Faraday-Cup-Elektrometerd	34
2.5.4.1	Funktionsprinzip	34
2.5.4.2	Einstellbare Parameter	35
3	Messsignalverarbeitung	36
3.1	Durchflussmessung	36
3.1.1	Durchflussmessung mittels Wirkdruckverfahren	37
3.1.2	Kalorimetrische Durchflussmessung	45
3.2	Kalibrierung des Messgerätes	50
3.2.1	Pneumatik und dazugehörige Sensorik	50
3.2.2	Berechnung der Partikelanzahl	51
3.2.3	Partikelmesssensorik und Kalibration	52
4	Testmessungen	53
4.1	Größenverteilungen	55
4.1.1	miniCAST-Aerosol	56
4.1.2	NaCl-Aerosol	57
4.2	Effizienzmessung	59
4.2.1	Versuchsaufbau	60
4.2.2	Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe	60
4.2.2.1	NaCl-Aerosol	60
4.2.2.2	miniCAST-Aerosol	61
4.2.3	Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation	62
4.2.3.1	NaCl-Aerosol	62
4.3	Linearitätsmessung	63
4.3.1	Versuchsaufbau	64
4.3.2	Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe	64
4.3.2.1	NaCl-Aerosol	64
4.3.2.2	miniCAST-Aerosol	66
4.3.3	Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation	66
4.3.3.1	NaCl-Aerosol	66
4.4	Tetracontan-Messung	69

4.4.1	Versuchsaufbau	70
4.4.2	Messergebnisse	70
4.5	Conclusio	71
5	Fazit und Ausblick	72
	Literaturverzeichnis	75

Abstract

This thesis gives an overview about a particulate number (PN) measuring device, currently developed by AVL DiTEST GmbH. This includes the sensor principle of the diffusion charger as well as the installed modules, which are crucial for the correct function of the measuring device. Concerning the hardware part, there is on the one hand the measuring hardware itself, and on the other hand a number of modules used for exhaust gas conditioning, e.g. an evaporation tube for removing volatile particles in the exhaust gas, a dryer for preventing condensation inside of the pneumatic system, membrane pumps for drawing in exhaust gas and diluting exhaust gas with filtered ambient air and a porous tube diluter for diluting the sampled exhaust gas.

As diluting the sampled exhaust gas is needed, the measurement flow and the dilution flow have to be measured by flow sensors. Measuring the volumetric flow rate via differential-pressure method and measuring mass flow rate via a calorimetric mass flow sensor are described, including experiments regarding temperature and absolute pressure dependency of the sensor principles and a consideration of measurement uncertainty.

The steps of signal processing that are needed for the calculation of a particle number concentration measurement are described, starting with a voltage signal, measured in the faraday-cup-module, up to the calibration of the measuring device with a reference measuring device.

Counting efficiency and linearity of measurement of the diffusion charger were analyzed in an aerosol laboratory, including measurements with NaCl-aerosol, soot aerosol from a Jing miniCAST soot generator^[1] and tetracontane-aerosol, generated by a tetracontane generator.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Überblick über das derzeit in Entwicklung befindliche Partikelanzahl(PN)-Messgerät der AVL DiTEST GmbH vermittelt. Dabei werden das Sensorprinzip des Diffusion Chargers und die verbauten Module beschrieben, die für die korrekte Funktion des Messgerätes benötigt werden. Dies beinhaltet sowohl die Messhardware, als auch die zur Abgaskonditionierung notwendigen Module, u.a. eine Evaporation Tube zum Entfernen von volatilen Abgasbestandteilen, einen Trockner, um Kondensation im Messgerät zu vermeiden, Membranpumpen zur Ansaugung des Abgases bzw. zur Verdünnung mit gefilterter Frischluft, und einen Porous Tube Diluter zur Verdünnung des entnommenen Abgases.

Da zur Abgaskonditionierung eine Verdünnung notwendig ist, müssen sowohl der Messfluss, als auch der Verdünnungsfluss messtechnisch erfasst werden. Die Volumenflussmessung im Wirkdruckverfahren wird ebenso wie die Massenflussmessung mittels kalorimetrischem Massenflusssensor beschrieben, inklusive Experimenten zu Temperatur- und Druckabhängigkeit der Sensorprinzipien und einer Messunsicherheitsbetrachtung.

Es wird die zur Berechnung eines Partikelanzahlkonzentrations-Messwertes nötige Messsignalverarbeitung beschrieben, ausgehend von einem im Faraday-Cup-Modul gemessenen Spannungssignal bis hin zur Kalibration des Messgerätes mit einem Referenzmessgerät.

Es wurden Effizienz- und Linearitätsmessungen mit dem Messgerät im Aerosollabor durchgeführt und analysiert. Im Zuge der Versuche wurden NaCl-Aerosol, Ruß-Aerosol aus einem Jing miniCAST [1] und Tetracontan-Aerosol aus einem Tetracontan-Generator mit dem Messgerät untersucht.

Kapitel 1

Einleitung

Die Notwendigkeit von Abgasmessungen bei Kraftfahrzeugen ist spätestens seit dem Diesel-Abgasskandal von 2015 jedem bewusst. Die messtechnische Erfassung diverser Parameter des Abgases, wie z.B. des Rußgehalts, können Aufschluss über die Gesundheit des Motors bzw. die Qualität der Verbrennung geben. Sollten also bei einem Fahrzeug z.B. die Kolbenringe verschlissen sein, so gelangt im Betrieb Motoröl in die Brennkammer und wird verbrannt, was zu schlechteren Abgaswerten und einer erhöhten Umweltbelastung führt. Um dieser Art der Umweltverschmutzung entgegenzuwirken wurden bereits in den 1960er-Jahren Methoden zur Abgasmessung entwickelt.

1.1 Historische Entwicklung der Messmethoden

1.1.1 Smoke Meter

Bereits seit den 1960er-Jahren gibt es Methoden zur Abgasmessung bei Verbrennungsmotoren, um den technischen Zustand des Motors hinsichtlich der korrekten Verbrennung zu beurteilen. Eine der ersten Vorrichtungen zur Abgasmessung war das Rauchdichtemessgerät [2]. Bei diesem Messgerät wird das Abgas des zu untersuchenden Motors bzw. Fahrzeugs in eine Messkammer eingeleitet, in der sich ein Papierstreifen befindet, welcher durch die Rußpartikel im Abgas getrübt wird. Die Trübung dieses Papierstreifens wird mit optischen Verfahren gemessen, woraus sich Rückschlüsse auf den Rußgehalt im Abgas ziehen lassen. Nach diesem Prinzip funktioniert z.B. auch das AVL Smoke Meter [3], dessen Funktionsweise in Abbildung 1.1 beschrieben ist. Die Messgrößen sind in diesem Fall die Massenkonzentration C in $\frac{mg}{m^3}$ und die Filter Smoke Number (FSN, nach ISO 10054).

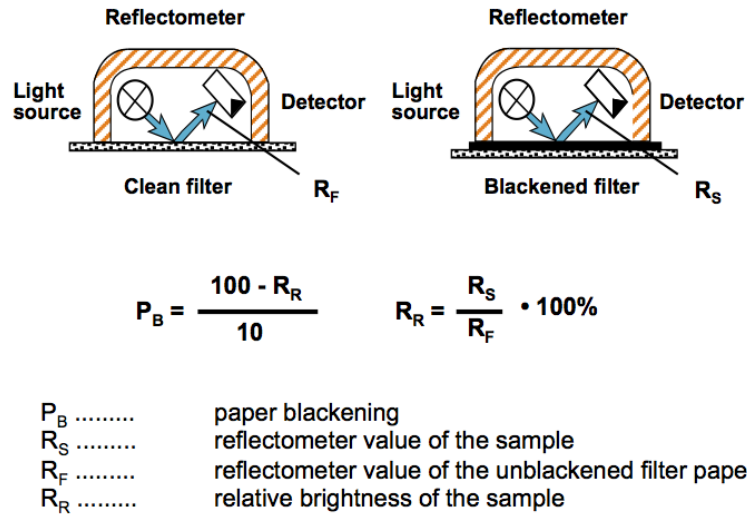


Abbildung 1.1: Funktionsprinzip des AVL Smoke Meters[3]

1.1.2 Opazimeter

Da die Anwendung der in 1.1.1 beschriebenen Messmethode allerdings nur bei stark rauchenden Verbrennungsmotoren, die Rußpartikel im μm -Bereich emittieren, sinnvoll ist wurden Alternativen notwendig. Moderne Verbrennungsmotoren arbeiten mit höherer Verdichtung und höherem Einspritzdruck, was kleinere Partikeldurchmesser und -konzentrationen zur Folge hat. Zur Untersuchung der Partikelemissionen von Dieselfahrzeugen wird bei der Periodical Technical Inspection (PTI) derzeit ein Trübungstest durchgeführt, um die Qualität der Verbrennung zu untersuchen. Dies wird mithilfe eines Opazimeters [2], also eines Trübungsmessgerätes, gemessen. Dabei strömt das Abgas in die Messkammer, die durch die Partikel im Abgas getrübt und somit lichtundurchlässiger wird. Diese Trübung wird mittels einer starken Lichtquelle und eines Lichtsensors gemessen und lässt Rückschlüsse auf die Partikelemissionen des zu untersuchenden Fahrzeuges zu. Die Messgrößen hierbei sind die Trübung N in % bzw. der Absorptionskoeffizient k in m^{-1} . Wie bereits zu erahnen ist, ist diese Messmethode eher ein grobes Messmittel, welches für moderne Fahrzeuge ungeeignet ist, da diese wesentlich kleinere Partikelkonzentrationen emittieren als alte Dieselfahrzeuge und die Trübung der Messkammer somit sehr gering ist.

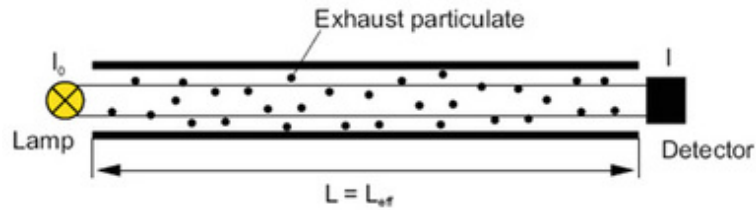


Abbildung 1.2: Funktionsprinzip des Opacimeters[2]

1.1.3 Streulichtverfahren

Aufgrund der zu niedrigen Sensitivität des Opazimeters wurde von Harald Axmann ein Abgasmessgerät nach dem Streulichtverfahren entwickelt. Dabei wird nicht wie beim Opazimeter die Trübung gemessen, sondern das an den im Abgas befindlichen Partikeln gestreute Licht. Der grundlegende Aufbau ähnelt dem Opazimeter zwar, jedoch sind die Detektoren nicht auf die Lichtquelle gerichtet, sondern in beliebigem Winkel angeordnet. Ziel der Streulichtmessung ist die Ermittlung der Trübung N in $\%$ bzw. des Absorptionskoeffizient k in m^{-1} , sowie der Massenkonzentration C in $\frac{mg}{m^3}$. Diese Größen können allerdings nicht direkt gemessen werden, sondern erfordern eine Umrechnung der Messwerte in die Zielgrößen. Eine detaillierte Beschreibung des Messprinzips findet sich in [4].

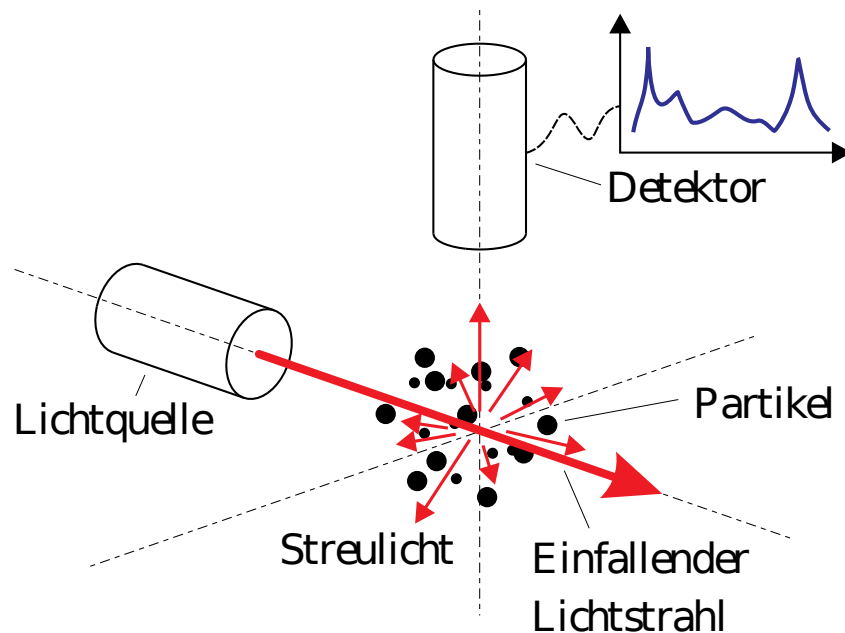


Abbildung 1.3: Funktionsprinzip der Streulichtmessung[4]

Da moderne Dieselfahrzeuge allerdings Partikel mit vergleichsweise geringer Masse

(„Feinstaub“) im Abgas emittieren, scheint eine Massenkonzentrationsmessung, wie z.B. die Messung im Streulichtverfahren, nicht mehr sehr aussagekräftig. Statt einer Massenkonzentration soll die Partikelanzahlkonzentration gemessen werden, um ein Messergebnis mit größerer Aussagekraft zu erhalten. Voraussichtlich wird im Laufe der nächsten Jahre in vielen EU-Ländern und der Schweiz eine Partikelanzahlmessung im Zuge der PTI gesetzlich vorgeschrieben werden, um Diesel-PKW's auf die korrekte Funktion des Partikelfilters zu untersuchen.

1.2 Motivation

Im Jahre 2014 wurde die verpflichtende Abgasuntersuchung im Zuge der PTI aufgrund der EU-Richtlinie 2014/45 abgeschafft und dadurch die externe Kontrolle durch eine Selbstkontrolle mittels On-Board-Diagnose (OBD) ersetzt. Dies öffnete Tür und Tor für Manipulationen aller Art, wie sie im Zuge des „Dieselgate“-Skandals von 2015 aufgedeckt wurden. Am 23.11.2016 wurde daher eine NPTI (New PTI) - Task Force gegründet, mit dem Ziel, Fahrzeuge mit Dieselpartikelfilter auf dessen korrekte Funktion zu überprüfen. In [5] wurde ein Grenzwert von 100000 \#/cm^3 im Leerlauf für die Partikelanzahlkonzentration beschrieben. Allerdings sind bisher noch keine Messgeräte verfügbar, die für den Werkstätteneinsatz geeignet, robust und preiswert ($< 8000 \text{ €}$) sind. [5]

Die Überprüfung von Fahrzeugen beginnt in den Niederlanden und Belgien noch in diesem Jahr. In Deutschland werden seit 2017 wieder Abgasuntersuchungen im Zuge der PTI durchgeführt, welche ab 2021 auch eine Partikelanzahlkonzentrationsmessung beinhalten werden. In der Schweiz werden entsprechende Messungen erst gesetzlich verankert, sobald geeignete Messgeräte verfügbar sind, ebenso in Spanien, Frankreich und dem Vereinigten Königreich.

Aufgrund dieser Gegebenheiten entwickelt die AVL DiTEST GmbH derzeit ein Messgerät für den Werkstätteneinsatz, mit dem die Partikelanzahlkonzentration im Abgas von Fahrzeugen erfasst werden kann.

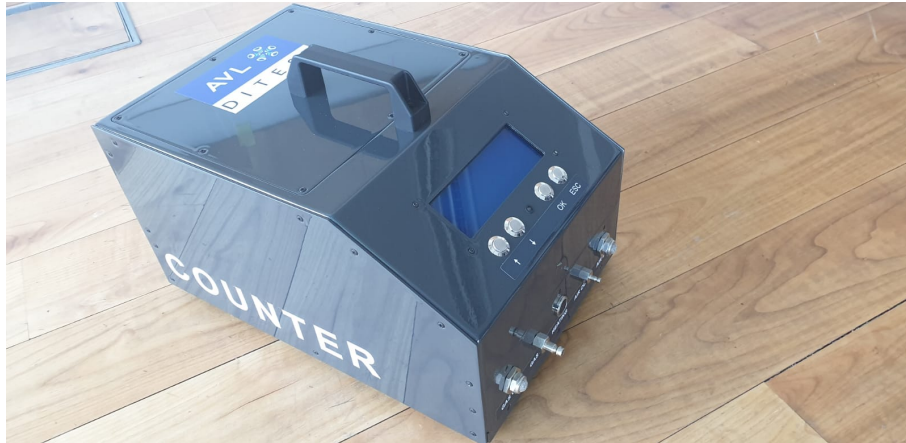


Abbildung 1.4: AVL DiTEST PN Counter (B1-Muster)

1.3 Fragestellung

Aufgabenstellung dieser Arbeit ist es, den Diffusion Charger der AVL DiTEST GmbH auf Systemebene zu charakterisieren, die Funktionsweise zu testen, das pneumatische Konzept inklusive Abgaskonditionierung weiterzuentwickeln und Kalibriermessungen mit diversen Aerosolen durchzuführen, um daraus Zähleffizienz, Linearität sowie in weiterer Folge Langzeitstabilität des Messgerätes zu überprüfen.

1.4 Umfang

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die Funktionsweise des Diffusion Chargers der AVL DiTEST GmbH und das Messprinzip im Allgemeinen zu vermitteln. Es wird die Funktionsweise der Module beschrieben, das Pneumatikkonzept erläutert, Testmessungen analysiert und das Messgerät als Gesamtsystem betrachtet. Eine detailreichere Dokumentation des elektronischen Aufbaus des Messgerätes, der Signalakquise und der Signalverarbeitung findet sich in [6]. Das Sensorprinzip des Diffusion Chargers ist in [7] detailliert erläutert.

Kapitel 2

Messhardware

2.1 Messprinzip

Für die Messung der Partikelanzahlkonzentration gibt es verschiedene Messprinzipien. Mit einem Kondensations-Partikelzähler (CPC) wie z.B. dem APC der AVL GmbH (siehe [8]) kann in einem Bereich von 0 bis ca. 50000 $\#/cm^3$ präzise gemessen werden, mit einem Diffusion Charger (wie dem Messgerät der AVL DiTEST GmbH, in weitere Folge „PN Counter“ genannt) ist es hingegen einfacher, größere Partikelanzahlkonzentrationen von ca. 3000 $\#/cm^3$ bis $> 10^7 \#/cm^3$ zu messen.

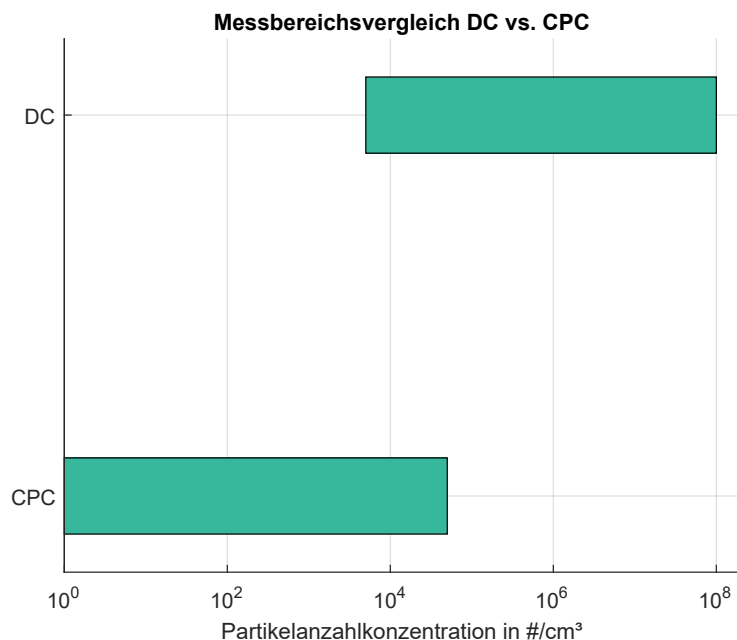


Abbildung 2.1: Messbereichsvergleich

Die Vorteile des Diffusion Chargers gegenüber einem Kondensations-Partikelzähler

bestehen unter Anderem darin, dass er kein Betriebsmittel benötigt und dadurch robuster und ungefährlicher in der Handhabung ist. Zudem ist der Aufbau eines Diffusion Chargers weitaus weniger komplex als der eines CPCs, was wiederum geringere Herstellungskosten bedeutet. Dies legt nahe, dass ein Diffusion Charger das Messgerät der Wahl sein wird, wenn es darum geht, kostengünstige Messungen in KFZ-Werkstätten durchzuführen.

Im Falle eines funktionierenden Dieselpartikelfilters wird die am Auspuff gemessene Partikelanzahlkonzentration im Leerlauf unter $2.5 \times 10^5 \text{ \#/cm}^3$ liegen, in den meisten Fällen durchaus bei weniger als 5000 \#/cm^3 , was einer üblichen Partikelanzahlkonzentration in der Umgebungsluft entspricht. Bei defekten Partikelfiltern kann der Messwert weit darüber liegen, in einer Größenordnung von ca. 10^6 \#/cm^3 und aufwärts. Solche hohen Partikelanzahlkonzentrationen sind mittels CPC nur dann zu erfassen, wenn das zu messende Aerosol stark verdünnt wird (teilweise bis 1:20000, wie z.B. beim Particle Counter der Firma AVL List GmbH, siehe [8]), was zusätzlichen Konstruktionsaufwand bedeutet und den Preis des Messgeräts in die Höhe treibt.

Der Diffusion Charger ist allerdings für Partikelanzahlkonzentrationen dieser Größenordnung gut geeignet, der Messbereich geht in der derzeitigen Konfiguration bis ungefähr 10^8 \#/cm^3 bei einem Verdünnungsverhältnis von ca. 1:4.

Das Messprinzip des Diffusion Chargers wurde von A. Bergmann, M. A. Schriefl und M. Fierz in [7] beschrieben.

2.1.1 Diffusion Charger

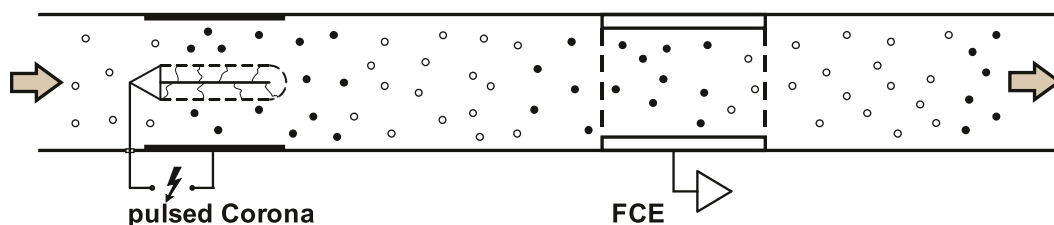


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Diffusion Chargers

Abbildung 2.2 zeigt die schematische Darstellung eines Diffusion Chargers. Das zu messende Aerosol wird zuerst in eine Aufladeeinheit geleitet, wo sich Ionen an die Partikel anhaften und die Partikel dadurch elektrisch aufladen sollen. Diese

Aufladung wird beim Diffusion Charger mittels eines sehr dünnen (25 μm) Wolframdrahtes realisiert, der auf einer Spannung von 3000-5000 V liegt. Die Hochspannung wird so geregelt, dass der Ionenstrom, also der Strom vom Wolframdraht zur Ionenfalle, konstant ist, um so eine gleichmäßige und zeitlich möglichst nicht veränderliche Aufladeparakteristik zu erreichen. Die Anzahl der Ionen, die sich an die Partikel anlagern, ist abhängig von der Oberfläche der Partikel, welche sowohl durch deren Morphologie, als auch durch deren mittleren Mobilitätsdurchmesser bestimmt wird. Die Aufladeeinheit ist nicht permanent eingeschaltet, sondern wird mit einer von der Geometrie der verwendeten Module abhängigen Frequenz in der Größenordnung von 1 Hz ein- und ausgeschaltet (=moduliert). Diese Modulation ist wichtig, um am nachfolgenden Faraday'schen Käfig ein Wechselfspannungssignal zu erhalten.

Nachdem die Partikel in der Aufladeeinheit mit Ionen behaftet wurden muss das aufgeladene Aerosol nun einen Faraday'schen Käfig passieren. Durch die elektrische Aufladung der Partikel im Aerosol werden Spiegelladungen auf der Oberfläche des Faraday'schen Käfigs induziert, sobald das geladene Aerosol in den Faraday'schen Käfig eintritt. Die so induzierten Spiegelladungen rufen wiederum einen Strom hervor, der im Bereich einiger Femtoampere liegt, und von einer Elektrometerschaltung gemessen wird.

Beim Verlassen des Faraday'schen Käfigs, fließen diese Spiegelladungen wieder zurück, und der Strom fließt in die entgegengesetzte Richtung (siehe Abbildung 2.5). Das so entstandene Wechselfspannungssignal ist nicht rein sinusförmig, sondern besteht aus einer Grundwelle und mehreren Oberwellen, wobei die Frequenz der Grundwelle idealerweise der Modulationsfrequenz der Aufladeeinheit entspricht. Die Amplitude dieser Grundwelle ist wiederum proportional zur Anzahl der Ladungen, die sich auf den Partikeln angelagert haben. In der Realität wird die gemessene Frequenz des Faraday-Cup-Signals allerdings aufgrund von Strömungseffekten, wie beispielsweise Pulsationen im Durchfluss, nicht genau der Modulationsfrequenz entsprechen. Diese Pulsationen werden durch die Membranpumpen erzeugt und können durch Puffervolumen zwar abgeschwächt, aber nicht eliminiert werden. Es findet eine „Verschmierung“ der Aerosolwolke statt.

Der Nachteil bei diesem Sensorprinzip ist eine hohe Abhängigkeit vom mittleren Partikeldurchmesser und der Partikeloberfläche. Der Zusammenhang zwischen Partikelanzahl und Ausgleichsstrom lässt sich für ein monodisperses Aerosol anhand von Formel 2.1 beschreiben.

$$I_{DC}(d_p) \propto N\Phi\bar{q}(d_p) \quad (2.1)$$

wobei $I_{DC}(d_p)$ dem Ausgleichsstrom in den oder aus dem Faraday'schen Käfig in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser d_p , N der Partikelanzahlkonzentration, $\bar{q}(d_p)$ der mittleren Ladung pro Partikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser und Φ dem volumetrischen Fluss entspricht.

Durch Umformen dieser Gleichung auf die Partikelanzahl N kann also der Partikelwert errechnet werden. Ein störender Effekt hierbei ist die Abhängigkeit des Messsignals vom Partikeldurchmesser.

2.1.2 Modulated Precipitator

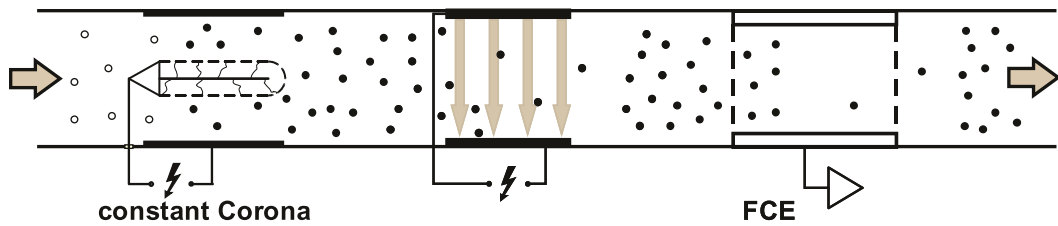


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider

Um die Partikelgrößenabhängigkeit des Messprinzips zu verringern wurde der Diffusion Charger weiterentwickelt. Es wird zwischen Aufladeeinheit und Faraday-Cup eine Art Plattenkondensator eingefügt, zwischen dessen Platten der Aerosolstrom durchfließt. Dieser Plattenkondensator wird als elektrostatischer Abscheider bezeichnet. Anstatt die Aufladeeinheit zu modulieren wird hier der elektrostatische Abscheider gepulst betrieben, also eine rechteckförmige Hochspannung zwischen den Platten des Kondensators angelegt. Abbildung 2.3 zeigt die schematische Darstellung eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider. Der Ausgleichsstrom in den oder aus dem Faraday-Cup berechnet sich bei dieser Art des Diffusion Chargers zu

$$I_{MP}(d_p) = N\Phi\bar{q}(d_p)(1 - T_{ESP}(d_p)) \quad (2.2)$$

Sofern der Elektrostatische Abscheider als Plattenkondensator ausgeführt ist, kann dessen Transmissionscharakteristik mit Gleichung 2.3 beschrieben werden

$$T_{ESP}(d_p) = \max\left(0, \frac{\omega_{ESP}^2 - Z_p V_{ESP} \tau_{ESP}}{\omega_{ESP}^2}\right) \quad (2.3)$$

wobei $I_{MP}(d_p)$ dem Ausgleichsstrom in den oder aus dem Faraday-Cup in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser d_p , N der Partikelanzahlkonzentration, $\bar{q}(d_p)$ der mittleren Ladung pro Partikel in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser d_p und Φ dem volumetrischen Fluss, T_{ESP} der Transmission des elektrostatischen Abscheiders, ω_{ESP} dem Abstand zwischen den Kondensatorplatten, Z_p der elektrischen Mobilität der Partikel, V_{ESP} der angelegten Spannung zwischen den Kondensatorplatten, und τ_{ESP} der Verweilzeit der Partikel im Abscheider entspricht.

2.1.3 Two-Stage Measurement

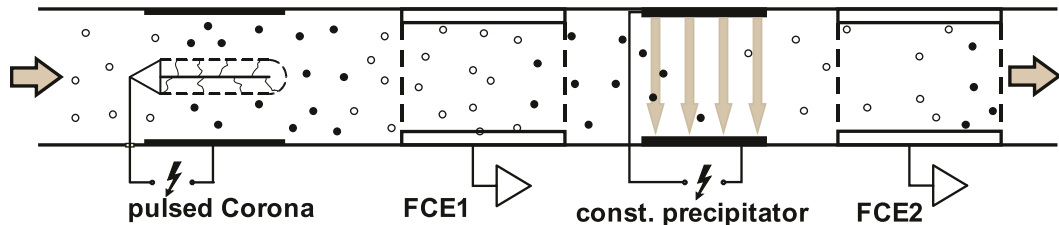


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines zweistufigen Diffusion Chargers

Bei dieser Art des Diffusion Chargers werden 2 Faraday-Cups verwendet, wobei sich das Signal des 1. Faraday-Cups zu 2.1 und das Signal des 2. Faraday-Cups zum Produkt aus 2.1 und 2.3 berechnet. Durch Bildung der Differenz dieser Gleichungen berechnet sich das Sensorsignal für das Two-Stage Measurement-Prinzip zu

$$I_{2SM}(d_p) = N\Phi\bar{q}(d_p)(1 - T_{ESP}(d_p)) \quad (2.4)$$

Der Vorteil dieses Prinzips ist, dass zusätzlich zur Partikelanzahlkonzentration unter bestimmten Umständen auch die mittlere Partikelgröße errechnet werden kann.

2.1.4 Sensorsignal

Um das Sensorprinzip zu verifizieren wurde von M. Schriefl [7] eine FEM-Simulation eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider (siehe 2.1.2) in COMSOL erstellt. Das Sensorsignal wurde mit dem eines Prototypen verglichen, dargestellt in Abbildung 2.5.

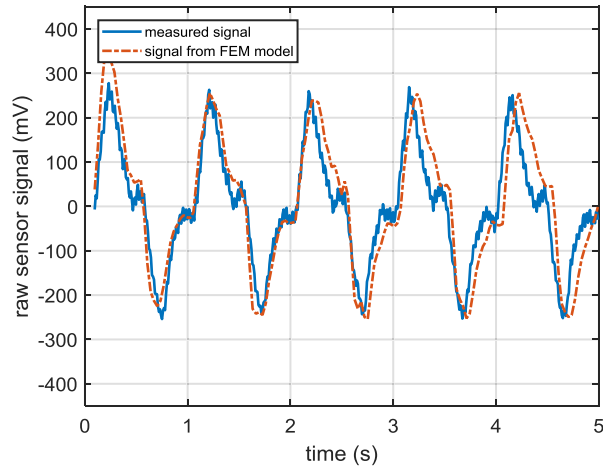


Abbildung 2.5: Sensorsignal eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider

Hierbei ist zu erkennen, dass der elektrostatische Abscheider mit einer Frequenz von 1 Hz (Rechtecksignal, Duty Cycle 50%) betrieben wird. Die positiven Peaks im Signal entstehen, wenn sich der Faraday-Cup mit geladenem Aerosol füllt, die negativen Peaks entstehen dadurch, dass das geladene Aerosol den Faraday-Cup verlässt und durch ungeladenes Aerosol ersetzt wird.

Da dieses Signal speziell bei niedrigen Konzentrationen stark verrauscht sein kann wird nicht der Spitze-Spitze-Wert zur Berechnung der Partikelanzahlkonzentration herangezogen, sondern die Fourier-Transformation des Signals über 2 Perioden der Modulationsfrequenz berechnet. Das so berechnete Frequenzspektrum des Sensorsignals beinhaltet einen Peak bei der Modulationsfrequenz des elektrostatischen Abscheiders (MP, siehe 2.1.2) bzw. der Corona-Aufladeeinheit (DC, siehe 2.1.1), welcher direkt proportional zur Partikelanzahlkonzentration im gemessenen Aerosol ist. Die Amplitude des Sensorsignals bei der Modulationsfrequenz wird also mit einem Faktor multipliziert und um einen Offset korrigiert, Faktor und Offset werden im Zuge der Kalibrierprozedur ermittelt. Die Kalibration des Messgerätes ist in 3.2 genauer beschrieben.

2.2 Pneumatikkonzepte

2.2.1 Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe

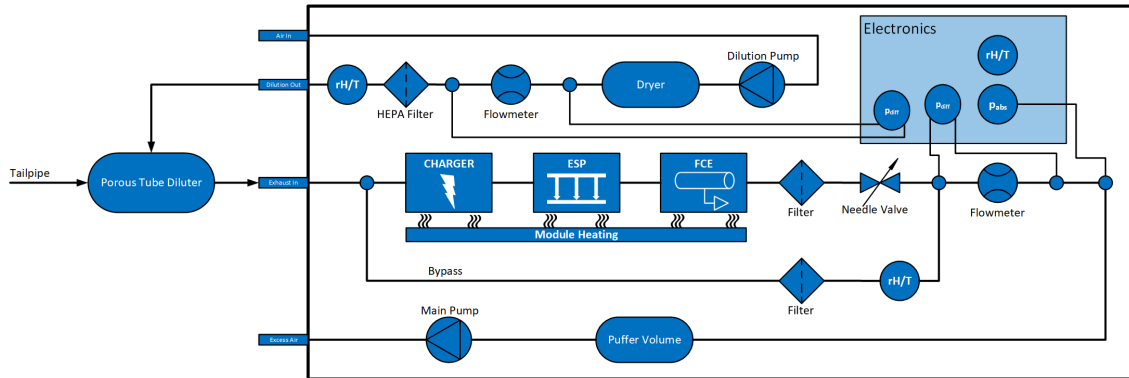


Abbildung 2.6: derzeitiges Pneumatikschema des Messgerätes

Das Konzept sieht jeweils eine Pumpe für den Haupt- und den Verdünnerzweig vor. Die Hauptpumpe ist eine Vakuum-Membranpumpe, die das verdünnte Aerosol am „Exhaust In“-Eingang durch die Messkette und einen Bypass saugt, der nötig ist, um den Massenfluss durch die Messkette klein genug einstellen zu können. Zum Einstellen des Messflusses (also dem Fluss durch Charger, ESP und FCE) wird ein Nadelventil verwendet. Vor der Pumpe befinden sich Filter, um die Verschmutzung durch das Aerosol so gering wie möglich zu halten.

Die Verdünnerpumpe ist eine Druck-Membranpumpe, die Umgebungsluft ansaugt, durch einen Trockner und einen HEPA-Filter presst und anschließend in den Porous Tube Diluter einleitet. Der Durchfluss, den die Verdünnerpumpe in den Porous Tube Diluter einspeist beträgt ungefähr 4 slpm (Standard-Liter pro Minute). Dort wird das Abgas, das mit einer Rate von ca. 1 slpm angesaugt wird, mit der gefilterten und getrockneten Luft verdünnt, um den Partialdruck der volatilen Abgasbestandteile zu senken und somit einer möglichen Kondensation entgegenzuwirken. Die Hauptpumpe muss somit die Summe aus Abgas-Ansaugfluss und Verdünnerpumpenfluss ansaugen, bei der derzeitigen Konfiguration des Messgerätes ungefähr 5 slpm. Im Haupt- und Verdünnerzweig des Messgerätes befinden sich jeweils ein Durchflussmesser und ein Temperatur- und Feuchtigkeitssensor, die nötig sind, um einen genauen Massenfluss berechnen zu können. Außerdem kann durch diese Sensoren sowohl die Funktionalität des Trockners, als auch die korrekte Funktion der Pumpen überprüft werden.

Die Vorteile dieses Konzepts liegen darin, dass ein höherer Volumenfluss erreicht werden kann als mit nur einer Pumpe und Rezirkulation des gefilterten Mess-Aerosols. Dadurch kann ein höheres Verdünnungsverhältnis erreicht werden, was die Verschmutzung im Messgerät reduziert, allerdings auch ein höheres Detektionslimit zur Folge hat. Nachteilig an dieser Version sind das Mehrgewicht und die höheren Kosten durch die zweite Pumpe.

2.2.2 Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation

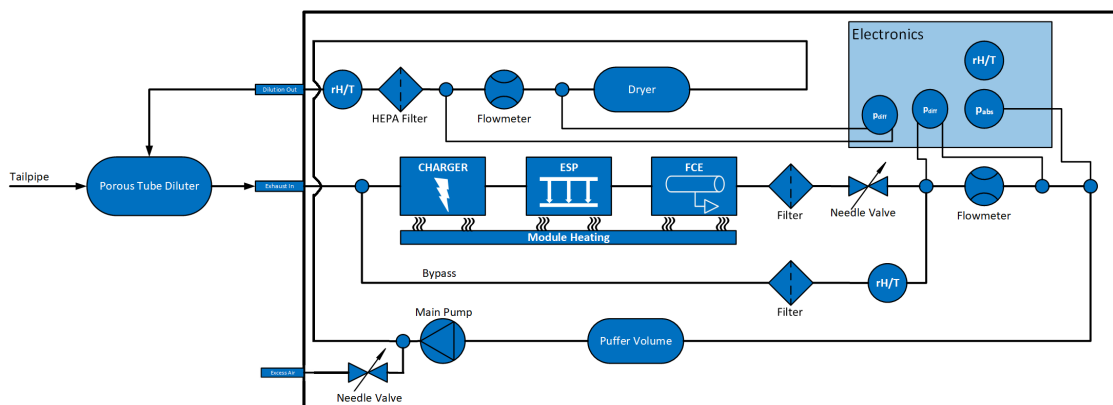


Abbildung 2.7: alternatives Pneumatikkonzept mit nur einer Pumpe

Um die Produktionskosten des Messgerätes zu reduzieren wurde die Idee ins Auge gefasst, anstatt zwei Pumpen lediglich eine zu verbauen. Die Anforderungen an diese Pumpe sind allerdings andere als beim ursprünglichen Konzept, diese muss nämlich sowohl mit Überdruck im Druckzweig, als auch mit Unterdruck im Vakuumzweig arbeiten können. Vorteil dieses Konzepts sind nicht nur die niedrigeren Produktionskosten, sondern auch die niedrigere Feuchtigkeitsakkumulation im Gerät selbst, da nicht die Umgebungsluft getrocknet werden muss, sondern das gefilterte Abgas, welches bei jedem Durchlauf des Rezirkulationszweiges erneut getrocknet wird.

Um eine endgültige Aussage über die Funktionsfähigkeit und Robustheit dieser Version treffen zu können, sind allerdings noch diverse Tests vonnöten, wie z.B. eine Untersuchung der Massenflüsse bei verschiedenen Umgebungsdrücken, als auch die Untersuchung der Funktionsfähigkeit einer Massenflussregelung (siehe 3.1).

Thomas 1420 DP BLDC

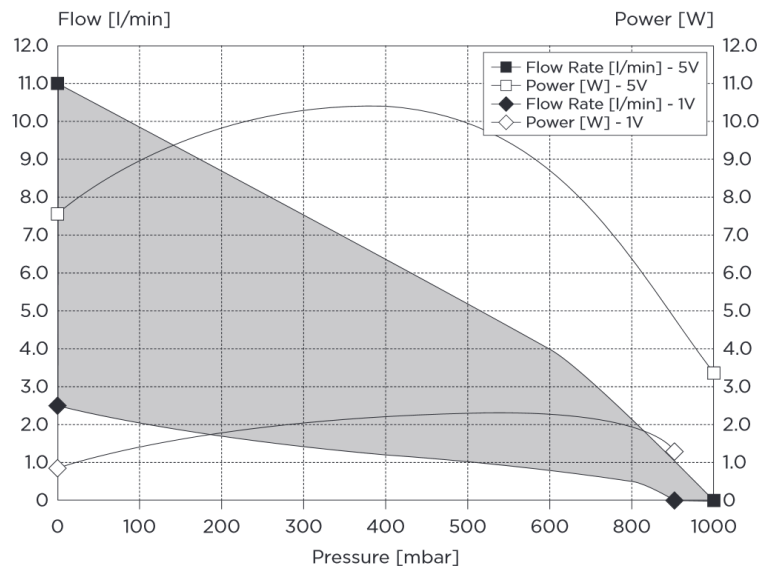


Abbildung 2.9: Thomas 1420 DP - Kennlinie

Thomas 1420 VP BLDC

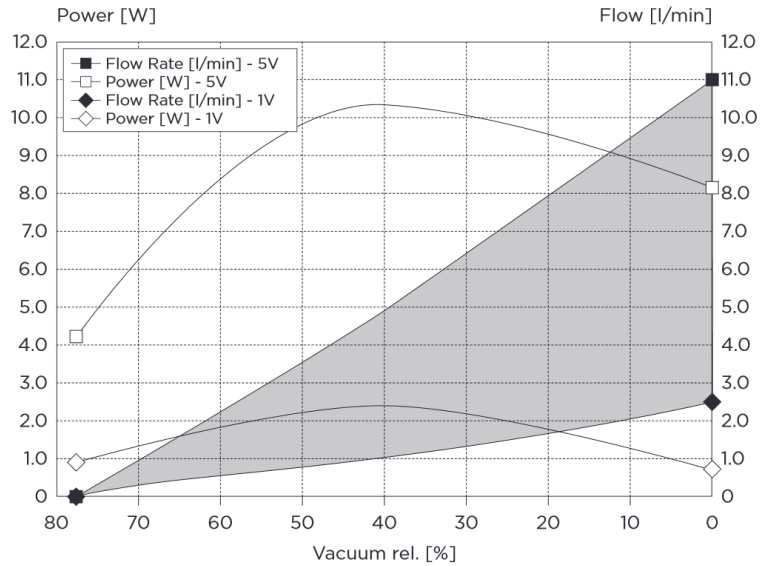


Abbildung 2.10: Thomas 1420 VP - Kennlinie

2.3.2 Pumpen der 1620-Serie

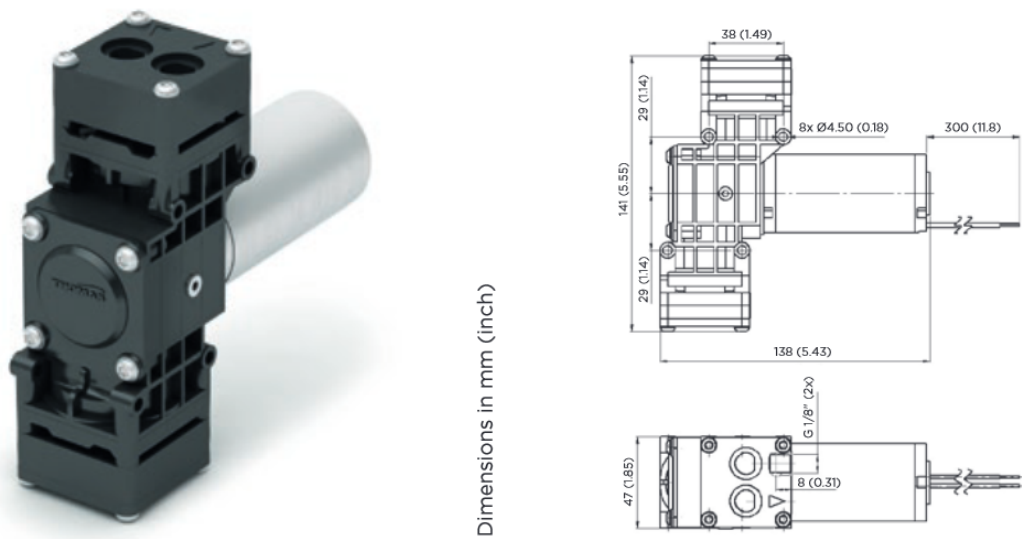


Abbildung 2.11: Thomas 1620-Serie

In der Praxis konnte der gewünschte Fluss allerdings mit keiner der gelieferten Pumpen der 1420-Serie erreicht werden, bei unseren Tests wurde ein maximaler Wert von ungefähr 7 l/min festgestellt. Daher wurden als Alternative zu den Pumpen der 1420-Serie Pumpen aus der 1620-Serie von GardnerDenverThomas [10] vorgeschlagen. Diese sind jedoch nur mit Bürstenmotor lieferbar, was eine geringere Lebensdauer gegenüber den bürstenlosen Motoren bedeutet. Außerdem funktioniert die Drehzahlsteuerung der Pumpe mittels Pulsweitenmodulation nur über eine Zusatzplatine, die das 5 V-PWM-Signal in eine analoge Spannung zwischen 0 und 24 V umsetzt.

Thomas 1620 VDP

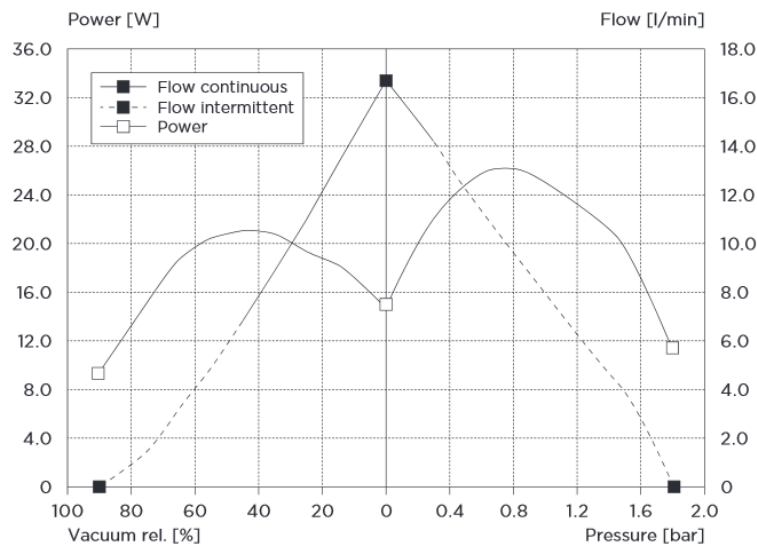


Abbildung 2.12: Thomas 1620 VDP - Kennlinie

2.3.3 Messkette

Um den Durchfluss im Messzweig auf den gewünschten Wert von 1 slpm bzw. 1.5 slpm zu bringen ist es nötig, parallel zum Messzweig (Corona, Elektrostatistischer Abscheider, Faraday-Cup) einen Bypass einzurichten. Ein Nadelventil nach der Messkette sorgt dafür, dass der Gesamtfluss von ca. 5 slpm in einen Messfluss von 1 bzw. 1.5 slpm und einen Bypassfluss von 4 bzw. 3.5 slpm aufgeteilt wird. Ohne das Nadelventil würden sich die Flüsse zu gleichen Teilen in Bypass- und Messfluss aufspalten. Da im Messzweig allerdings ein Fluss von nur 1 bzw. 1.5 slpm gefordert ist, muss ein Nadelventil zur Drosselung des Messflusses eingebaut werden. Für die Justierprozedur ist ein Massflowmeter in den Messzweig einzubauen und das Nadelventil entsprechend zu justieren.

2.3.4 Verdünnung

Zur Vermeidung von Kondensation und um den Einfluss volatiler Abgasbestandteile auf die Messung zu minimieren ist es nötig, das zu messende Aerosol zu verdünnen und/oder zu heizen, um dessen relative Feuchtigkeit zu reduzieren und so Kondensation verhindern zu können, da diese sowohl verschmutzungsbedingte Fehler, als auch falsche Messergebnisse verursachen kann. Durch die Verdünnung des Abgases wird der Partialdruck der volatilen Abgasbestandteile gesenkt, wodurch sie leichter in der Gasphase zu halten sind. Die Verdünnung funktioniert über einen Porous

Tube Diluter, ein poröses Sintermetall, das eine homogene Durchmischung von Verdünnungsluft und dem zu messenden Aerosol gewährleistet.

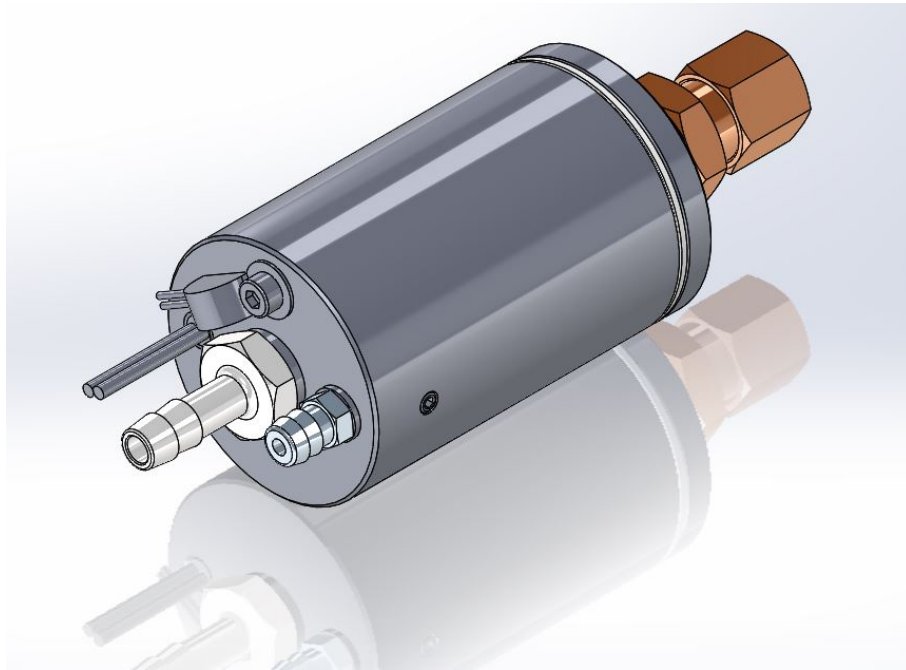


Abbildung 2.13: Porous Tube Diluter

2.3.5 Trockner

Da die Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft bzw. aus dem gefilterten Abgas bei extremen Klimabedingungen (hohe relative Luftfeuchtigkeit, $>80\%$) bereits zu Kondensation im Gerät führen kann ist es notwendig, die Umgebungsluft bzw. das gefilterte Abgas, die bzw. das zur Verdünnung des zu messenden Aerosols herangezogen wird, zu trocknen. Dies kann u.a. entweder über einen thermoelektrischen Trockner oder über einen Silicagel-Trockner realisiert werden, wobei der hochpreisigere thermoelektrische Trockner zu bevorzugen ist, da er kein Betriebsmittel benötigt. Der Vorteil des Silicagel-Trockners hingegen liegt in der einfacheren Konstruktion und dadurch größeren Robustheit, allerdings auf Kosten von kürzeren Serviceintervallen durch das relativ häufig zu wechselnde Betriebsmittel.

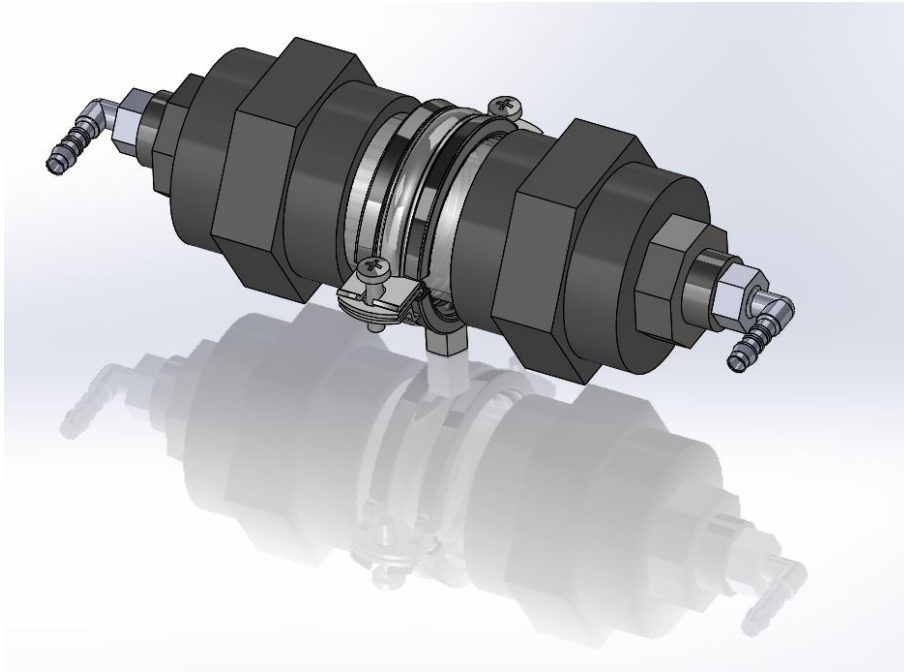


Abbildung 2.14: Silicagel-Trockner

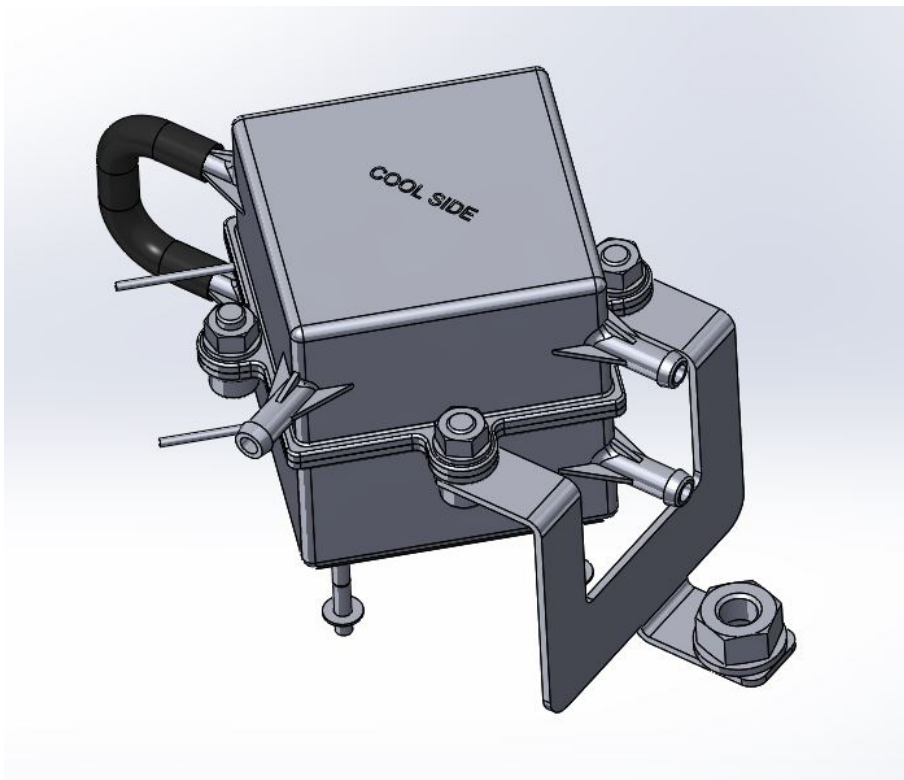


Abbildung 2.15: Thermoelektrischer Trockner

2.3.6 Evaporation Tube

Um die Messung volatiler Abgasbestandteile zu verhindern ist es nötig, vor der Messkette eine „Evaporation Tube“ zu verbauen, in welcher das zu messende Aerosol soweit erhitzt wird, dass lediglich die nicht-flüchtigen Abgasbestandteile gemessen werden. Um diesen Effekt untersuchen zu können wurde ein Tetracontan-Generator konstruiert, in welchem Tetracontan (ein Alkan mit 40 C-Atomen) auf 170 °C erhitzt wird, wodurch sich ein Aerosol aus Luft und Tetracontan-Tröpfchen bildet, welche einen mittleren Durchmesser von ca. 30 nm aufweisen. Durch das Erhitzen des Tetracontans entsteht eine übersättigte Tetracontan-Atmosphäre, in der das Tetracontan an Nukleationskeimen in der durchströmenden Luft kondensiert. Um den Einfluss von volatilen Partikeln auf die Messung zu minimieren muss das zu messende Aerosol so hoch erhitzt werden, dass die Tetracontan-Tröpfchen in die Gasphase übergehen und in der Aufladeeinheit nicht aufgeladen werden. Dieser Prozess ist in der nachfolgenden Abbildung anhand eines Phasendiagramms beschrieben. Die volatilen Abgasbestandteile gehen von der flüssigen (blau) in die Gasphase über (gelb), was verhindert, dass sie die Messung beeinflussen können. Um eine Renukreation des in der Gasphase befindlichen Tetracontans zu verhindern, muss die Messkette, speziell die Aufladeeinheit, ebenfalls beheizt sein. Wäre dies nicht der Fall, würde sich das Tetracontan an Kondensationskeimen anlagern, was eine neuerliche Tröpfchenbildung bedeuten würde.

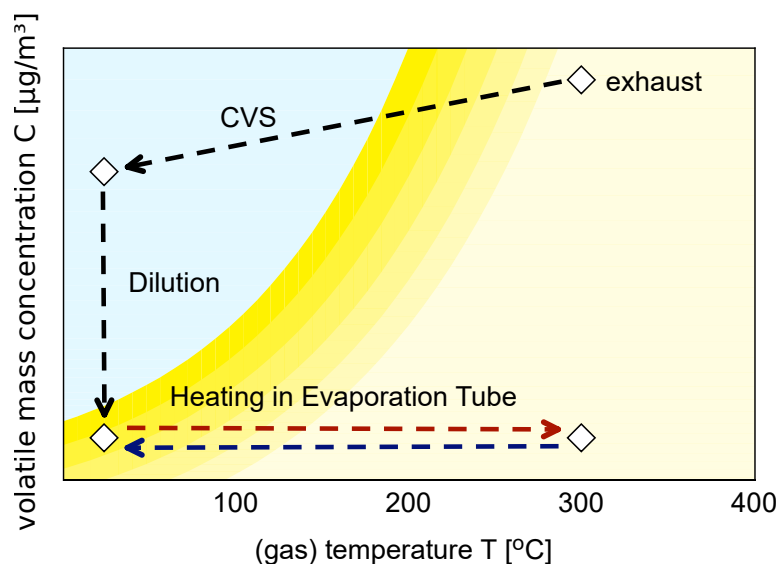


Abbildung 2.16: Phasendiagramm für den VPR [11]

Die derzeitige Konstruktion besteht aus einer Kupferrohr-Spirale, die vom verdünnten Aerosol durchflossen und mittels einer Heizpatrone erhitzt wird. Durch die vorangegangene Verdünnung wird der Partialdruck der volatilen Bestandteile gesenkt, wodurch eine niedrigere Temperatur ausreicht, um die volatilen Abgasbestandteile in der Gasphase zu halten, sodass die Evaporation Tube weniger stark geheizt werden muss.

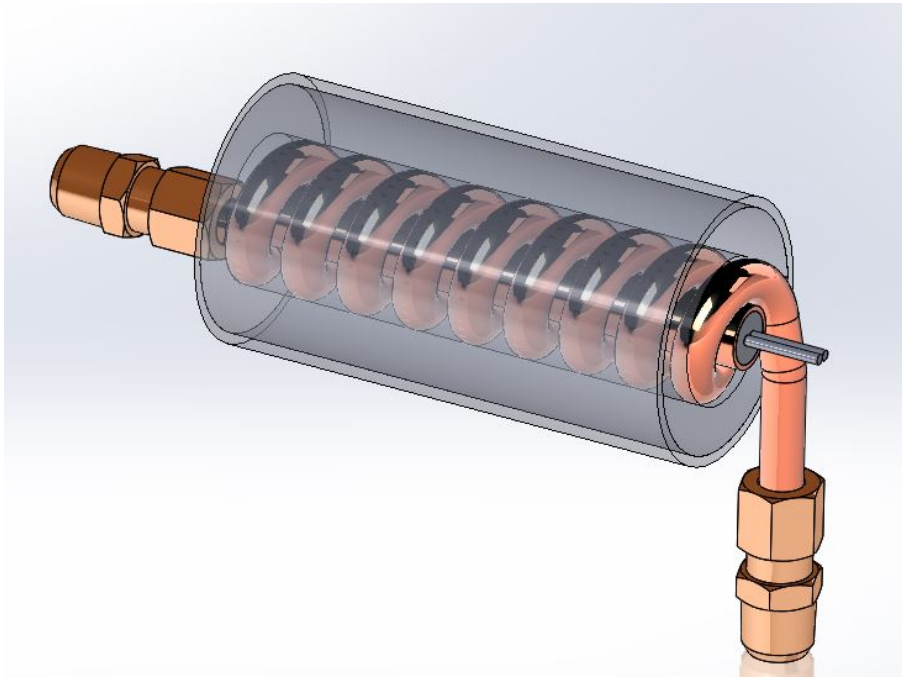


Abbildung 2.17: Evaporation Tube

2.4 Elektrischer Aufbau

Die Hauptplatine des PN Counters wird mittels eines externen Netzteils mit einer Leistung von 120 W bei einer Spannung von 24 V versorgt. Auf der Hauptplatine sitzen diverse Spannungsregler, die alle notwendigen Spannungen stabil erzeugen. Aufgrund der verbauten Heizelemente und des in Zukunft eventuell verwendeten Peltier-Trockners kann die Leistungsaufnahme des Messgerätes noch steigen, sodass ein stärkeres Netzteil notwendig wird. Abbildung 2.18 zeigt das Blockschaltbild des Messgerätes, erstellt von Matthias Longin. Darin ist farblich markiert, welcher Teil des elektrischen Aufbaus welcher Arbeit zuzuordnen ist. Nähere Informationen zur Ansteuerung der Corona-Aufladeeinheit und des elektrostatischen Abscheiders sowie zur Signalauswertung des FCEM-Moduls finden sich in [6]. Die Messung des Massendurchflusses mithilfe von Differenzdruck-, Absolutdruck- und Temperatursensoren ist Gegenstand dieser Arbeit, ebenso die Steuerung der Pumpen.

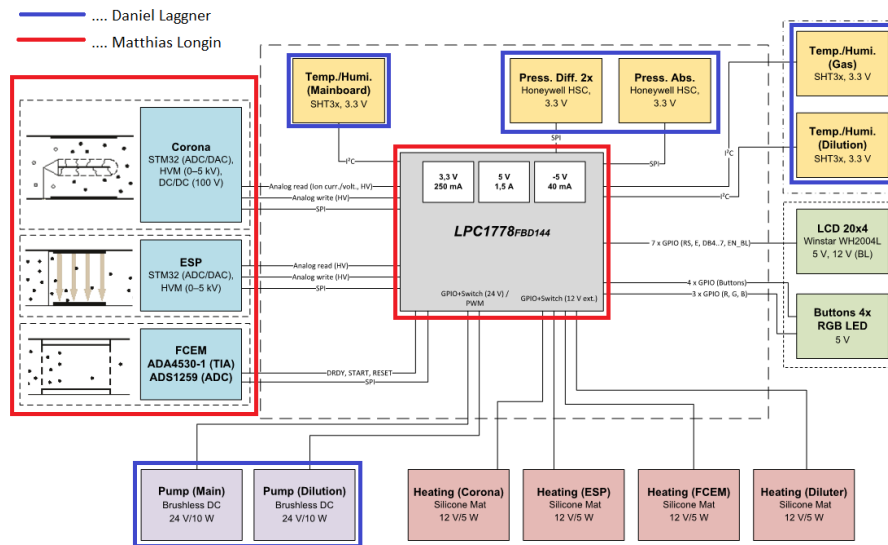


Abbildung 2.18: Blockschaftbild des PN Counters

2.5 Module

Der PN Counter verfügt über einen modularen Aufbau, die einzelnen Module werden in diesem Kapitel detailliert beschrieben. Die eigentliche Messkette besteht aus der Corona-Aufladeeinheit, elektrostatischem Abscheider und dem Faraday-Cup-Elektrometer. Zur Messsignalverarbeitung verfügt das Gerät über ein Mainboard, auf dem sowohl diverse Sensoren, als auch ein Prozessor verbaut sind. Ausgehend vom Mainboard kann das Messgerät mit einem PC kommunizieren, zusätzlich wird der aktuelle Partikelmesswert auf einem Display angezeigt.

2.5.1 Mainboard

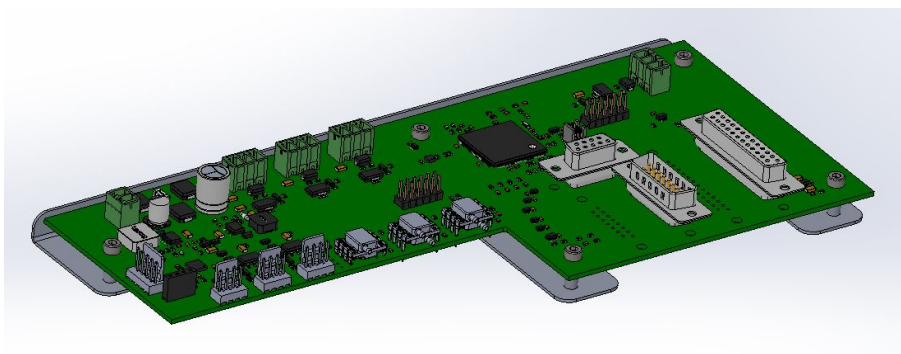


Abbildung 2.19: Mainboard

2.5.1.1 Sensoren

Auf dem Mainboard selbst befinden sich die in der nachfolgenden Tabelle vermerkten Sensoren.

Messgröße	Sensor	Anzahl
Absolutdruck	Honeywell 16BASA3	1
Differenzdruck	Honeywell 100MDSA3	2
Temperatur und relative Feuchtigkeit	Sensirion SHT31	1

Tabelle 2.1: Sensoren auf dem Mainboard

Zusätzlich zu den auf dem Mainboard befindlichen Sensoren verfügt das Messgerät über zwei weitere Temperatur- und Feuchtesensoren, von denen je einer im Haupt- und Verdünnerzweig platziert ist.

Für die Durchflussmessung von Haupt- und Verdünnerzweig sind jeweils ein Temperatur-, Differenzdruck- und Absolutdrucksensor vorgesehen, sodass nach Formel 3.3 und 3.9 der Massendurchfluss berechnet werden kann. Das bedeutet, dass in der nächsten Iteration des Messgerätes ein weiterer Absolutdrucksensor vorgesehen werden sollte. Zusätzlich kann mithilfe des Temperatur- und Feuchtigkeitssensors im Verdünnerzweig die korrekte Funktion des Verdünnungsluft-Trockners kontrolliert werden, der zweite Temperatur- und Feuchtigkeitssensor im Haupt-Pneumatikzweig des Messgerätes kann detektieren, ob die Modulheizung funktioniert und die Feuchtigkeit des verdünnten Aerosols niedrig genug ist, um Kondensation zu vermeiden. Ein weiterer Temperatur- und Feuchtigkeitssensor sitzt direkt am Mainboard und überwacht Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Messgerätegehäuse, um eine Überhitzung des Gerätes zu erkennen. Diese kann durch die Abwärme der Heizelemente und des Peltier-Trockners (sofern dieser verbaut werden sollte) entstehen, gegebenenfalls kann dann der Gehäuselüfter aktiviert werden.

2.5.2 Corona-Aufladeeinheit

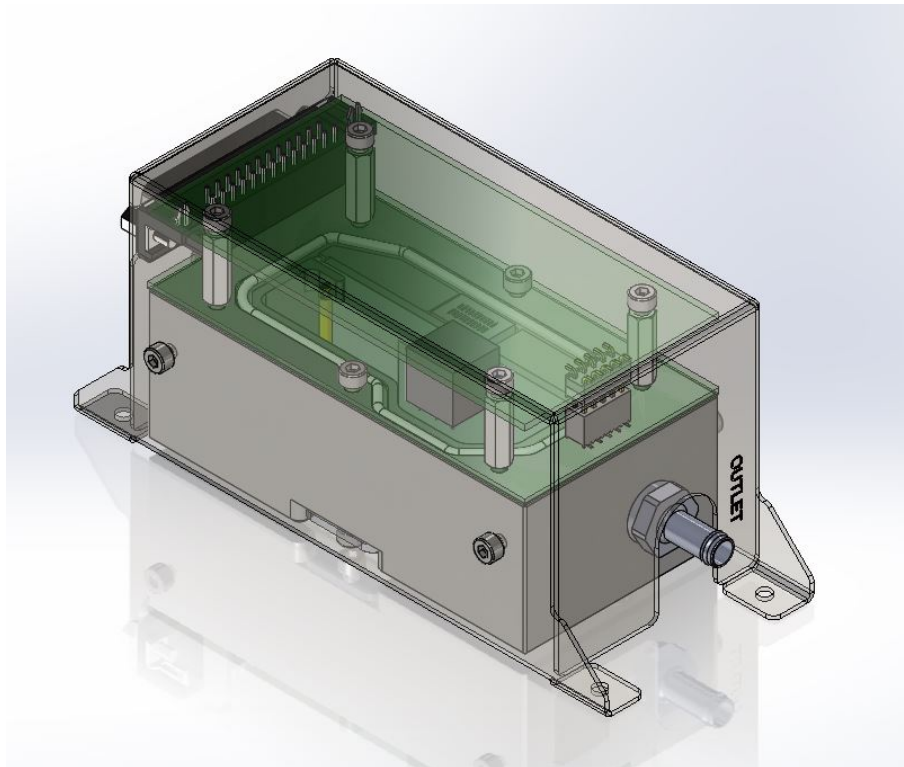


Abbildung 2.20: Corona-Aufladeeinheit

2.5.2.1 Funktionsprinzip

In der Corona-Aufladeeinheit befindet sich ein Wolframdraht mit einer Dicke von $25\ \mu\text{m}$, der auf einer Spannung zwischen $0\ \text{V}$ und $5000\ \text{V}$ liegt. Ab einer gewissen Spannung beginnt das elektrische Feld des Drahtes, die umliegenden Luft-Moleküle zu ionisieren, dies verursacht einen Ionenstrom vom Wolframdraht auf das umliegende Aluminiumgehäuse. Dieser Ionenstrom wird mittels eines Shunt-Widerstandes in eine Spannung umgewandelt und gemessen, sodass die Regelung der Corona-Spannung so erfolgen kann, dass sich der gewünschte Ionenstrom einstellt. Die durch die Hochspannung beschleunigten Ionen werden durch einen Strömungskanal geleitet, in dem sie auf das ungeladene Mess-Aerosol treffen und sich auf den im Aerosol befindlichen Partikeln anlagern. Die überschüssigen Ionen werden von einer Ionenfalle, die auf einer Spannung von $-90\ \text{V}$ liegt, abgezogen, um nicht von der Strömung mitgerissen zu werden, da dies das Messergebnis verfälschen würde.

2.5.2.2 Einstellbare Parameter

Wie bereits erwähnt ist es möglich, den Ionenstrom in der Corona mittels einer Regelung der Corona-Hochspannung einzustellen. Die Corona-Aufladeeinheit kann sowohl gepulst als auch konstant betrieben werden, je nach gewünschtem Operationsmodus (DC oder MP, siehe 2.1.1 und 2.1.2). Sollte es nicht gewünscht sein, dass der Ionenstrom auf einen bestimmten Wert hin geregelt wird, kann auch eine Hochspannung vorgegeben werden, auch so kann die Corona-Aufladeeinheit entweder konstant oder moduliert betrieben werden.

Sollte die Corona-Aufladeeinheit moduliert werden, kann auch die Modulationsfrequenz variiert werden, die Größenordnung liegt hier aufgrund der Geometrie der Module und des eingestellten Massenflusses bei ca. 1 Hz.

2.5.3 Elektrostatischer Abscheider

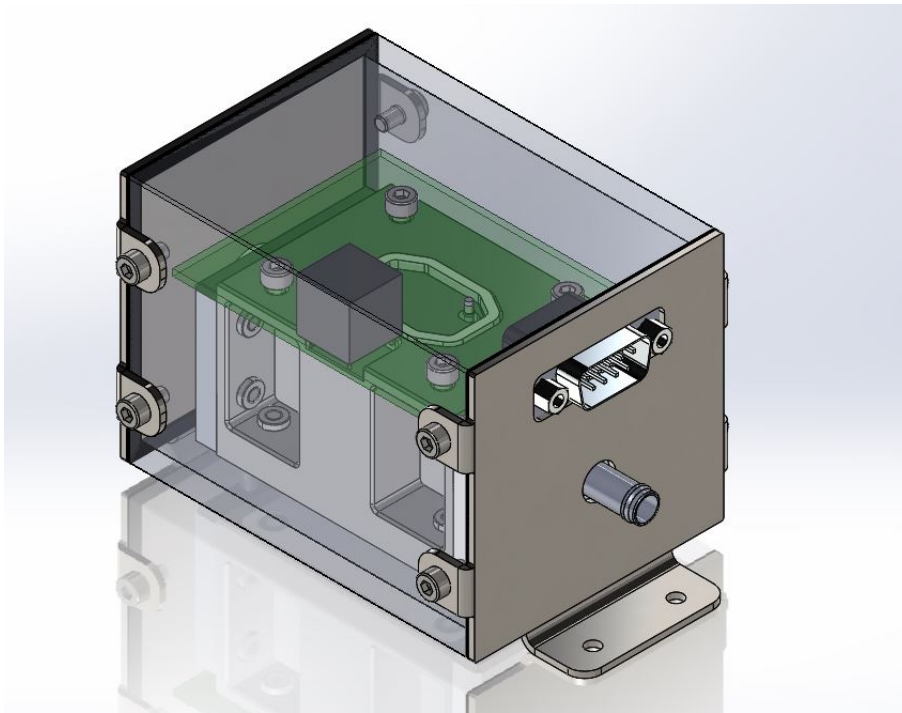


Abbildung 2.21: Elektrostatischer Abscheider

2.5.3.1 Funktionsprinzip

Nachdem das zu messende Aerosol die Aufladeeinheit passiert hat, durchläuft es einen elektrostatischen Abscheider (kurz „ESP“, engl. „electrostatic precipitator“), der im Grunde ein einfacher Plattenkondensator ist, zwischen den Platten wird der Aerosolstrom geführt. Der ESP dient dazu, einen Teil der aufgeladenen Partikel aus

dem Aerosol zu entfernen. Für den MP-Modus (siehe 2.1.2) wird der elektrostatische Abscheider mit einer bestimmten Frequenz moduliert und die Corona-Aufladeeinheit konstant eingeschaltet. Sobald das aufgeladene Aerosol nun den Abscheider passiert, werden aufgrund der dort angelegten Hochspannung einige Partikel so abgelenkt, dass sie auf die Platten des Abscheiders prallen und so nicht weiter bis ins Faraday-Cup-Elektrometer-Modul (kurz „FCEM“) kommen. Durch die Modulation des Abscheiders kommt beim FCEM also einmal eine Aerosol-Wolke mit mehr (ESP aus) und einmal eine Aerosol-Wolke mit weniger (ESP ein) aufgeladenen Partikeln an. Die Modulationsfrequenz des elektrostatischen Abscheiders wird von der Geometrie der Module vorgegeben, die Größenordnung liegt bei ungefähr 1 Hz.

2.5.3.2 Einstellbare Parameter

Es ist möglich, die Spannung zwischen den Kondensatorplatten in einem Bereich von 0 V bis 5000 V zu variieren. Dies ist notwendig, um hinsichtlich der Zähleffizienz die zukünftigen gesetzlichen Anforderungen zu erfüllen. Bei einem höheren Massenfluss, der zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit führen würde, müsste man z.B. die Abscheidespannung erhöhen, um die gleiche Charakteristik zu erhalten.

2.5.4 Faraday-Cup-Elektrometer

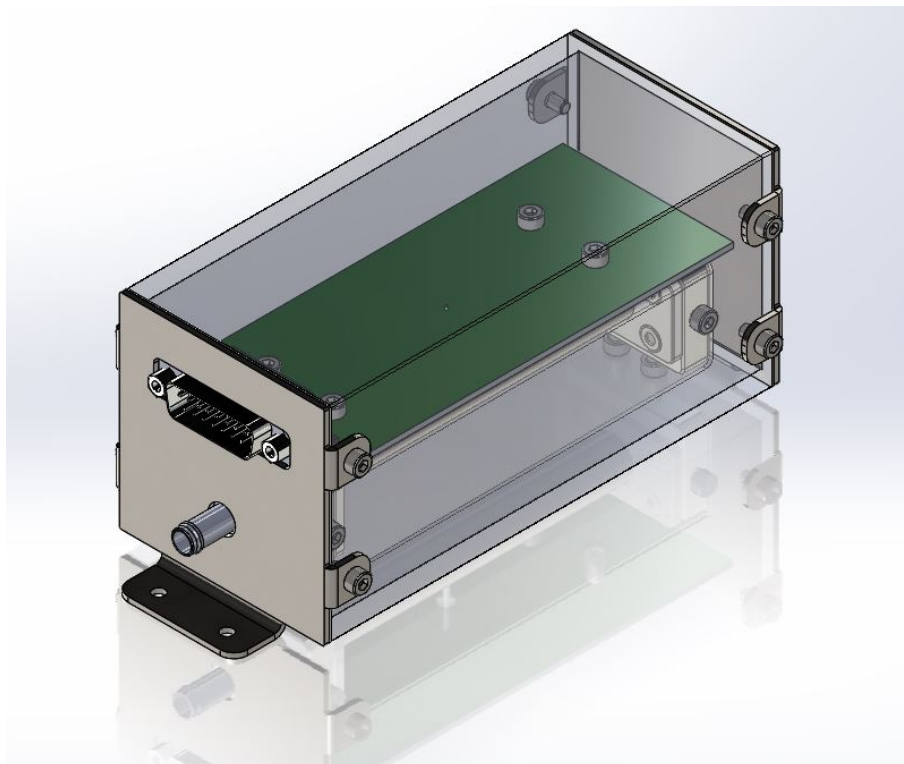


Abbildung 2.22: Faraday-Cup-Elektrometer

2.5.4.1 Funktionsprinzip

Nachdem die aufgeladene Aerosolwolke den elektrostatischen Abscheider passiert hat wird diese in den Faraday-Cup, ein isoliert befestigtes und leitfähiges Metallrohr, das mit einer Verstärkerschaltung verbunden ist, eingeleitet. Durch die Anwesenheit von Ladungen im Inneren des Faraday-Cups werden auf dem Faraday-Cup selbst Spiegelladungen induziert, sodass das Innere des Rohrs feldfrei ist. Diese Spiegelladungen verursachen bei ihrer Bewegung einen Strom im Femtoampere-Bereich. Sobald die geladene Aerosolwoke den Faraday-Cup wieder verlässt fließt wieder ein Strom, der dem Strom, der beim Eintritt der geladenen Partikel in den Faraday-Cup geflossen ist, genau entgegengesetzt ist. Durch die Modulation der Corona-Aufladeeinheit bzw. des elektrostatischen Abscheiders wird so ein Wechselstrom in den bzw. aus dem Faraday-Cup erzeugt, der mithilfe eines Shunt-Widerstandes in ein Spannungssignal umgewandelt, von einer Elektrometerschaltung verstärkt und von einem ADC digitalisiert wird. Wie aus dem so erhaltenen Spannungsverlauf eine Partikelanzahlkonzentration errechnet wird ist in 3.2.2 beschrieben. Details zum Faraday-Cup-Elektrometer finden sich in [6].

2.5.4.2 Einstellbare Parameter

Das Faraday-Cup-Elektrometer selbst hat keine einstellbaren Parameter, es wird lediglich der Ausgleichsstrom gemessen und softwareseitig weiterverarbeitet.

Kapitel 3

Messsignalverarbeitung

Die in Kapitel 2 beschriebene Messhardware nimmt elektrische Signale auf, die in weiterer Folge analysiert werden müssen, um daraus andere physikalische Größen zu bestimmen. In diesem Kapitel ist unter anderem die Durchflussmessung mittels Wirkdruckverfahren beschrieben. Es wurde ein Durchflusssensor, aufgebaut aus mehreren verschiedenen Sensoren und einer 3D-Druck-Blende, realisiert.

3.1 Durchflussmessung

Um das Verdünnungsverhältnis und in weiterer Folge die Partikelanzahlkonzentration genau bestimmen zu können ist es notwendig, den Massenfluss von Haupt- und Verdünnerzweig zu kennen. Daher wird dieser entweder mittels Differenzdruck über eine Blende (siehe [12]) oder mittels Massenflusssensor (z.B. IDT FS2012-1100 NG, Datenblatt: [13]) gemessen.

Um aus der Volumenflussmessung mittels Differenzdruck einen Massenfluss berechnen zu können muss man außerdem den Absolutdruck vor der Blende und die Gas-temperatur messen. Der normierte Volumenfluss entspricht also einem Massenfluss (sofern man das Medium und dadurch die spezifische Gaskonstante R kennt, für trockene Luft ist $R=287.1 \frac{J}{kgK}$), da er sich auf das Volumen des Gases bei einem Druck p_{std} von 1013.3 mbar und einer Temperatur T_{std} von 273.2 K bezieht. Bei definierter Temperatur und definiertem Druck kann die Dichte ρ des Gases anhand der allgemeinen Gasgleichung 3.1 bzw. 3.2 berechnet werden.

$$pV = mRT \tag{3.1}$$

$$\frac{m}{V} = \rho = \frac{p}{RT} \quad (3.2)$$

wobei m gleich der Masse in kg, V gleich dem Volumen in m^3 , p gleich dem Druck in Pa, R gleich der spezifischen Gaskonstante in $\frac{J}{kgK}$ und ρ der Dichte in $\frac{kg}{m^3}$

Die Umrechnung des Volumenflusses auf Normbedingungen wird mittels folgender Formel berechnet, Ergebnis ist der normierte Volumenfluss Q_{std} :

$$Q_{std}[slpm] = Q_{Vol}[lpm] \frac{T_{std}[K]}{p_{std}[mbar]} \frac{p[mbar]}{T[K]} \quad (3.3)$$

wobei $p_{std} = 1013.3 \text{ mbar}$, $T_{std} = 273.2 \text{ K}$, p gleich dem Absolutdruck vor der Blende, T gleich der Temperatur in der Blende (\approx Temperatur des zu messenden Gases).

3.1.1 Durchflussmessung mittels Wirkdruckverfahren

Bei der Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren wird der zu messende Gas- oder Flüssigkeitsfluss durch eine Messblende geleitet, wobei ein Druckunterschied zwischen den zwei Messpunkten (vor und nach der Blende) entsteht. Dieser Druckabfall kann in einen Volumenfluss umgerechnet werden, wie in den Gleichungen 3.4 bis 3.9 beschrieben ist. [12]

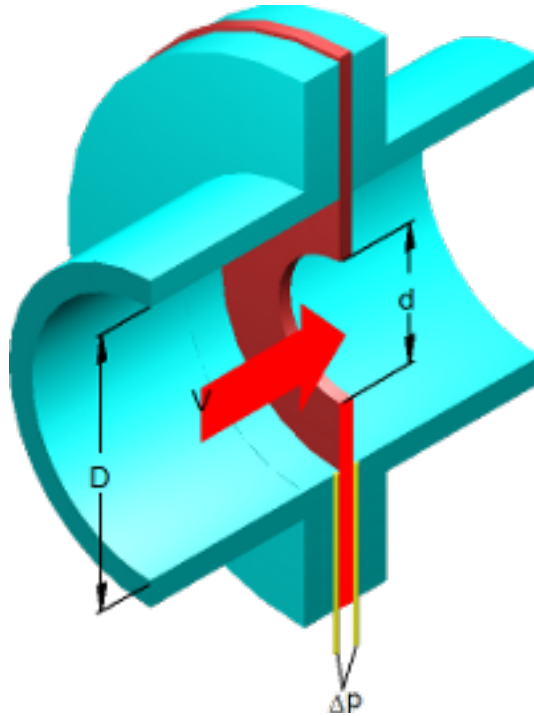


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau der Durchflussmessung im Wirkdruckverfahren

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.4)$$

$$R_e = \frac{wD}{\nu} \quad (3.5)$$

wobei d gleich dem Blendendurchmesser in m, D gleich dem Rohrdurchmesser in m, β gleich dem Durchmesser Verhältnis (einheitenlos), R_e gleich der Reynolds-Zahl, w gleich der Strömungsgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$ im Rohr und ν gleich der kinematischen Viskosität des Mediums in $\frac{m^2}{s}$.

$$C = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.215\beta^8 + 0.000521\beta^{2.5}\left(\frac{10^6\beta}{R_e}\right)^{0.7} + \dots \quad (3.6)$$

$$\dots + (0.0188 + 0.0063\left(\frac{19000\beta}{R_e}\right)^{0.8})\beta^{3.5}\left(\frac{10^6}{R_e}\right)^{0.3}$$

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.7)$$

$$\epsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4)\frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (3.8)$$

wobei Δp gleich dem Druckabfall über die Blende in Pa, κ gleich dem Isentropenexponent des Gases (1.4 für Luft, 1 für Flüssigkeiten) und p_1 gleich dem Absolutdruck vor der Blende in Pa.

$$\dot{V} = \alpha \epsilon \frac{d^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (3.9)$$

wobei \dot{V} gleich dem Volumenfluss in $\frac{m^3}{s}$ und ρ gleich der Dichte des Mediums in $\frac{kg}{m^3}$

Die oben genannten Formeln gelten allerdings nur für gewisse Grenzwerte:

limitierte Größe	Grenzwerte	
Rohrdurchmesser	D	50.....1000 mm
Blendendurchmesser	d	≥ 12.5 mm mm
Durchmesserverhältnis	β	0.1 0.75

Tabelle 3.1: Grenzwerte der Berechnungsformel

Diese Grenzwerte werden bei der derzeit verwendeten 3D-Druck-Blende deutlich unterschritten, der Innendurchmesser d beträgt ca. 1.1 mm, der Rohrdurchmesser ca. 5 mm. Experimente haben allerdings gezeigt, dass die Messblende jedoch trotzdem funktioniert. Es wurde eine Messunsicherheitsbetrachtung mithilfe des Programms „GUM Workbench Edu“ angefertigt, siehe Abbildung 3.3. Dafür wurden die Gleichungen 3.4 bis 3.9 herangezogen.

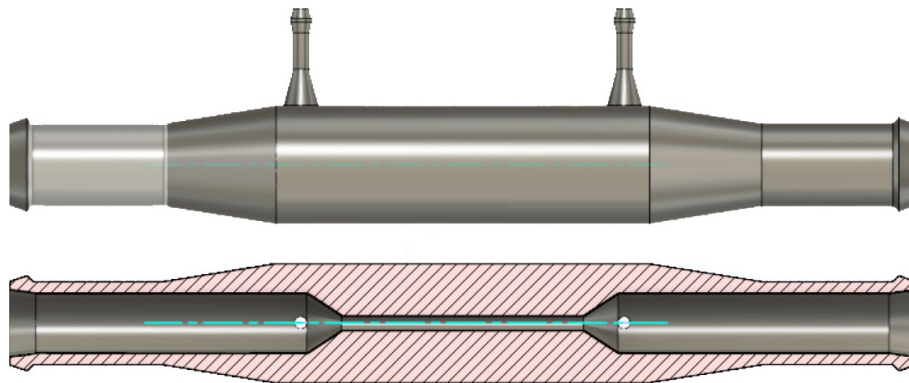


Abbildung 3.2: Derzeitige Messblende (SLA 3D-Druck-Teil)

Größe	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
β	0.275000	$150 \cdot 10^{-6}$				
d	$1.100000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-9}$	Rechteck	20000	0.012	0.7 %
D	$4.000000 \cdot 10^{-3}$	$577 \cdot 10^{-9}$	Rechteck	-650	$-370 \cdot 10^{-6}$	0.0 %
Re	$160.00 \cdot 10^3$	7700				
w	6.000	0.289	Rechteck	-0.41	-0.12	72.9 %
v	$150.0 \cdot 10^{-9}$					
C	2.3312	0.0250				
α	2.3379	0.0251				
p	1.1596	0.0135				
pI	97600	577	Rechteck	$-55 \cdot 10^{-6}$	-0.032	5.3 %
R	287.10	2.89	Rechteck	0.019	0.055	16.0 %
T	293.1500	0.0577	Rechteck	0.019	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.0 %
ε	0.987939	$508 \cdot 10^{-6}$				
ΔP	4000.0	23.1	Rechteck	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.031	5.0 %
κ	1.4000	0.0577	Rechteck	0.096	$5.5 \cdot 10^{-3}$	0.2 %
π	3.1415926535898					
V	10.938	0.138				

Ergebnis:	Erw. Messunsicherheit:	Erweiterungsfaktor:	Überdeckung:
Wert: 10.94	$\pm 2.5 \%$ (relativ)	2.00	95% (Normal)

Abbildung 3.3: Messunsicherheitsbetrachtung

Die Messunsicherheitsbetrachtung zeigt, dass die Strömungsgeschwindigkeit und die Reynolds-Zahl den größten Beitrag zur gesamten Messunsicherheit leisten. Die Strömungsgeschwindigkeit wird aufgrund der Pulsationen der Membranpumpe ebenfalls pulsationsbehaftet sein. Dieser Effekt kann durch Puffervolumen vor der Pumpe (upstream) abgeschwächt werden.

Da die verwendete Messblende außerhalb der Grenzwerte aus Tabelle 3.1 liegt wurde eine näherungsweise Berechnung des Durchflusses gewählt. Die Berechnung des Durchflusses erfolgt näherungsweise nach der Formel

$$Q = c\sqrt{p_{diff}} + kp_{abs} - d \quad (3.10)$$

Wobei Q gleich dem Durchfluss in slpm, p_{diff} gleich dem Differenzdruck über die Messblende in mbar, p_{abs} gleich dem Absolutdruck vor der Messblende in mbar. Die Koeffizienten c, k und d mittels Curve Fitting Tool in Matlab ermittelt wurden. Die Werte für die Koeffizienten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Koeffizienten	Werte
c	0.6522
k	0.001902
d	1.64

Tabelle 3.2: Koeffizienten für die Durchflussmessung

Anhand der ermittelten Koeffizienten wurde in Matlab ein 3D-Plot erstellt, auf dem die Messpunkte eingezeichnet sind. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden zusätzliche Ansichten des 3D-Plots beigefügt.

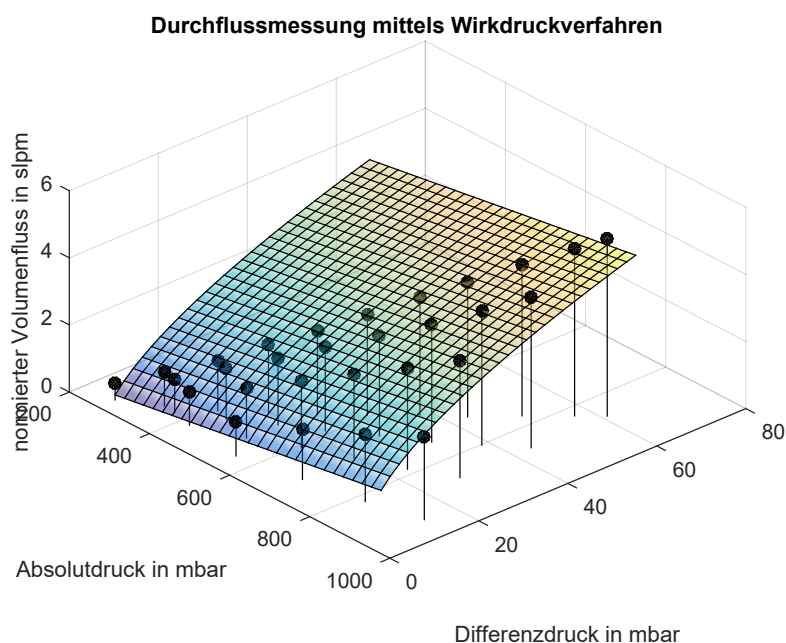


Abbildung 3.4: Durchfluss in Abhängigkeit von Absolut- und Differenzdruck

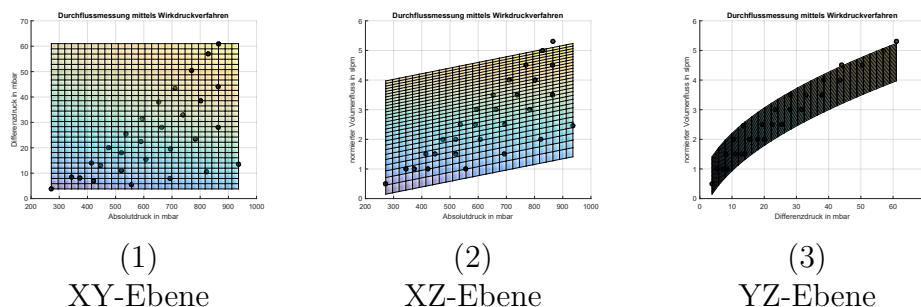


Abbildung 3.5: Durchfluss in Abhängigkeit von Absolut- und Differenzdruck, 2D-Ansichten

Die Gegenüberstellung der Durchflussmessung mittels Wirkdruckverfahren und der

Durchflussmessung mittels Vögtlin red-y compact series findet sich in folgender Abbildung:

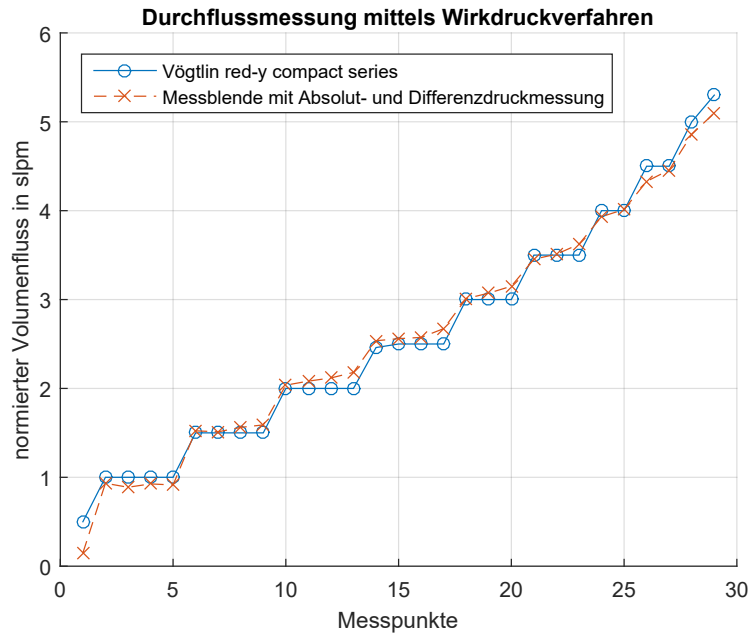


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Durchflussmessungen

Eine Betrachtung der relativen Messunsicherheit findet sich in folgender Abbildung:

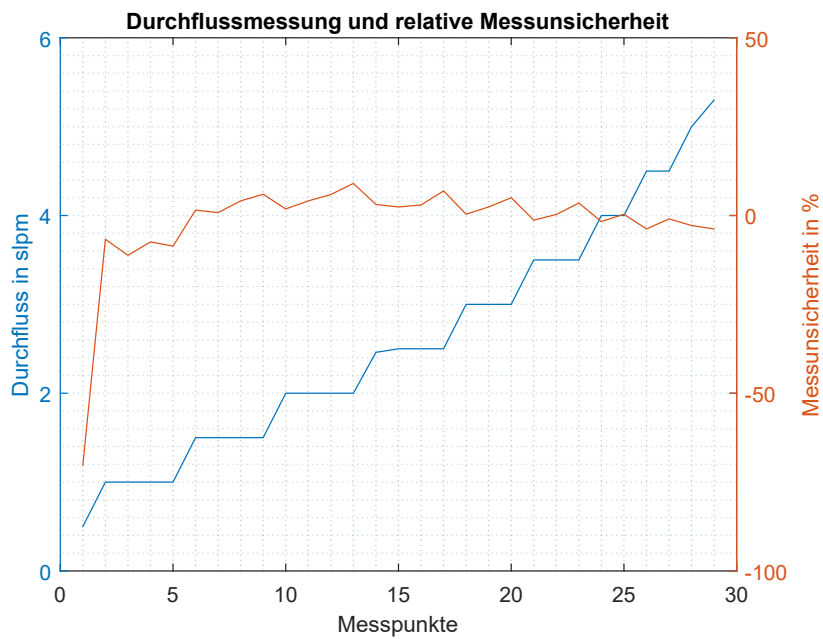


Abbildung 3.7: Relative Messunsicherheit des Wirkdruckverfahrens

Diese Messungen wurden bei einer Temperatur von 26.4 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 39 % durchgeführt. Um die Temperaturabhängigkeit des Messwertes weiter zu untersuchen wurden Messungen bei 10 °C, 26 °C, 40 °C und 60 °C in einem Klimaschrank durchgeführt. Die Berechnung des Durchflusses erfolgt anhand der folgenden Formel aus [14], Seite 145. Die geometrischen Parameter der Blende wurden in der Konstante c zusammengefasst.

$$Q = c \sqrt{p_{diff} \rho_{Luft} \frac{p_{abs} - p_{diff}}{p_{abs}}} \quad (3.11)$$

Wobei Q gleich dem Durchfluss in slpm, p_{diff} gleich dem Differenzdruck über die Messblende in mbar, p_{abs} gleich dem Absolutdruck vor der Messblende in mbar und ρ_{Luft} gleich der Dichte der Luft in $\frac{kg}{m^3}$ bei gegebenem Absolutdruck und gegebener Temperatur.

Die Konstante c wurde für weitere Berechnungen mit $c = 1$ angenommen, da die Blendengeometrie aufgrund von Fertigungstoleranzen beim 3D-Druck nicht exakt ist und das Ergebnis im Nachgang ohnehin mit einem Polynom 4. Ordnung interpoliert wird. Die Interpolation wurde in Matlab wie folgt durchgeführt.

$$Q_{corr} = Q^4 p_1 + Q^3 p_2 + Q^2 p_3 + Q p_4 + p_5 \quad (3.12)$$

Die Parameter p_1 bis p_5 sind in Tabelle 3.3 aufgelistet

Parameter	Wert
p_1	0.0003
p_2	-0.0072
p_3	0.0600
p_4	0.5298
p_5	-0.1421

Tabelle 3.3: Parameter des Interpolationspolynomes

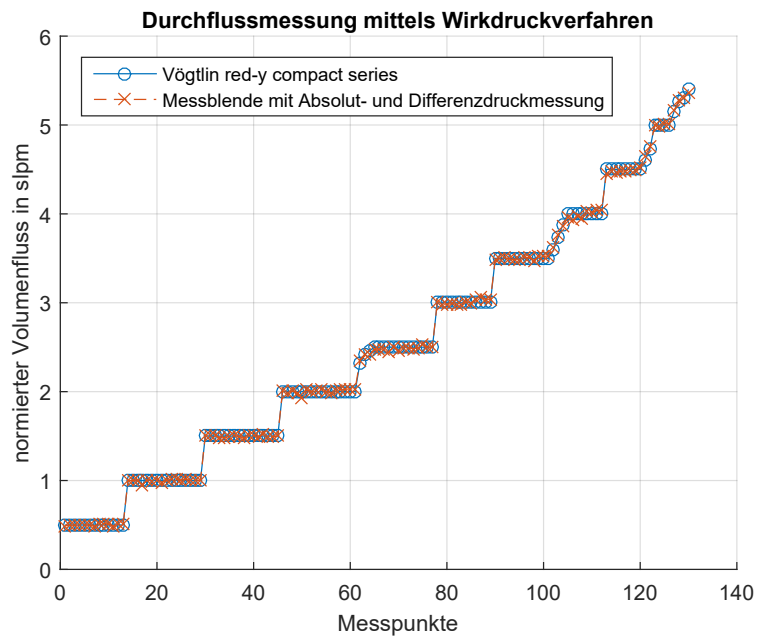


Abbildung 3.8: Durchflussmessung im Wirkdruckverfahren mit Temperaturkompensation

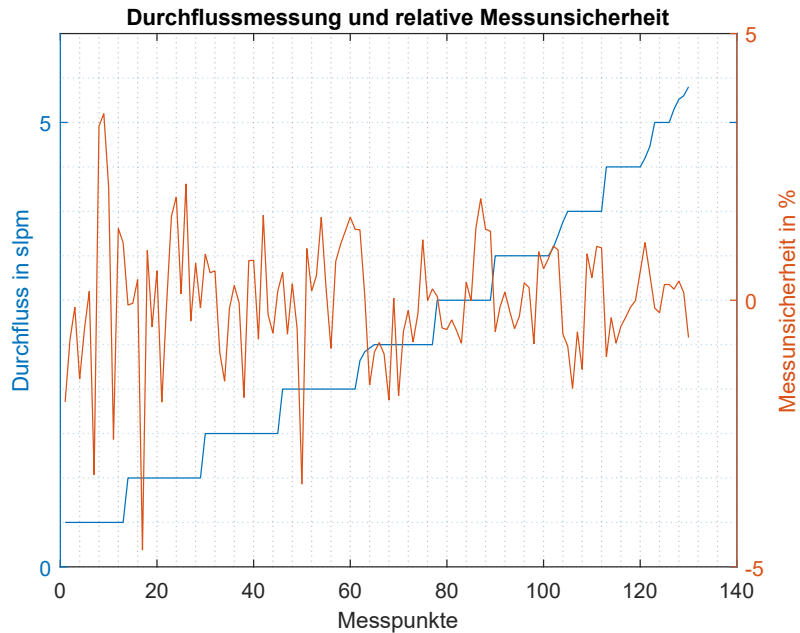


Abbildung 3.9: Relative Messunsicherheit des Wirkdruckverfahrens mit Temperaturkompensation

In Abbildung 3.9 ist zu erkennen, dass die maximale relative Messunsicherheit bei ca. 4.7 % liegt.

3.1.2 Kalorimetrische Durchflussmessung

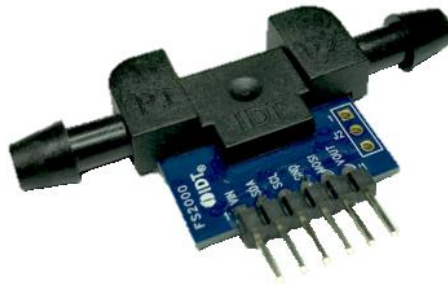


Abbildung 3.10: Massenflusssensor IDT FS2012-1100NG

Die Vorteile des Massenflusssensors gegenüber der Durchflussmessung im Wirkdruckverfahren bestehen darin, dass zur Messung des Massenflusses nur je ein Sensor für den Haupt- und einer für den Verdünnerszweig benötigt werden, was zu einer kompakteren Bauform des Durchflusssensors führt und keinen zusätzlichen konstruktiven Aufwand erfordert. Der Massenflusssensor von IDT wird kalibriert ausgeliefert und ist für einen Messbereich zwischen 1 und 10 slpm geeignet, laut Datenblatt [13] liegt die Messunsicherheit maximal bei $\pm 5\%$ des Messwertes, typischerweise allerdings bei $\pm 2\%$. Bei einem Verdünnungsfluss von 4 slpm und einem Hauptfluss von 5 slpm würde das zu einer Messunsicherheit von maximal ± 0.2 slpm bzw. ± 0.25 slpm führen, sodass im schlimmsten Fall statt 1 slpm nur 0.55 slpm bzw. 1.45 slpm Abgas angesaugt werden. Dies würde zu einer enormen Messunsicherheit beim Partikelmesswert führen. Daher wird die Kalibration der Massenflüsse vonnöten sein.

Der Vorteil des Pneumatikkonzeptes mit Rezirkulation (siehe 2.7) liegt darin, dass die Massenflusssensoren an anderer Stelle verbaut werden könnten. So wäre es z.B. denkbar, den „Excess Air“-Massenfluss mit einem IDT FS2012-1020NG (Messbereich 0.2 bis 2 slpm) zu überwachen und den Massenfluss in den Verdünnerszweig mit einem IDT FS2012-1100NG. Ein weiterer IDT FS2012-1020NG kann in die Messkette eingebaut werden, um den entsprechenden Messfluss zu überwachen (siehe Abbildung 3.11). Bei einem Verdünnungsverhältnis von 1:4 würde sich ein Verdünnersfluss von 4 slpm und einem „Excess Air“-Fluss von 1 slpm ergeben, die Messunsicherheit läge in diesem Fall bei ± 0.2 slpm für den Verdünnersfluss und ± 0.05 slpm für den „Excess Air“-Fluss, was zu einem Verdünnungsverhältnis zwischen 1:3.61 und 1:4.42 führt und somit ebenfalls sehr stark zur Messunsicherheit beiträgt.

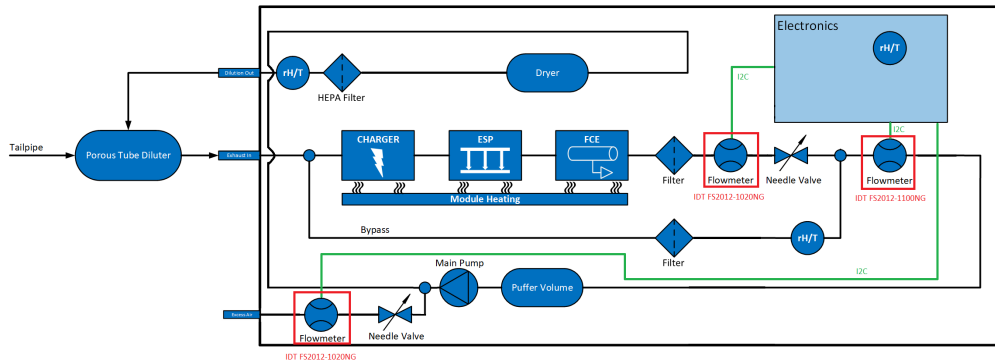


Abbildung 3.11: Pneumatikschema im Rezirkulationsprinzip, mit IDT-Massenflusssensoren

Nicht betrachtet wurde hierbei, dass die IDT-Massenflusssensoren mit Luft kalibriert sind. Je nach Dichte des Gases wird die Wärme vom Heizelement im Inneren des Sensors besser oder schlechter an die benachbarten Thermocouples weitergeleitet (siehe Abbildung 3.12). Dies bedeutet, dass sich mit einer anderen chemischen Zusammensetzung des Messgases auch dessen Dichte und in weiterer Folge auch der gemessene Massenfluss ändern wird, wodurch die gesamte Messunsicherheit zusätzlich erhöht wird.

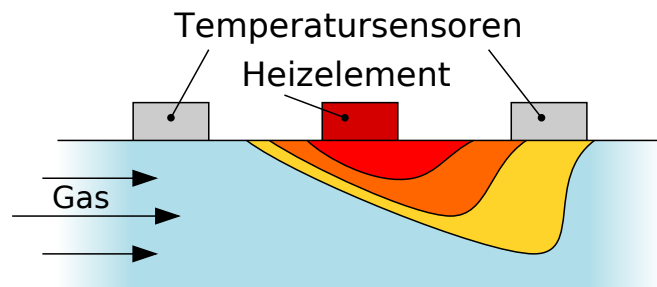


Abbildung 3.12: Aufbau des kalorimetrischen Durchflusssensors

Die Messunsicherheit des IDT-Massenflusssensors wurde im Zuge der Messungen an der 3D-Druck-Blende ermittelt, als Referenzmessgerät diente ein Vögtlin red-y compact series. Die Gegenüberstellung der Messwerte des IDT-Sensors und des Vögtlin-Messgerätes bei 26 °C findet sich in Abbildung 3.13, die Betrachtung der relativen Messunsicherheit des IDT-Sensors bei 26 °C in Abbildung 3.14.

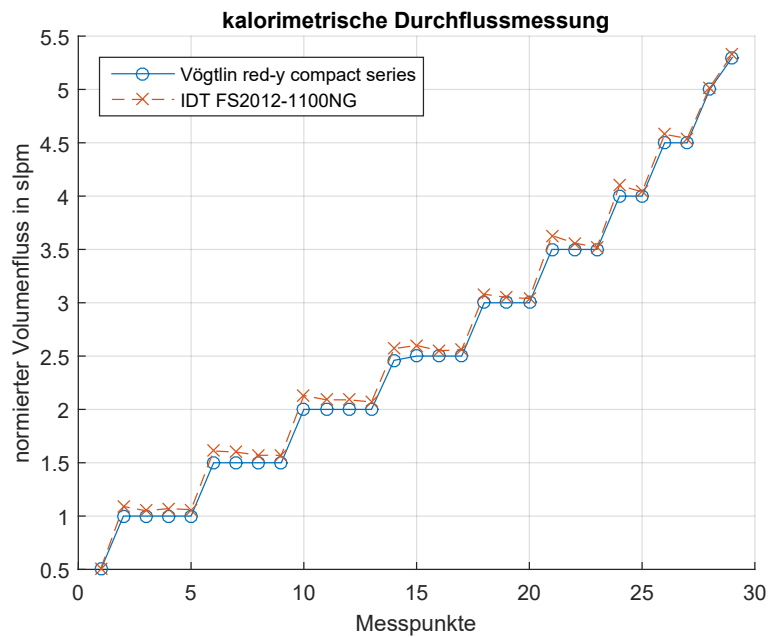


Abbildung 3.13: Gegenüberstellung der Durchflussmessungen

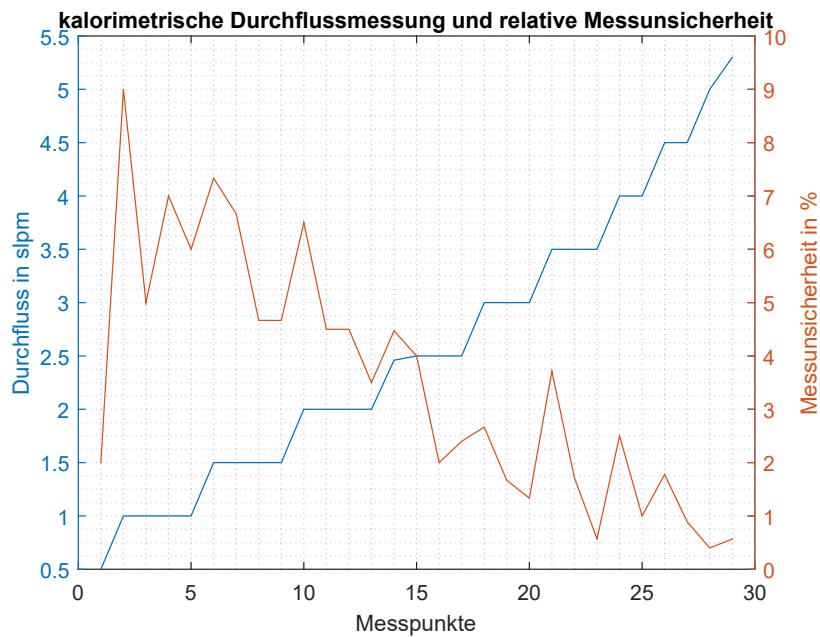


Abbildung 3.14: Relative Messunsicherheit des Massensensors

Es ist ersichtlich, dass die maximale Messunsicherheit von $\pm 5\%$ des Messwertes in diesem Aufbau nicht eingehalten werden kann. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Pulsationen, die durch die Membranpumpe entstehen, das Messergebnis

zusätzlich verfälschen. Der Sensor wurde für stationäre Flüsse konzipiert, der pulsierende Fluss verändert die Wärmeübertragungscharakteristik vom Heizelement zu den Thermoelementen, was wiederum eine erhöhte Messunsicherheit bedeutet.

In weiterer Folge wurden die Messungen bei 10 °C, 40 °C und 60 °C wiederholt, die Ergebnisse der Gegenüberstellung des IDT-Sensors und des Vögtlin red-y compact series und die Betrachtung der relativen Messunsicherheit des IDT-Sensors finden sich in Abbildung 3.15 und 3.16

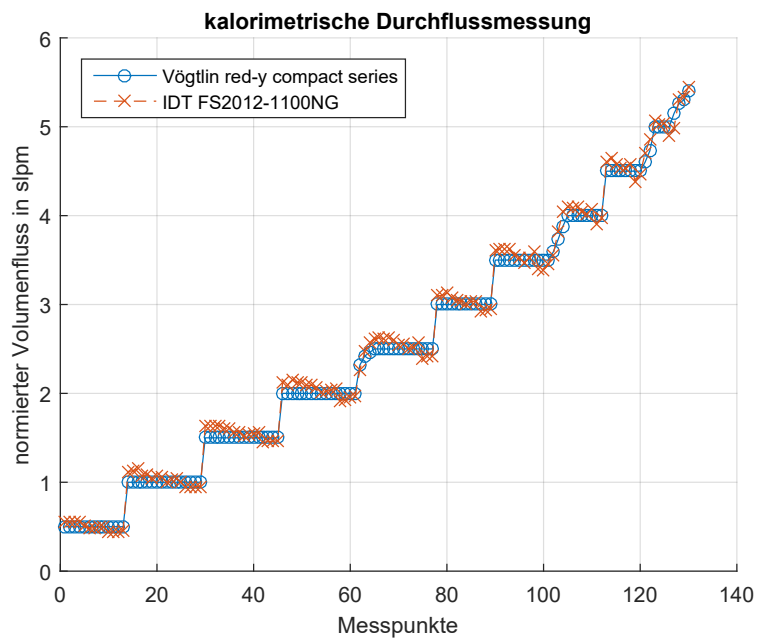


Abbildung 3.15: Gegenüberstellung der Durchflussmessungen

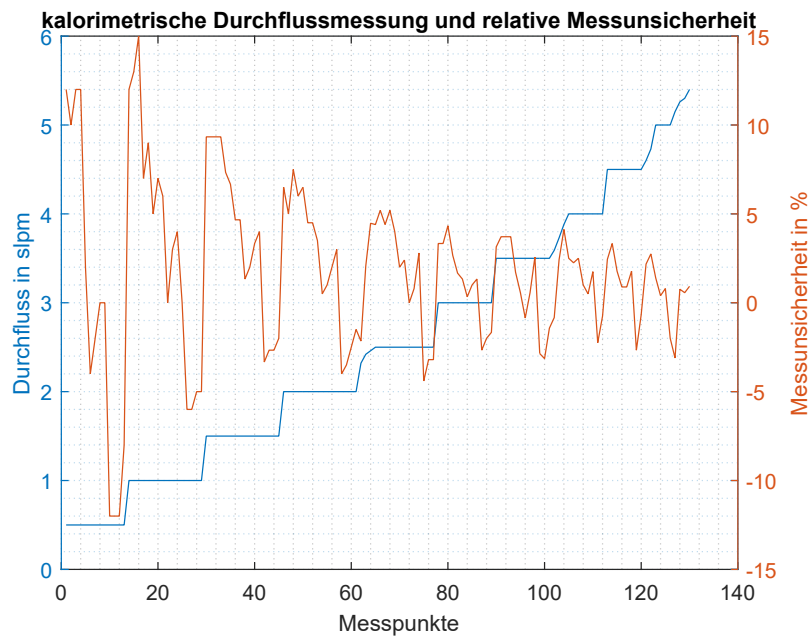


Abbildung 3.16: Relative Messunsicherheit des Massenflusssensors

Es ist zu erkennen, dass die Messunsicherheit temperaturabhängig ist. Zur anschaulicheren Darstellung wurde eine Betrachtung der relativen Messunsicherheit in Abhängigkeit der Temperatur angestellt, siehe Abbildung 3.17. Die rote Linie ist eine Ausgleichsgerade, welche die Tendenz des Messfehlers angibt, die Messpunkte sind in blau dargestellt.

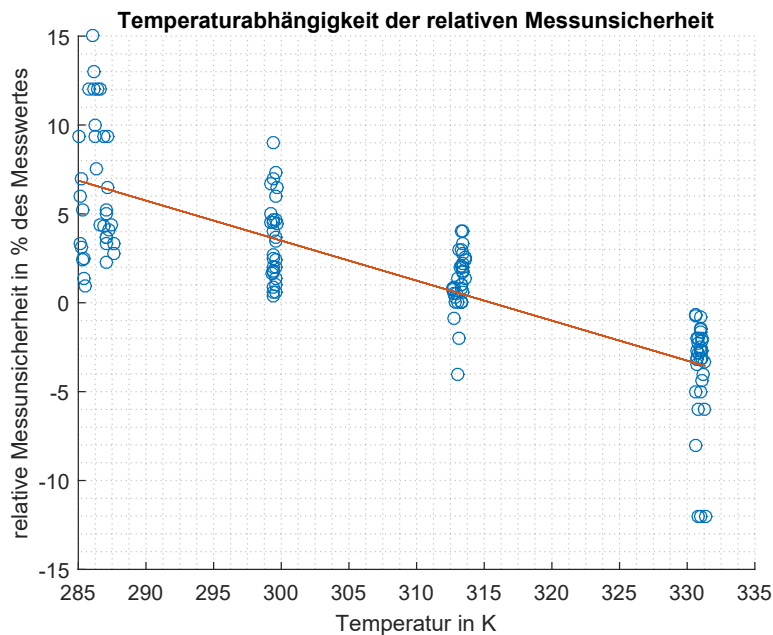


Abbildung 3.17: Messunsicherheit des IDT-Sensors in Abhängigkeit der Temperatur

Man sieht, dass bei niedrigerer Temperatur der Sensor zum Überschätzen des Messwertes neigt, bei steigender Temperatur zum Unterschätzen. Dies ist ebenfalls auf das Sensorprinzip zurückzuführen, da sich auch hier die Wärmeübertragungs-Charakteristik ändert. Um diese Temperaturabhängigkeit zu kompensieren müsste man die Temperatur des Sensors zusätzlich überwachen.

3.2 Kalibrierung des Messgerätes

Viele Komponenten im Messgerät erfordern eine Kalibrierung, um die korrekte Funktion des Gerätes sicherzustellen. So ist es beispielsweise nötig, einige Massenflüsse mittels Mass Flow Meter zu messen und die entsprechenden Nadelventile zu justieren.

Ebenso ist es für die Messung der Partikelanzahlkonzentration nötig, die Amplitude der FFT korrekt zu gewichten, um daraus eine Partikelanzahlkonzentration berechnen zu können.

3.2.1 Pneumatik und dazugehörige Sensorik

Die derzeitige Kalibrierung des Messgerätes ist vergleichsweise einfach, kann so allerdings aufgrund des hohen Zeitaufwands nicht für ein Serienprodukt herangezogen werden.

Mithilfe eines Mass Flow Meters (in diesem Fall ein Red-y compact series des Herstellers Vögtlin) werden alle relevanten Massenflüsse eingestellt. Da die Durchflussregelung derzeit noch in Entwicklung ist, wird die PWM-Einstellung der Haupt- und Verdünnerpumpe manuell vorgenommen und so eingestellt, dass die geforderten Massenflüsse erreicht werden. Um den korrekten Massenfluss durch die Messkette (1.5 slpm bzw. 1 slpm) einzustellen muss das Nadelventil (siehe Abbildung 2.6) entsprechend justiert werden.

In Zukunft ist es so angedacht, dass eine Blende für die Durchflussmessung mittels Differenzdruck (siehe 3.1.1) verwendet wird. Diese muss gegebenenfalls bei jedem Gerät separat vermessen werden, da aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht bei allen hergestellten Flussblenden mit demselben Druckabfall zu rechnen ist.

Außerdem ist es notwendig, die Strecke auf einen bestimmten Massenfluss hin zu regeln, um von Druck und Temperatur weitestgehend unabhängig zu sein. Der gemessene Volumenfluss muss daher unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur nach Formel 3.3 in einen Massenfluss umgerechnet werden. Die anschließende Justierung wird mittels Vorgabe eines Sollwertes für die Massenflussregelung einfacher gestaltet, was einen weiteren Schritt in Richtung Massenproduktionstauglichkeit darstellt.

Kritisch hierbei ist, wie bereits erwähnt, die Messunsicherheit der Massenflusssensoren bzw. auch der Massenflussmessung. Sollte also der Partikelmesswert nach Formel 3.14 berechnet werden, wirkt sich die Messunsicherheit bei der Massenflussmessung auch auf den Partikelmesswert aus. Daher wird es bei diesem Pneumatikkonzept, sofern die Messunsicherheit der Durchflussmessung zu groß ist, notwendig sein, das Verdünnungsverhältnis in die Kalibrierprozedur miteinzubeziehen. Der Korrekturfaktor für die FFT des Faraday-Cup-Spannungssignals muss entsprechend angepasst werden, das aus den Massenflüssen berechnete Verdünnungsverhältnis wird bei der Berechnung des Partikelmesswertes nicht berücksichtigt.

3.2.2 Berechnung der Partikelanzahl

Anhand des Sensorsignals (siehe 2.1.4) kann eine Partikelanzahlkonzentration ermittelt werden, dafür sind allerdings noch einige Schritte notwendig. Zuerst wird die FFT (engl. „fast Fourier transform“, schneller Berechnungsalgorithmus für die Fourier-Transformation) des Sensorsignals berechnet. Diese zeigt, dass das Sensorsignal aus einer Grundwelle (idealerweise die Modulationsfrequenz des elektrostati-

schen Abscheiders oder der Corona-Aufladeeinheit, je nach Prinzip - siehe 2.1) und aus Oberwellen besteht, die für die Berechnung der Partikelanzahlkonzentration allerdings keine Rolle spielen. Der Vorteil der Berechnung der FFT des Sensorsignals gegenüber einer Messung des Spitze-Spitze-Wertes des Ausgleichsstroms besteht darin, dass das Rauschen des Elektrometerverstärker-Signals den Messwert so weniger verfälscht.

3.2.3 Partikelmessensorik und Kalibration

Die Kalibration der Messsensorik selbst wird durch Ermittlung eines Verstärkungsfaktors und eines Offsets vollzogen. Dabei wird ein Aerosol mit definierter Größenverteilung parallel in einen Kondensationspartikelzähler (CPC) und den Diffusion Charger eingespeist (Siehe Abbildung 4.16 für polydisperses Aerosol, 4.10 für monodisperses Aerosol). Man misst hierbei mehrere verschiedene Partikelanzahlkonzentrationen mit einem monodispersen Aerosol (derzeit 55 nm), um auf Basis von mindestens zwei Messpunkten sowohl den Verstärkungsfaktor, als auch den Offset (bei Messung von Umgebungsluft mit einem HEPA-Filter vor den Messgeräten) ermitteln zu können. Die Partikelanzahlkonzentration wird im PN Counter folgendermaßen berechnet:

$$PN = \text{Gain}_{FFT} FFT\{u_{FCEM}(t)\} |_{f=f_{mod}} + \text{Offset} \quad (3.13)$$

Der Term $FFT\{u_{FCEM}(t)\} |_{f=f_{mod}}$ in Formel 3.13 bezeichnet die Amplitude der Grundschiwingung (Frequenz gleich der Modulationsfrequenz der Corona-Aufladeeinheit bzw. des elektrostatischen Abscheiders) des vom ADC im Faraday-Cup-Modul aufgenommenen Spannungsverlaufs.

Sollte das Verdünnungsverhältnis in den Partikelmesswert ebenfalls mathematisch berücksichtigt werden, so ändert sich Formel 3.13 zu:

$$PN = (\text{Gain}_{FFT} FFT\{u_{FCEM}(t)\} |_{f=f_{mod}} + \text{Offset}) \frac{Q_{Dilution}}{Q_{in}} \quad (3.14)$$

Hierbei ist zu erwähnen, dass durch die Berücksichtigung des Verdünnungsverhältnisses bei der Berechnung der Partikelanzahlkonzentration die Messunsicherheit der Durchflussmessung zusätzlich in die Messunsicherheit der Partikelanzahlkonzentration einfließt. Es wäre daher von Vorteil, das Verdünnungsverhältnis bei der Kalibrierprozedur zu bestimmen.

Eine detailliertere Betrachtung zur Berechnung des Partikelmesswertes findet sich in [6].

Kapitel 4

Testmessungen

Um die Gültigkeit der Messergebnisse zu verifizieren ist es notwendig, den Vergleich zwischen dem PN Counter und einem Referenzgerät, in diesem Fall ein CPC 3775 der Firma TSI [15], anzustellen. In den folgenden Versuchsaufbauten werden sowohl Linearität als auch Zähleffizienz des PN Counters untersucht. Die Daten des CPC3775 sind Abbildung 4.1 zu entnehmen, die Zähleffizienzkurve findet sich in Abbildung 4.2.

Particle size range	
Min. detectable particle (D_{50}) .	4.0 nm, verified with DMA-classified sucrose particles
Max. detectable particle	>3 μm
Particle concentration range	
Single particle counting.....	0 to 50,000 particles/cm ³ with continuous live-time coincidence correction
Photometric	50,000 to 10,000,000 particles/cm ³
Particle concentration accuracy	
	$\pm 10\%$ at $\leq 50,000$ particles/cm ³
	$\pm 20\%$ at $< 10,000,000$ particles/cm ³
Response time	
High-flow mode	$\cong 4$ sec to 95% in response to concentration step change
Low-flow mode	$\cong 5$ sec to 95% in response to concentration step change
Flow rate	
Aerosol flow	300 ± 15 cm ³ /min (0.3 ± 0.015 L/min)
Inlet, high-flow	1500 ± 50 cm ³ /min (1.5 ± 0.05 L/min)
Inlet, low-flow	300 ± 15 cm ³ /min (0.3 ± 0.015 L/min)
Flow source.....	Internal high-vacuum diaphragm pump with brushless DC motor (15,000 hours rated lifetime); option to use external vacuum source (requires change to internal plumbing)
Flow control	Volumetric flow control of aerosol flow by critical orifice, differential pressure across orifice is monitored
Operating temperatures	
Saturator	39°C ± 0.2 °C
Condenser	14°C ± 0.2 °C
Optics	40°C ± 0.2 °C
False background counts	<0.01 particle/cm ³ , based on 12-hr average; No false counts incurred during butanol fill
Aerosol medium	Recommended for use with air; safe for use with inert gases such as nitrogen, argon, and helium (performance specifications are for air)

Abbildung 4.1: Daten des CPC3775 von TSI, Auszug aus[15]

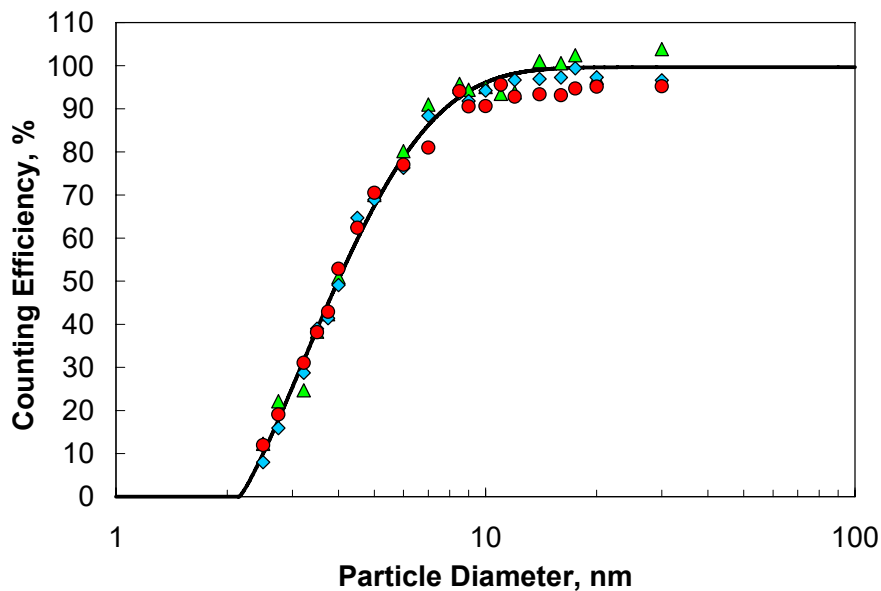


Abbildung 4.2: Zähleffizienzkurve des CPC3775 von TSI[15]

Ziel der Messungen ist es, das Messgerät so zu justieren, dass eine dem Referenzgerät ähnliche Charakteristik erreicht wird. Dies erreicht man durch entsprechende Einstellung des Massenflusses durch die Messkette und durch die Abscheidespannung im elektrostatischen Abscheider.

Beim Diffusion Charger besteht, bedingt durch das Sensorprinzip, die Problematik, dass die Zähleffizienz mit größer werdendem Partikeldurchmesser ebenfalls ansteigt, da sich auf größeren Partikeln mehr Ladungen anheften können. Um dem entgegenzuwirken wurde das ursprüngliche Messprinzip (siehe 2.1.1) weiterentwickelt und um einen elektrostatischen Abscheider erweitert (siehe 2.1.2). Für genauere Informationen über die Ionenbeladung von Aerosolpartikeln siehe [16, 17].

4.1 Größenverteilungen

Aus dem Grund, dass viele Aerosole aus einer großen Bandbreite von Partikeldurchmessern bestehen ist die Normalverteilung kein ideales Mittel zur mathematischen Beschreibung von Größenverteilungen bei Aerosolen. Aus diesem Grund wurde die logarithmische Normalverteilung empirisch ausgewählt, da mit ihr die meisten Aerosole mathematisch gut beschrieben werden können. Bei vielen Aerosol-Größenverteilungen zeigt sich eine positive Schiefe in der Verteilung (siehe z.B. Abbildung 4.3), sodass die Verwendung der logarithmischen Normalverteilung geeignet erscheint. Ein weiteres Merkmal der logarithmischen Normalverteilung ist das Fehlen von negativen Werten auf der Skala. Dies erscheint in Hinblick auf Aerosol-Größenverteilungen ebenfalls vorteilhaft, da es keine negativen Partikeldurchmesser geben kann. Eine detailliertere Betrachtung bezüglich Größenverteilungen bei Aerosolen und den statistischen Hintergründen findet sich in [18].

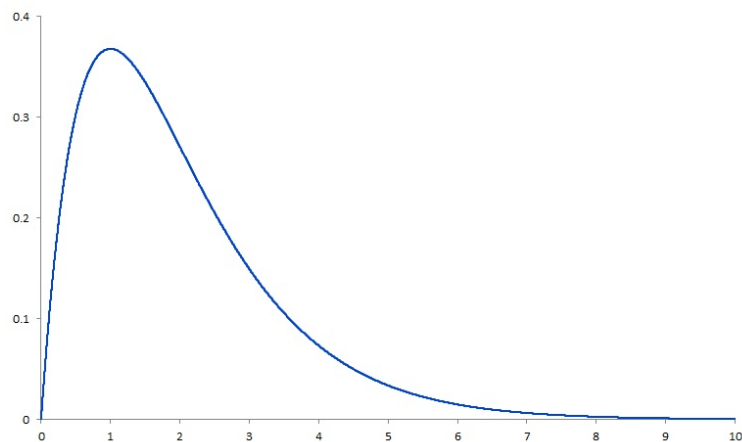


Abbildung 4.3: positiv schiefe Normalverteilung

4.1.1 miniCAST-Aerosol

Der miniCAST (Model 6204 Type B) der Firma Jing Ltd. generiert ein Ruß-Aerosol, indem eine Propan-Flamme mittels Quenchgas teilweise erstickt wird, was zu einer unvollständigen Verbrennung führt (siehe Abbildung 4.4). Je nach Einstellung der Gasflüsse (siehe Tabelle 4.1) ergibt sich die Größenverteilung der Rußpartikel. Die Abbildungen 4.5 bis 4.7 zeigen die normierten Größenverteilungen des Aerosols, gemessen mit einem TSI DMA 3082[19] und einem TSI CPC 3775 [15] (zur Normierung der Größenverteilungen siehe [20]). Diese verschiedenen Aerosole sind notwendig, um ausreichend hohe Partikelanzahlkonzentrationen bei den entsprechenden mittleren Partikeldurchmessern für die Effizienz- und Linearitätsmessungen zu generieren.

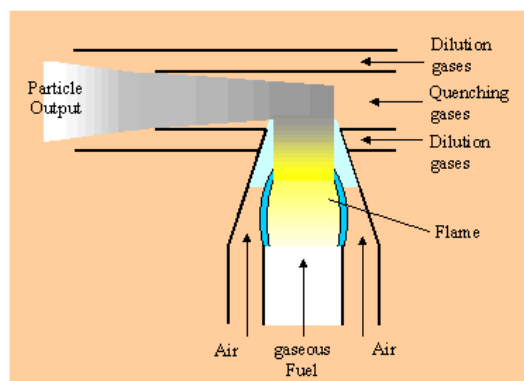


Abbildung 4.4: Funktionsprinzip des miniCAST[1]

Sample #	Propan ml/min	N_2 l/min	Oxidationsluft l/min	Verdünnungsluft l/min	N_2 -Quenchgas l/min
1	25	0	0.45	5	2
2	40	0	0.38	5	2
3	30	0	0.4	5	2

Tabelle 4.1: Einstellungen am miniCAST

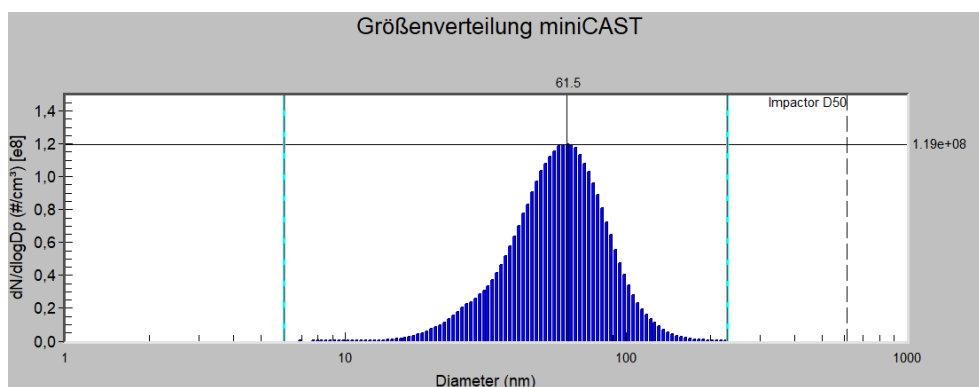


Abbildung 4.5: Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #1

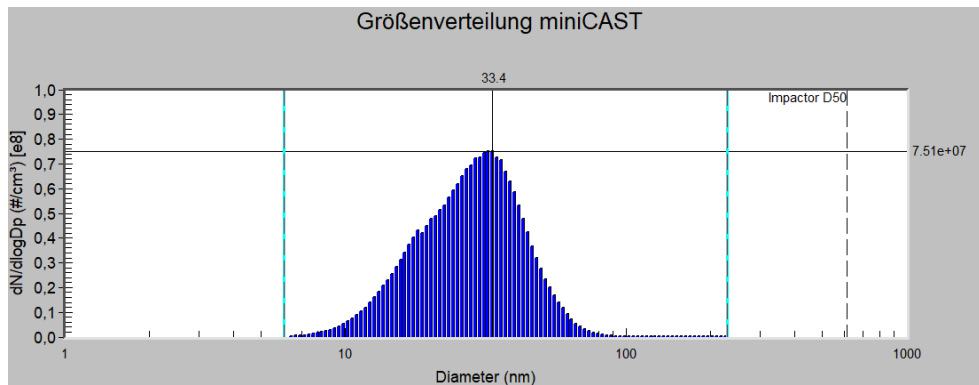


Abbildung 4.6: Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #2

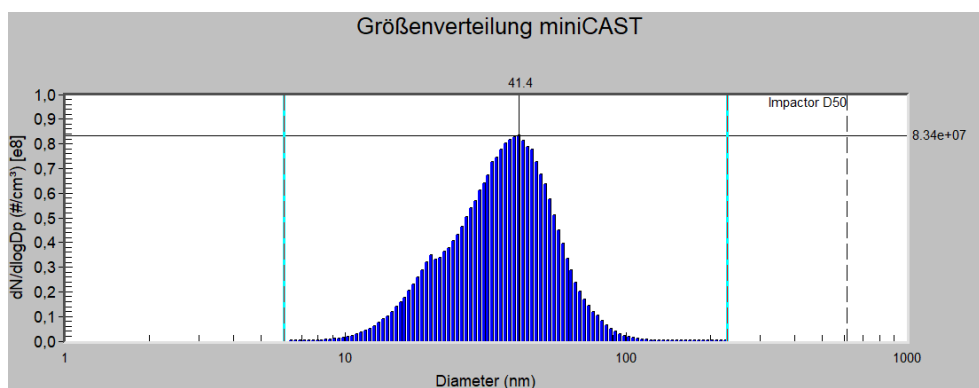


Abbildung 4.7: Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #3

In Abbildung 4.5 bis 4.7 ist zu erkennen, dass es sich hier um eine logarithmische Normalverteilung handelt. Im Gegensatz zur Gauß'schen Normalverteilung ist die x-Achse logarithmisch skaliert, sodass die Kurve lediglich gleich geformt erscheint.

4.1.2 NaCl-Aerosol

Da ein NaCl-Aerosol deutlich leichter zu erzeugen ist als ein Ruß-Aerosol bietet es sich an, anstatt des miniCAST einen Atomizer, wie z.B. den TOPAS ATM220, zu verwenden. Dabei wird mittels Druckluft aus einer Salzlösung ein Aerosol generiert, welches im Anschluss einen Silicagel-Trockner passiert. Je nach Konzentration der Salzlösung lassen sich verschiedene Größenverteilungen generieren.



Abbildung 4.8: TOPAS ATM220 Salz-Aerosolgenerator[21]

Abbildung 4.9 zeigt die Größenverteilung eines NaCl-Aerosols, welches aus einer Lösung von 50 ppm NaCl in destilliertem Wasser generiert wurde.

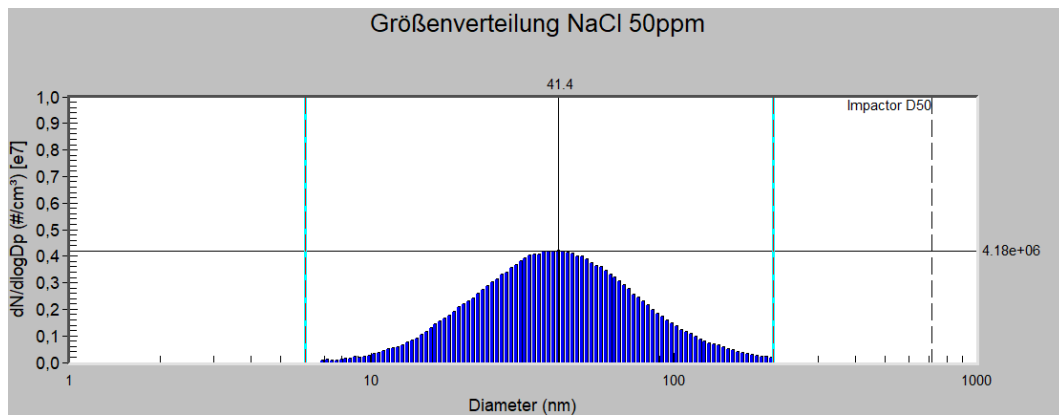


Abbildung 4.9: Größenverteilung NaCl-Aerosol

4.2 Effizienzmessung

Die Zähleffizienz beschreibt, ob das zu testende Messgerät mehr oder weniger Partikel zählt, als (laut Referenzgerät) tatsächlich im zu messenden Aerosol vorhanden sind. Es wird also die Zähleffizienz in Abhängigkeit der mittleren Partikelgröße ermittelt. Eine Zähleffizienz von 0.5 bedeutet z.B., dass das Messgerät die Hälfte der Partikel misst, die tatsächlich im Aerosol vorhanden sind.

Bei einem Diffusion Charger spielen mehrfach geladene Aerosolpartikel eine entscheidende Rolle. Sobald das Aerosol die Aufladeeinheit passiert, lagern sich Ionen an die Partikel an. Je nach Partikelgröße haften sich entsprechend mehr oder weniger Ionen an die Partikeln an. In der Corona-Aufladeeinheit des PN Counters findet eine unipolare Aufladung der Aerosolpartikel statt, das bedeutet, dass alle Ionen die gleiche Polarität besitzen. Ebenso wie bei der bipolaren Aufladung werden Nanopartikel auch bei der unipolaren Aufladung unterschiedlich mit Ionen belagert. Wird ein Aerosol in einer bipolaren ionischen Atmosphäre aufgeladen, werden nur gewisse Prozentsätze der Partikel einfach oder mehrfach geladen. Diese Prozentsätze sind abhängig vom Partikeldurchmesser. Eine detaillierte Beschreibung zur bipolaren Aufladung von Nanopartikel-Aerosolen findet sich in [22] und [17].

Da die zukünftigen gesetzlichen Bestimmungen es erfordern, dass hinsichtlich der Effizienz gewisse Kriterien erfüllt werden, wird es eventuell notwendig sein, einige Parameter, wie z.B. Spannung im elektrostatischen Abscheider, Modulationsfrequenz des elektrostatischen Abscheiders, Ionenstrom in der Corona-Aufladeeinheit und Aerosolflussrate durch die Messkette zu optimieren, um die gewünschte Charakteristik erreichen zu können.

Für die nachfolgenden Effizienzmessungen wurden folgende Parameter für den PN Counter gewählt:

Parameter	Wert
Spannung im elektrostatischen Abscheider	U_{ESP} 2000 V
Modulationsfrequenz des elektrostatischen Abscheiders	f_{mod} 0.5 Hz
Ionenstrom in der Corona-Aufladeeinheit	I_{ion} 47 nA
Massenfluss durch die Messkette	Q_{mess} 1 slpm
Verdünnungsverhältnis	$\frac{Q_{in}}{Q_{dilution}}$ ca. 1:4

Tabelle 4.2: Einstellungen am PN Counter

4.2.1 Versuchsaufbau

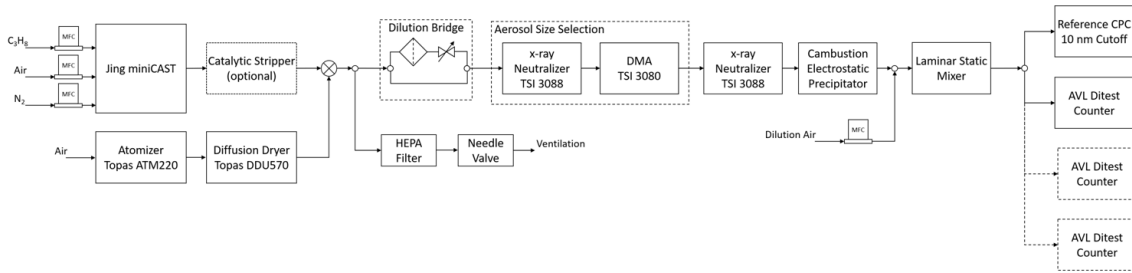


Abbildung 4.10: Setup für Effizienzmessungen

4.2.2 Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe

4.2.2.1 NaCl-Aerosol

Zur Untersuchung der Zähleffizienz des Messgerätes wurden Versuche mit NaCl-Aerosol durchgeführt. Die Parameter des PN Counters wurden wie in Tabelle 4.2 aufgelistet eingestellt.

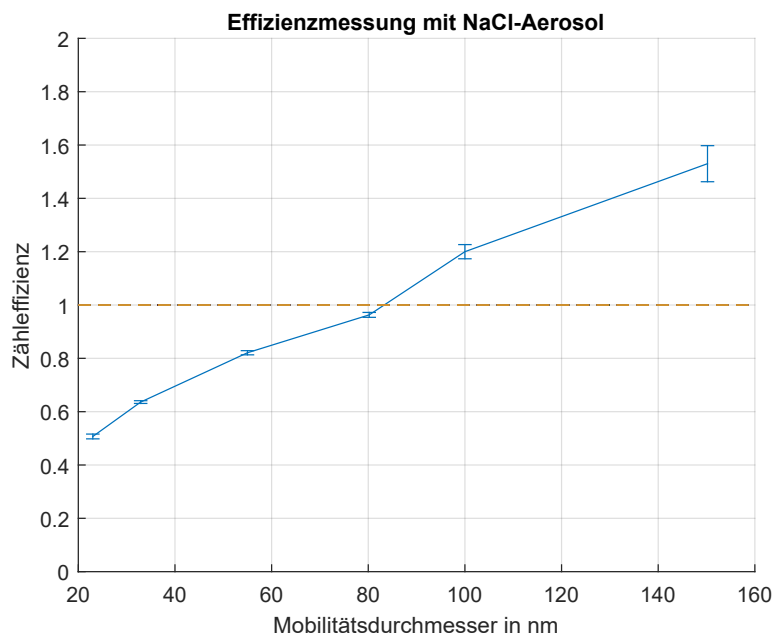


Abbildung 4.11: Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol

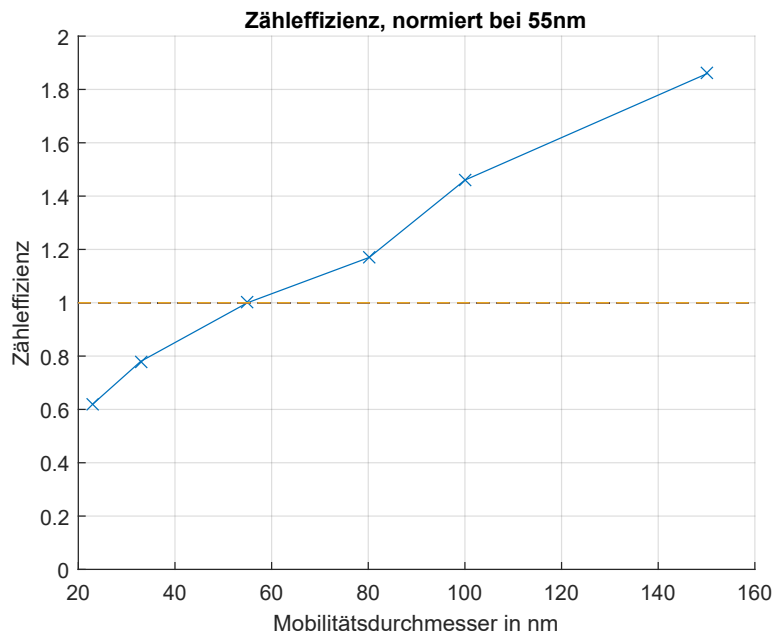


Abbildung 4.12: Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol

4.2.2.2 miniCAST-Aerosol

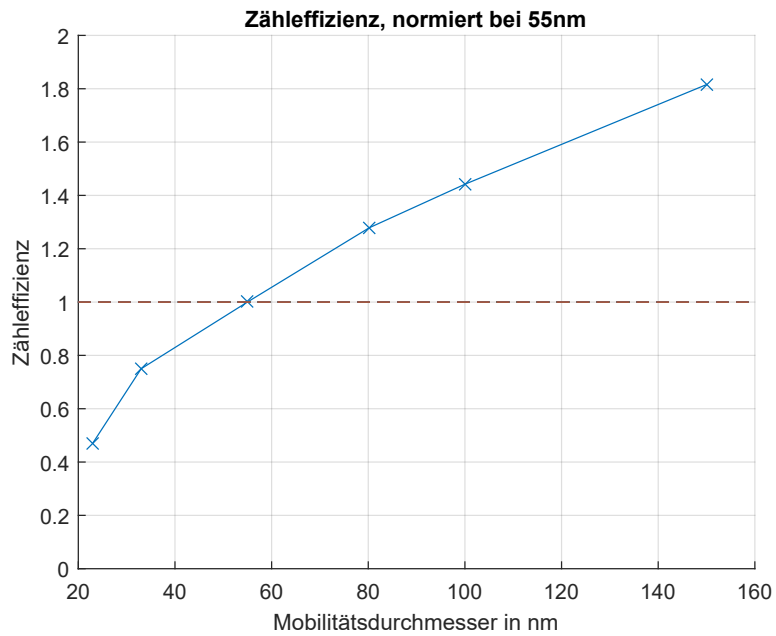


Abbildung 4.13: Effizienzkurve mit miniCAST-Aerosol

Es zeigt sich eine relativ große Schwankungsbreite in Hinblick auf die Zähleffizienz, ein Aerosol mit größeren Partikeln erzeugt einen höheren Partikelanzahl-

Messwert als ein Aerosol mit kleineren Partikeln. Diese Problematik ist bekannt und kann durch Optimieren einiger Parameter (Spannung im elektrostatischen Abscheider, Frequenz des elektrostatischen Abscheiders) abgeschwächt werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Prinzip der zweistufigen Messung (siehe 2.1.3) zu verwenden, wodurch zwar die Größenabhängigkeit des Partikelanzahl-Messwertes verringert, jedoch zusätzlicher konstruktiver Aufwand nötig wird.

4.2.3 Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation

Die Versuche erfolgten analog zu 4.2.2, der Unterschied liegt im pneumatischen Aufbau des PN Counters (siehe 2.2.2). Versuchsaufbau und Parameter des PN Counters finden sich in 4.10 bzw. 4.2, wobei diese Effizienzmessung mit einer Abscheider-Modulationsfrequenz von sowohl 0.5 Hz als auch 1 Hz durchgeführt wurde. Die Messungen an diesem pneumatischen Aufbau wurden lediglich mit NaCl-Aerosol durchgeführt.

4.2.3.1 NaCl-Aerosol

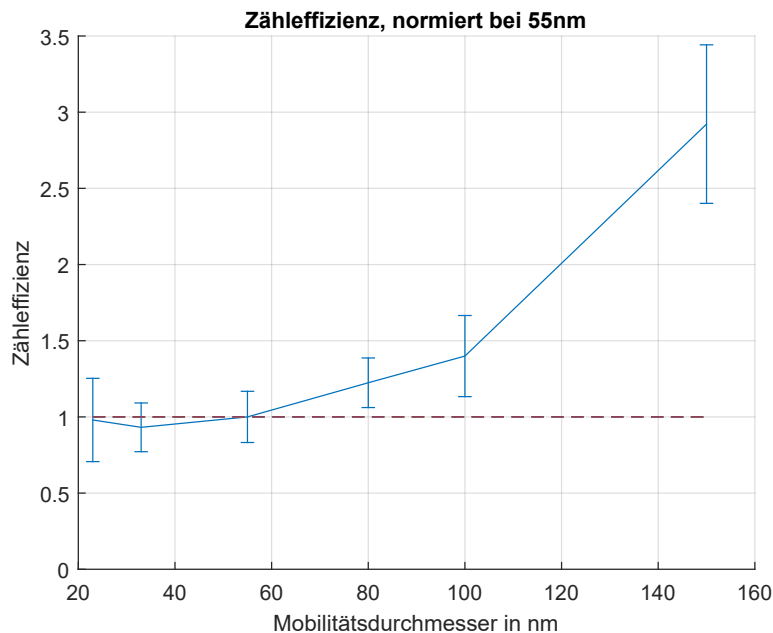


Abbildung 4.14: Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol, Modulationsfrequenz 1 Hz

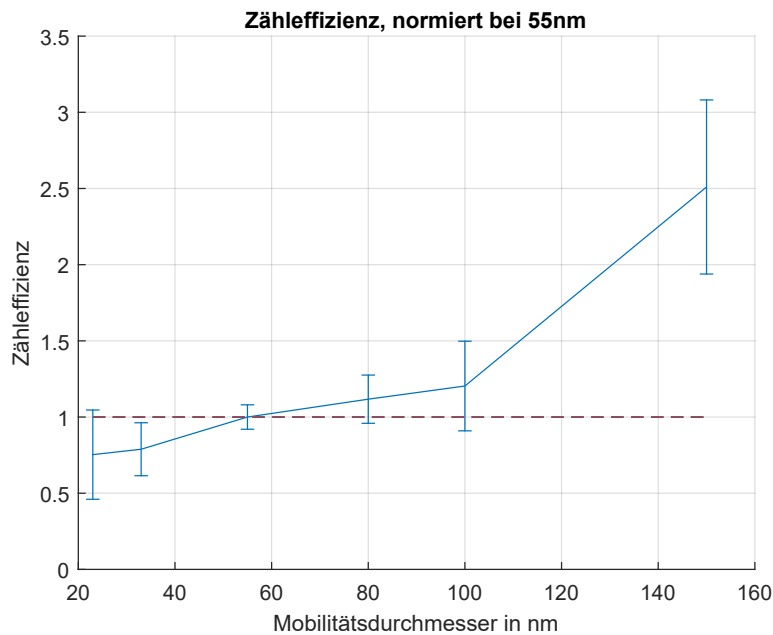


Abbildung 4.15: Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol, Modulationsfrequenz 0.5 Hz

Hierbei ist zu beobachten, dass die Fehlerbalken relativ groß sind. Dies ist auf eine größere Messunsicherheit aufgrund geringer Partikelanzahlkonzentrationen und Resonanzeffekte aufgrund des Rezirkulationsprinzips zurückzuführen.

4.3 Linearitätsmessung

Zur Überprüfung des linearen Verhaltens gegenüber einem Referenzmessgerät wurden diverse Linearitätsmessungen durchgeführt. Dabei wird bei einer bestimmten Größenverteilung die Partikelanzahl mittels Verdünnerrücke („Dilution Bridge“, siehe Abbildung 4.16) variiert. Idealerweise zeigt sich ein linearer Verlauf, was in der Praxis aber aufgrund von Strömungseffekten und anderen Störeinflüssen nicht der Fall sein wird.

Für die nachfolgenden Linearitätsmessungen wurden folgende Parameter für den PN Counter gewählt:

Parameter	Wert	
Spannung im elektrostatischen Abscheider	U_{ESP}	2000 V
Modulationsfrequenz des elektrostatischen Abscheiders	f_{mod}	0.5 Hz
Ionenstrom in der Corona-Aufladeeinheit	I_{ion}	47 nA
Massenfluss durch die Messkette	Q_{mess}	1 slpm
Verdünnungsverhältnis	$\frac{Q_{in}}{Q_{dilution}}$	ca. 1:4

Tabelle 4.3: Einstellungen am PN Counter

4.3.1 Versuchsaufbau

Die Linearitätsmessung wird mit polydisperssem Aerosol durchgeführt, wodurch der DMA, elektrostatischer Abscheider und Neutralizer aus dem Setup entfallen (siehe Abbildung 4.16).

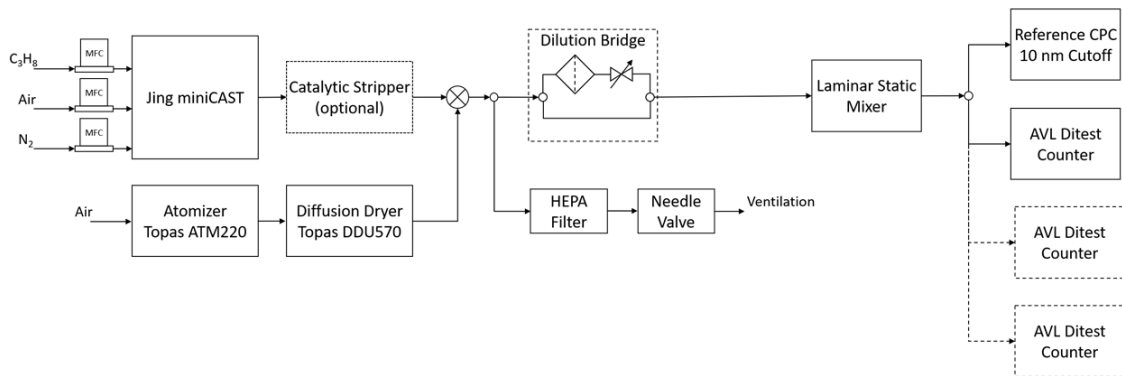


Abbildung 4.16: Setup für Linearitätsmessungen

4.3.2 Version mit Haupt- und Verdünnerpumpe

4.3.2.1 NaCl-Aerosol

Die Linearitätsmessungen wurden mit polydisperssem NaCl-Aerosol (Größenverteilung siehe 4.9) durchgeführt, zur Einstellung der Parameter siehe 4.2.

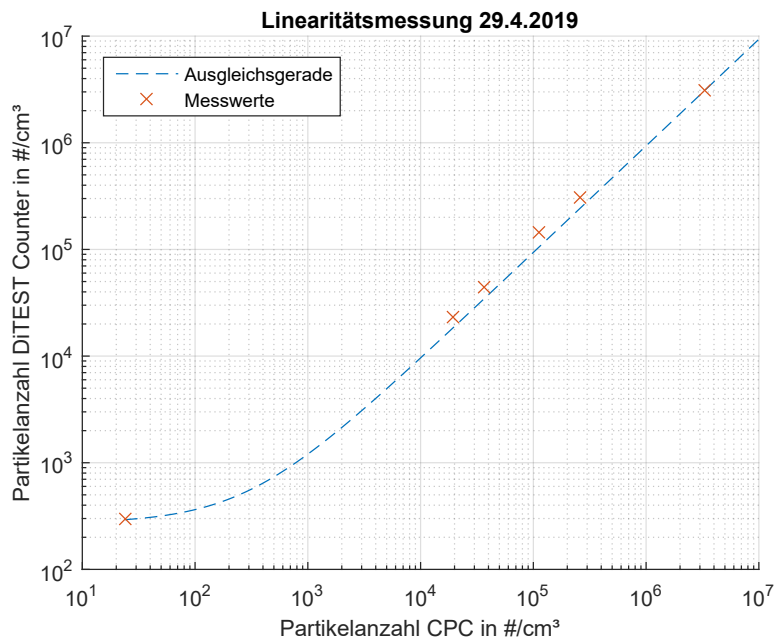


Abbildung 4.17: Linearitätsmessung mit polydispersen NaCl-Aerosol

Die Ausgleichsgerade in Abbildung 4.17 erscheint aufgrund des Offsets gekrümmt.

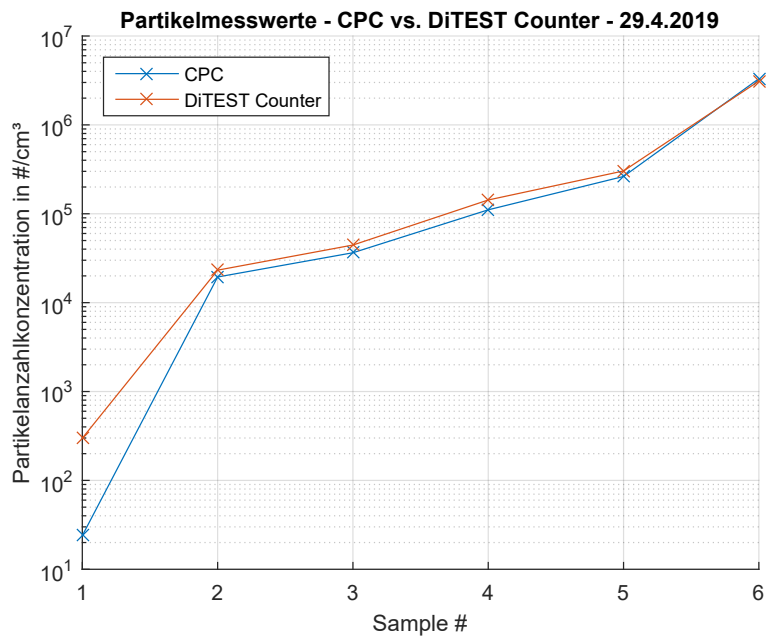


Abbildung 4.18: Vergleich zwischen CPC und DiTEST Counter

4.3.2.2 miniCAST-Aerosol

Es wurde zur Überprüfung der Verzögerungszeit und zur Verifikation des Kalibrierfaktors eine transiente Messung mit polydispersem miniCAST-Aerosol durchgeführt, die Einstellungen am miniCAST sind wie bei Sample #1 in Tabelle 4.1, die zugehörige Größenverteilung findet sich in Abbildung 4.5. Unter der Verzögerungszeit versteht man hierbei die Zeit, die zwischen Einschalten der Aerosolzufuhr zum Messgerät und dem Ausgeben eines entsprechenden Messwertes vergeht.

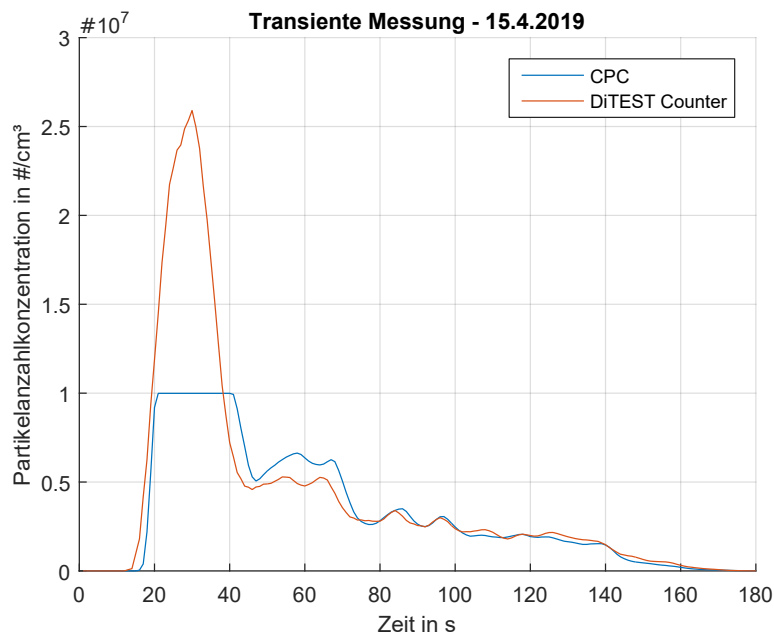


Abbildung 4.19: Transiente Messung mit polydispersem miniCAST-Aerosol

4.3.3 Version mit Hauptpumpe und Verdünnung über Rezirkulation

Die Versuche erfolgten analog zu 4.3.2, der Unterschied liegt im pneumatischen Aufbau des PN Counters (siehe 2.2.2). Versuchsaufbau und Parameter des PN Counters finden sich in 4.16 bzw. 4.3, wobei die Linearitätsmessung beim Rezirkulationsschema mit einer Abscheider-Frequenz von 1 Hz durchgeführt wurde. Die Messungen an diesem pneumatischen Aufbau wurden lediglich mit NaCl-Aerosol durchgeführt.

4.3.3.1 NaCl-Aerosol

Die Linearitätsmessungen wurden mit polydispersem NaCl-Aerosol (Größenverteilung siehe 4.9) durchgeführt.

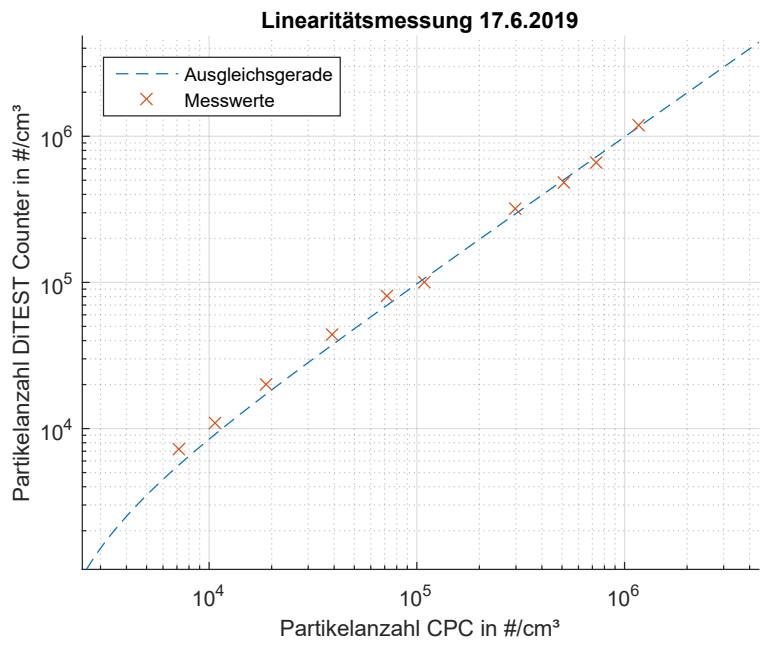


Abbildung 4.20: Linearitätsmessung mit polydisperssem NaCl-Aerosol

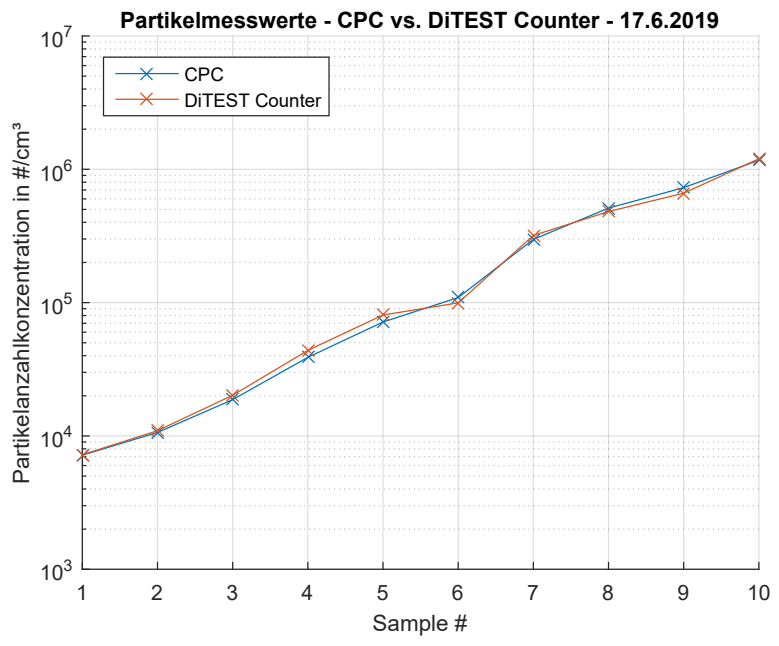


Abbildung 4.21: Vergleich zwischen CPC und DiTEST Counter

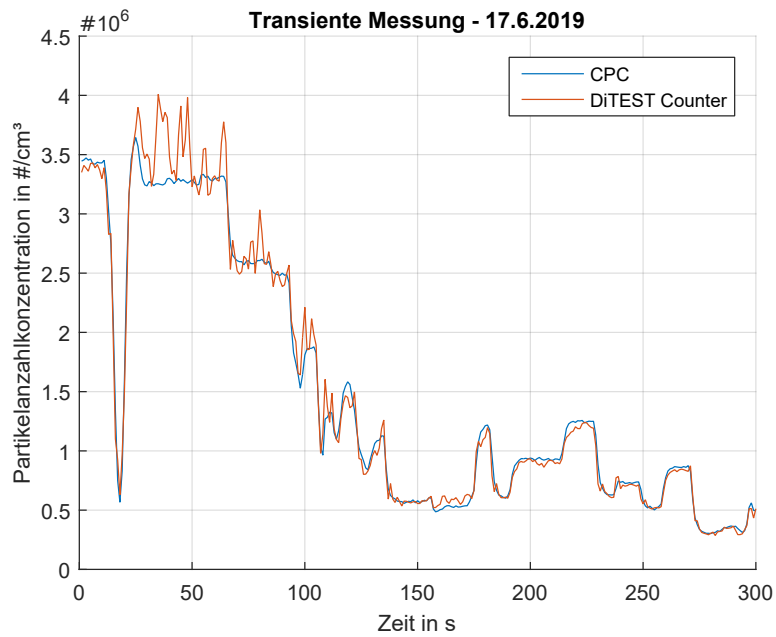


Abbildung 4.22: Transiente Messung mit polydispersem NaCl-Aerosol

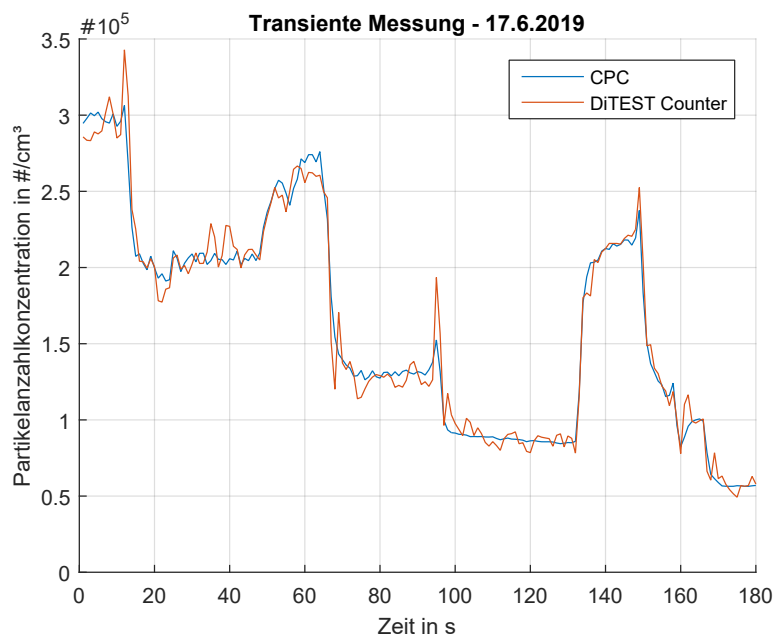


Abbildung 4.23: Transiente Messung mit polydispersem NaCl-Aerosol

Trotz der erhöhten Abscheider-Modulationsfrequenz von 1 Hz zeigen sich in den transienten Messungen durchaus brauchbare Ergebnisse, das Messrauschen kann durch zeitliche Mittelung verringert werden. Es empfiehlt sich dennoch, eine Modu-

lationsfrequenz von 0.5 Hz zu verwenden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

4.4 Tetracontan-Messung

Von gesetzlicher Seite wird es gefordert sein, volatile Abgasbestandteile nicht mitzumessen, wenn die Partikelanzahlkonzentration gemessen wird. Zu diesem Zweck ist ein Volatile Particle Remover (VPR) im Messgerät vorgesehen, in welchem das verdünnte Aerosol erhitzt wird. Dadurch werden volatile Bestandteile, wie z.B. Tröpfchen aus unverbranntem Kraftstoff, verdampft, wodurch sie in der Aufladeeinheit nicht aufgeladen und somit im Faraday-Cup auch nicht gemessen werden.

Zur besseren Reproduzierbarkeit wird die Zähleffizienz des Messgerätes mit einem eigens konstruierten Tetracontan-Generator getestet. Dabei wird Tetracontan, ein langkettiger Kohlenwasserstoff, in einem beheizten und von Luft durchströmten Behälter erhitzt, wodurch sich ein Aerosol aus Tetracontan-Tröpfchen bildet. Sofern das Aerosol nicht weiter aufgeheizt wird, bleiben die Tröpfchen bestehen und werden von der Messkette mitgemessen.

Derzeit steht noch nicht fest, auf welche Temperatur der VPR erhitzt werden muss, um die volatilen Aerosolbestandteile effektiv zu entfernen. Die Ermittlung der Betriebstemperatur des VPR ist Gegenstand derzeitiger Tests.



Abbildung 4.24: Tetracontan-Generator

4.4.1 Versuchsaufbau

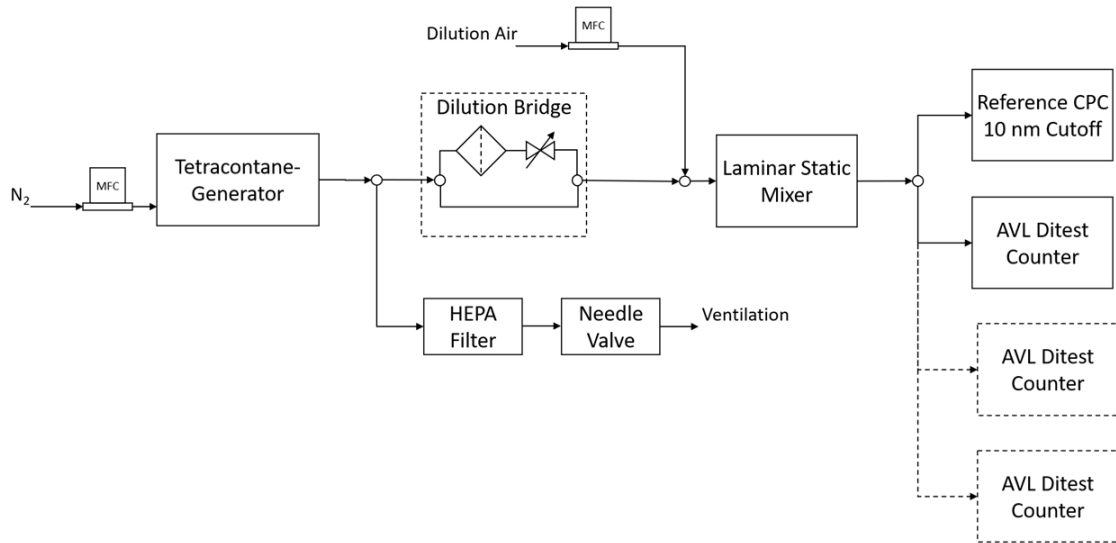


Abbildung 4.25: Setup für Tetracontan-Messungen

4.4.2 Messergebnisse

Die Messung wurde von Hr. Markus Maßwohl (AVL DiTEST) durchgeführt, die folgende Abbildung zeigt die Zähleffizienz für Tetracontan des PN Counters in Abhängigkeit der Temperatur in der Evaporation Tube.

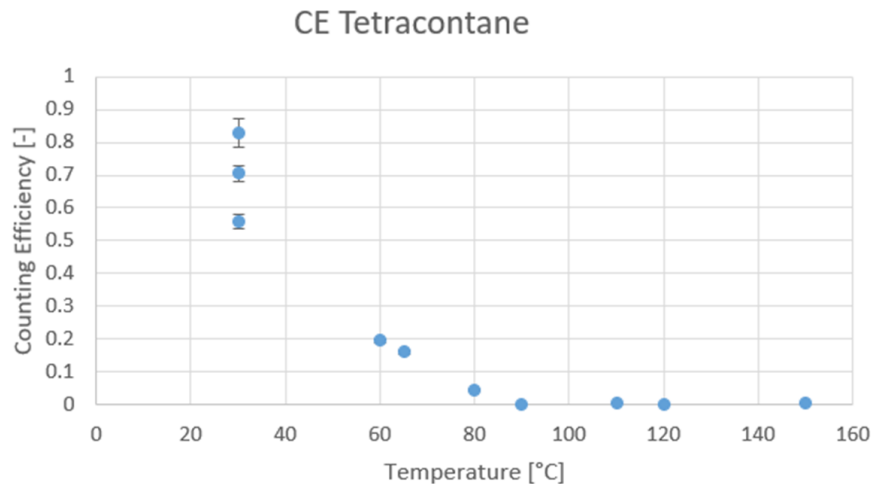


Abbildung 4.26: Zähleffizienz des PN Counters im Tetracontantest

Es ist zu erkennen, dass die gesetzlich geforderte Zähleffizienz von weniger als 5 % schon ab einer Temperatur von 80 °C erreicht ist, dennoch ist eine höhere Temperatur empfehlenswert, um die Kriterien zuverlässig zu erfüllen. Hierbei ist allerdings

Vorsicht geboten, da die interne Verschlauchung nur bis zu einer Temperatur von ca. 140 °C erhitzt werden darf. Wird die Verschlauchung zu heiß, können sich Partikel in deren Inneren lösen und sowohl das Messergebnis verfälschen, als auch das Messgerät beschädigen.

4.5 Conclusio

Die Messergebnisse sind hinsichtlich der Linearitäts- und Effizienzmessungen erwartungsgemäß verlaufen, wobei sich speziell bei den transienten Messungen (4.19, 4.22 und 4.23) gute Ergebnisse zeigten. Die Effizienzmessungen am Pneumatikschema mit Verdünnung über Rezirkulation (4.14 und 4.15) zeigen teilweise große Abweichungen von den erwarteten Ergebnissen (4.11), was vermutlich auf zu geringe Sensitivität des Messgerätes bzw. zu geringe Partikelanzahlkonzentrationen im Messaerosol zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Tetracontan-Messung sind besonders zufriedenstellend, es kann bereits mit vergleichsweise geringer Temperatur ein Einfluss der volatilen Partikel auf die Messung effektiv verhindert werden.

Die Verwendung des Pneumatikschemas mit Verdünnung über Rezirkulation (siehe 2.7) ist mir Vorbehalt freizugeben. Es zeigten sich zwar hervorragende Ergebnisse bei der transienten Linearitätsmessung, Grund zur Sorge geben allerdings die Ergebnisse der Effizienzmessungen. Eine weitere Untersuchung der Zähleffizienz bei diesem Pneumatikschema ist daher indiziert, sofern es in Zukunft im Messgerät Verwendung finden sollte.

Kapitel 5

Fazit und Ausblick

Das derzeitige Stadium der Prototypenentwicklung erfüllt großteils die gesetzlichen Anforderungen der Länder, die innerhalb der nächsten 3 Jahre beginnen wollen, im Zuge der PTI Partikelanzahlkonzentrationen zu messen. Sowohl in puncto Linearität als auch in puncto Zähleffizienz wurden bereits gute Ergebnisse erzielt, die jedoch mit diversen Mitteln der Signalverarbeitung weiter verbessert werden können.

In Hinblick auf Detektionslimit und Vermeidung von Kondensation im Inneren des Messgerätes besteht noch Handlungsbedarf, ebenso bei einer serientauglichen Lösung für die Befestigung des Wolframdrahtes in der Corona-Aufladeeinheit. Die Einsparung der zweiten Pumpe ist ebenfalls ein Thema, welches im Laufe der kommenden Wochen und Monate behandelt werden sollte, da dies einen erheblichen Kostenvorteil bieten würde. Ein weiterer Punkt ist die Untersuchung der Temperatur- und Umgebungsdruckabhängigkeit der Messergebnisse, was in Hinblick auf eine globale Vermarktung des Messgerätes interessant ist. Die Durchflussmessung mittels Messblende muss dafür noch weiterentwickelt werden, um ein Maximum an Genauigkeit und Zuverlässigkeit erzielen zu können. Dafür wird es nötig sein, die von den Membranpumpen verursachten Pulsationen im Durchfluss abzuschwächen und zusätzlich die dadurch verursachten Druckschwankungen softwareseitig durch zeitliche Mittelung des Differenz- und Absolutdruckmesswertes zu eliminieren.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Funktionsprinzip des AVL Smoke Meters[3]	9
1.2	Funktionsprinzip des Opacimeters[2]	10
1.3	Funktionsprinzip der Streulichtmessung[4]	10
1.4	AVL DiTEST PN Counter (B1-Muster)	12
2.1	Messbereichsvergleich	13
2.2	Schematische Darstellung eines Diffusion Chargers	14
2.3	Schematische Darstellung eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider	16
2.4	Schematische Darstellung eines zweistufigen Diffusion Chargers	17
2.5	Sensorsignal eines Diffusion Chargers mit moduliertem Abscheider	18
2.6	derzeitiges Pneumatikschema des Messgerätes	19
2.7	alternatives Pneumatikkonzept mit nur einer Pumpe	20
2.8	Thomas 1420-Serie	21
2.9	Thomas 1420 DP - Kennlinie	22
2.10	Thomas 1420 VP - Kennlinie	22
2.11	Thomas 1620-Serie	23
2.12	Thomas 1620 VDP - Kennlinie	24
2.13	Porous Tube Diluter	25
2.14	Silicagel-Trockner	26
2.15	Thermoelektrischer Trockner	26
2.16	Phasendiagramm für den VPR [11]	27
2.17	Evaporation Tube	28
2.18	Blockschaltbild des PN Counters	29
2.19	Mainboard	29
2.20	Corona-Aufladeeinheit	31
2.21	Elektrostatischer Abscheider	32
2.22	Faraday-Cup-Elektrometer	34
3.1	Schematischer Aufbau der Durchflussmessung im Wirkdruckverfahren	38

3.2	Derzeitige Messblende (SLA 3D-Druck-Teil)	39
3.3	Messunsicherheitsbetrachtung	40
3.4	Durchfluss in Abhängigkeit von Absolut- und Differenzdruck	41
3.5	Durchfluss in Abhängigkeit von Absolut- und Differenzdruck, 2D-Ansichten	41
3.6	Gegenüberstellung der Durchflussmessungen	42
3.7	Relative Messunsicherheit des Wirkdruckverfahrens	42
3.8	Durchflussmessung im Wirkdruckverfahren mit Temperaturkompensation	44
3.9	Relative Messunsicherheit des Wirkdruckverfahrens mit Temperaturkompensation	44
3.10	Massenflusssensor IDT FS2012-1100NG	45
3.11	Pneumatikschema im Rezirkulationsprinzip, mit IDT-Massenflusssensoren	46
3.12	Aufbau des kalorimetrischen Durchflusssensors	46
3.13	Gegenüberstellung der Durchflussmessungen	47
3.14	Relative Messunsicherheit des Massenflusssensors	47
3.15	Gegenüberstellung der Durchflussmessungen	48
3.16	Relative Messunsicherheit des Massenflusssensors	49
3.17	Messunsicherheit des IDT-Sensors in Abhängigkeit der Temperatur	50
4.1	Daten des CPC3775 von TSI, Auszug aus[15]	54
4.2	Zähleffizienzkurve des CPC3775 von TSI[15]	54
4.3	positiv schiefe Normalverteilung	55
4.4	Funktionsprinzip des miniCAST[1]	56
4.5	Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #1	56
4.6	Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #2	57
4.7	Größenverteilung miniCAST-Aerosol - Sample #3	57
4.8	TOPAS ATM220 Salz-Aerosolgenerator[21]	58
4.9	Größenverteilung NaCl-Aerosol	58
4.10	Setup für Effizienzmessungen	60
4.11	Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol	60
4.12	Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol	61
4.13	Effizienzkurve mit miniCAST-Aerosol	61
4.14	Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol, Modulationsfrequenz 1 Hz	62
4.15	Effizienzkurve mit NaCl-Aerosol, Modulationsfrequenz 0.5 Hz	63
4.16	Setup für Linearitätsmessungen	64
4.17	Linearitätsmessung mit polydisperssem NaCl-Aerosol	65
4.18	Vergleich zwischen CPC und DiTEST Counter	65

4.19	Transiente Messung mit polydisperssem miniCAST-Aerosol	66
4.20	Linearitätsmessung mit polydisperssem NaCl-Aerosol	67
4.21	Vergleich zwischen CPC und DiTEST Counter	67
4.22	Transiente Messung mit polydisperssem NaCl-Aerosol	68
4.23	Transiente Messung mit polydisperssem NaCl-Aerosol	68
4.24	Tetracontan-Generator	69
4.25	Setup für Tetracontan-Messungen	70
4.26	Zähleffizienz des PN Counters im Tetracontantest	70

Literaturverzeichnis

- [1] JING LTD. (Hrsg.): *Homepage Jing Ltd.* Im Park 4, CH-3052 Zollikofen BE, Switzerland: Jing Ltd., http://www.sootgenerator.com/CAST_principle.htm
- [2] GLATTE, Wolfgang ; SACHSE, Juergen ; HUENIGEN, Edmund: *Rauchdichtemessgeraet für Dieselmotoren zum Messen der Rauchdichte der Abgase.* Version: 1966. <https://patents.google.com/patent/DE1673230A1/en>
- [3] AVL LIST GMBH (Hrsg.): *EMISSION MEASUREMENT INSTRUMENTS AVL SMOKE METER.* Hans-List-Platz 1 8020 Graz Österreich: AVL List GmbH, 2018. <https://www.avl.com/-/avl-smoke-meter>
- [4] AXMANN, Harald: *Verfahren zur Bestimmung der Partikelkonzentration in Abgasen von Verbrennungsmotoren.* November 2014
- [5] MAYER, A. ; BURTSCHER, H. ; LUTZ, T. ; HENSEL, V.: *New Periodic Emission Inspection to guarantee PN Emission Stability of all modern Vehicles - Result of a VERT initiated International Task Force 2016-2018, 2019*
- [6] LONGIN, Matthias: *Entwicklung eines Sensorsystems zur Messung der Partikelanzahlkonzentration in Kraftfahrzeugen,* TU Graz, Diplomarbeit, 2019
- [7] SCHRIEFL, M. A. ; BERGMANN, A. ; FIERZ, M.: *Design Principles for Sensing Particle Number Concentration and Charging, Mean Particle Size With Unipolar Diffusion.* In: *IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 19* (2019)
- [8] AVL LIST GMBH (Hrsg.): *Datenblatt AVL PARTICLE COUNTER(TM).* Hans-List-Platz 1, A-8020 Graz, Austria: AVL List GmbH, 04 2010
- [9] GARDNER DENVER THOMAS GMBH (Hrsg.): *Datenblatt Thomas 1420 Series.* Livry-Gargan-Str. 10 82256 Fürstenfeldbruck Germany: Gardner Denver Thomas GmbH, 01 2016

- [10] GARDNER DENVER THOMAS GMBH (Hrsg.): *Datenblatt Thomas 1620 Series*. Livry-Gargan-Str. 10 82256 Fürstenfeldbruck Germany: Gardner Denver Thomas GmbH, 12 2015
- [11] KASPER, Markus: Characterising the PMP "Golden Instrument" Verification of the Volatile Particle Remover. (2005)
- [12] SCHWEIZER, A.: Normblende mit Eck-Druckentnahme. In: <https://www.schweizer-fn.de/zeta/blende/blende.php> <https://www.schweizer-fn.de/zeta/blende/blende.php>
- [13] INTEGRATED DEVICE TECHNOLOGY, INC. (Hrsg.): *Datenblatt IDT FS2012 Massenflusssensor*. 6024 Silver Creek Valley Road San Jose, CA 95138: Integrated Device Technology, Inc., 08 2018
- [14] COHEN, Beverly S. ; HERING, Susanne V. ; AIR SAMPLING INSTRUMENTS, American C. o.: *Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants*. Cincinnati, Ohio : ACGIH, 1995
- [15] TSI INCORPORATED (Hrsg.): *Datenblatt TSI CPC 3775*. P/N 1980527, Revision D. TSI Incorporated, 04 2007
- [16] BISKOS, G. ; REAVELL, K. ; COLLINGS, N.: Unipolar diffusion charging of aerosol particles in the transition regime. In: *Journal of Aerosol Science* (2004)
- [17] FUCHS, N. A.: ON THE STATIONARY CHARGE DISTRIBUTION ON AEROSOL PARTICLES IN A BIPOLAR IONIC ATMOSPHERE. (1963)
- [18] HINDS, William C.: *Aerosol Technology - Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 1999
- [19] TSI INCORPORATED (Hrsg.): *Datenblatt TSI Electrostatic Classifier 3082*. P/N 5001530 Rev B (A4). TSI Incorporated, 2013
- [20] TSI INCORPORATED (Hrsg.): *AEROSOL STATISTICS LOGNORMAL DISTRIBUTIONS AND $dN/d\log D_p$ APPLICATION NOTE PR-001*. TSI Incorporated, 2012
- [21] TOPAS GMBH (Hrsg.): *Datenblatt TOPAS Serie ATM Aerosolgeneratoren*. Oskar-Röder-Str. 12 D-01237 Dresden: Topas GmbH
- [22] WIEDENSOHLER, A.: An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range. (1988)