



Thomas Hofer, Bsc.

Evaluierung eines Partikelsensors basierend auf Interferenz in optischen Resonatoren

MASTER'S THESIS

to achieve the university degree of

Diplom-Ingenieurin

Master's degree programme: Electrical Engineering

submitted to

Graz University of Technology

Supervisor

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

Institute of Electronic Sensor Systems

Co-Supervisor

Dipl.-Ing. Paul Maierhofer

Graz, Oktober 2019

EIDESSTATTLICHE 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/Diplomarbeit/Dissertation 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/diploma thesis/doctoral dissertation.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Abstract

More and more disease and premature deaths can be attributed to increased concentrations of particulate matter in the ambient air.

As this circumstance becomes more and more important, new challenges emerge around the topic of aerosol measurement. It is becoming necessary to develop new sensors, which can be produced both smaller and more cost-effectively than previously available systems, in order to enable a comprehensive and personalized measurement of the fine dust concentration.

The aim of this work is to investigate a novel solution for particle detection using optical interference. With this principle, the signal exceeds existing methods - such as the established scattered light method - by large orders, further the method also shows potential for miniaturization.

The work includes an analytical modeling of the optical system, the construction of a prototypical measuring system, data acquisition and signal processing, as well as the setup of an aerosol test setup and evaluation of the system.

Based on the analytical model, a semi-automated measurement system was designed using a commercially available optical microphone based on an interferometer. In addition to the optical microphone, the measuring system consists of a specially designed mechanical holder which has been manufactured using 3D printing technology and allows the aerosol to be fed to the interferometer. In addition, a circuit board was designed which allows the digitization of the measurement data and an algorithm for the evaluation of the data on the platform of a Raspberry Pi was developed. During experiments in the aerosol laboratory various particles were generated to test the system. A correlation of the signal with the particle number concentration could be shown and thus an experimental proof-of-principle for the proposed system could be provided.

Zusammenfassung

Immer mehr Krankheitsbilder und frühzeitige Todesfälle können auf erhöhte Feinstaubkonzentrationen in der Umgebungsluft zurückgeführt werden.

Da diesem Umstand immer mehr Bedeutung zugemessen wird, ergeben sich auch rund um die Thematik der Aerosolmesstechnik neuer Herausforderungen. Es entsteht die Notwendigkeit neue Sensoren zu entwickeln, welche sowohl kleiner als auch kostengünstiger hergestellt werden können als bisher verfügbare Systeme, um eine flächendeckende und personalisierte Messung der Feinstaubkonzentration zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist die Erforschung eines neuartigen Lösungsansatzes zur Partikeldetektion unter Ausnutzung optischer Interferenz. Mit diesem Prinzip übersteigt das Nutzsinal jenes bestehender Verfahren - wie etwa dem etablierten Streulichtverfahren - um Größenordnungen, zudem zeigt das Verfahren Potential zur Miniaturisierung.

Die Arbeit umfasst eine analytische Modellierung des optischen Systems, den Aufbau eines prototypischen Messsystems, Datenaufnahme und Signalverarbeitung sowie den Aufbau eines Aerosol Test-Setups und Evaluierung des Systems.

Aufbauend auf dem analytischen Modell wurde unter Verwendung eines kommerziell erhältlichen optischen Mikrofons auf Basis eines Interferometers, ein teilautomatisiertes Messsystem entworfen. Das Messsystem besteht neben dem optischen Mikrofon aus einer speziell dafür konstruierten mechanischen Halterung, welche durch 3D-Drucktechnik gefertigt wurde und die Zuleitung des Aerosols zum Interferometer ermöglicht. Zusätzlich wurde eine Platine, welche die Digitalisierung der Messdaten erlaubt, entworfen und ein Algorithmus zur Auswertung der Daten auf der Plattform eines Raspberry Pi entwickelt. Im Rahmen von Experimenten im Aerosol-Labor wurden verschiedene Partikel erzeugt, um anschließend das System damit zu testen. Es konnte eine Korrelation des Signals mit der Partikelanzahlkonzentration gezeigt werden und somit ein experimenteller Proof-of-Principle für das vorgeschlagene System erbracht werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich einen besonderen Dank an Paul Maierhofer aussprechen, der mir durch seine Unterstützung die Einarbeitung in die Thematik deutlich erleichtert und mich auch bei allen anderen Anliegen tatkräftig unterstützt hat. Ohne sein Zutun wäre die vorliegende Arbeit nicht in dieser Form zustande gekommen. Gleichmaßen möchte ich mich bei Professor Alexander Bergmann für die Betreuung und auch die Bereitstellung des Equipments bedanken. Ebenfalls möchte ich dem gesamten Team des Instituts für elektrische Sensorsysteme danken, die durch Einbringen zahlreicher Ideen die Arbeit maßgeblich bereichert haben.

Insbesondere möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken, die mich jederzeit sowohl mental als auch finanziell unterstützt haben und mir somit mein Studium erst ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aerosol.	1
1.1.1	Einige Kenngrößen	1
1.1.2	Einheiten.	2
1.1.3	Metriken und Grenzwerte	2
1.2	Messtechnik.	3
2	Grundlagen	5
2.1	Optische Eigenschaften von Aerosolen	5
2.2	Vorhandene Messprinzipien	6
2.2.1	Streulichtdetektor	6
2.2.2	Trübungsmessung	7
2.2.3	Diffusions Charging.	7
2.2.4	Siebanalyse	8
2.3	Messgeräte	9
2.3.1	Condensation Particle Counter (CPC)	9
2.3.2	Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)	10
2.3.3	Aerodynamic Particle Sizer (APS).	11
3	Analytische Betrachtung	13
3.1	Interferometer	13
3.1.1	Kohärenz und Interferenz	13
3.1.2	Mach-Zehnder Interferometer.	14
3.1.3	Fabry-Perot Interferometer.	16

3.2	Interferometrische Partikeldetektion	21
3.2.1	Interferenz	21
3.2.2	Streuung	25
3.3	Optisches Mikrofon	27
3.4	Theoretische Messgrenzen	29
4	Entwicklung des Messsystems	31
4.1	Konzept des Messsystems	31
4.2	Hardware	32
4.2.1	Konstruktion der Düse	32
4.2.2	Durchflussmeter	33
4.2.3	Elektrische Schaltung des Analog Digital Converter (ADC)	34
4.3	Software	36
4.3.1	Ansteuerung des ADC	36
4.3.2	Messsignal eines Partikels	37
4.3.3	Signalanalyse	38
4.3.4	Optimaler Schwellwert	40
4.3.5	Graphical User Interface (GUI)	42
4.4	Gesamtsystem	45
4.4.1	Blockschaltbild	45
5	Messergebnisse	47
5.1	Messaufbau	47
5.1.1	Aufbau	47
5.1.2	Erzeugung eines Aerosols	49
5.1.3	Auswertung	50
5.2	Polystyrol Latex Partikel (PSL)	53
5.3	Natriumchlorid (NaCl)	56
5.4	Kondensationspartikel	59
5.5	Messungen mit dem Gesamtsystem	62
6	Zusammenfassung und Diskussion	65
7	Ausblick	69

Literaturverzeichnis

71

Einleitung

1.1 Aerosol

Aerosol ist ein Kunstwort und setzt sich aus den beiden Begriffen, Luft und Lösung zusammen. Es ist ein Gemisch aus Gas und festen oder flüssigen Teilchen, mit Partikeln im Größenbereich von 2 nm bis über $100\text{ }\mu\text{m}$ [1].

Natürliche Aerosole können beispielsweise aus Verbrennungsprozessen, Vulkanaktivitäten, Salzpartikel vom Meer oder Wüstenstaub entstehen [2].

1.1.1 Einige Kenngrößen

Unter Aerosolmesstechnik versteht man unter anderem die Bestimmung der Anzahl und/oder Größe der gelösten Partikel in einem Gas. Je nach Größe und Konzentration der Partikel kommen unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz, einige davon werden in Kapitel 2 erläutert.

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Messziele behandelt:

- **Partikelgrößenverteilung**
- **Partikelanzahlkonzentration**
- **Partikelmasse**

Weiteres können auch chemische Eigenschaften, Morphologie, Ladung und viele weitere Kenngrößen betrachtet werden, auf die in dieser Arbeit aber nicht näher eingegangen

wird.

1.1.2 Einheiten

Um Partikel der Größe nach zu klassifizieren wird ein Äquivalenzdurchmesser d_p angegeben, eine Kugel mit Durchmesser d_p weist die gleichen Eigenschaften wie das irregulär geformte Partikel auf. Verfügbare Messprinzipien sind nicht in der Lage die tatsächliche Größenverteilung kontinuierlich abzubilden, sondern erstellen ein Histogramm mit endlicher Binbreite. Um eine Unabhängigkeit von der Binbreite zu erlangen und somit die Ergebnisse verschiedener Messgeräte einfach miteinander vergleichbar zu machen, wird die Einheit $\frac{dN}{d \log d_p}$ verwendet. Damit wird angegeben wie viele Partikel sich in einem bestimmten Größenbereich befinden, dies geschieht aber unabhängig der breite des gewählten Bereichs.

Die Partikelanzahlkonzentration wird typischerweise auf des Volumen normiert in $\frac{\#}{cm^3}$ angegeben, sie wird teilweise auch Partikeldichte genannt.

Für die Partikelmasse hat sich auf Grund der geringen Abmessung und Masse von Partikel die Einheit $\frac{\mu g}{m^3}$ etabliert.

1.1.3 Metriken und Grenzwerte

Für die Güte der Luftqualität sind heutzutage zwei Bereiche der Partikelgrößen in der Gesetzgebung verankert, PM_{10} und $PM_{2.5}$.

Definition von $PM_{2.5}$ laut Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) § 2:

”(5b) $PM_{2,5}$ im Sinne dieses Bundesgesetzes bezeichnet die Partikel, die einen gröbenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von $2,5 \mu m$ eine Abscheidewirksamkeit von 50 v.H. aufweist.” [3]

Die Definition von PM_{10} ist analog dazu mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $10 \mu m$. In der Gesetzgebung ist allerdings nur die Partikelmasse beschränkt, was zur Folge hat, dass große Partikel stärker gewichtet werden als Kleine, da das Volumen kubisch mit dem Durchmesser ansteigt. Die Gesundheitsgefährdung geht aber hauptsächlich von kleinen Partikeln aus bzw. hängt sie auch mit der Oberfläche der Partikel zusammen. Daher wird in wenigen Umweltmessstationen auch die Partikelmasse von PM_1 aufgenommen, um die Belastung kleiner Partikel separat zu erfassen.

”Eine aktuelle Bewertung der Gesundheitsauswirkungen von Feinstaub durch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat klar gezeigt, dass eine erhöhte $PM_{2,5}$ -Belastung in Zusammenhang mit schweren Gesundheitsauswirkungen (z.B. Herz-Kreislaufkrankungen) steht. Für diese Auswirkungen konnte kein Schwellenwert gefunden werden, das heißt, sie können auch bei Belastungen unter dem Grenzwert auftreten. Dadurch kann es zu einer signifikanten Verminderung der Lebenserwartung kommen.” [4]

Die WHO empfiehlt daher einen Grenzwert von $PM_{2,5}$ von $10 \frac{\mu g}{m^3}$ [4]. Hierbei handelt es sich um Immissionsgrenzwerte, damit werden Schadstoffe welche auf die Umwelt einwirken bezeichnet. Diese sind eine Konsequenz der Emission, darunter fallen Stoffe die von Mensch oder Maschine in die Umwelt freigesetzt werden, diese werden im Emissionsschutzgesetz geregelt [5].

Schadstoff	Grenzwert	Mittelungszeit
PM_{10}	$50 \frac{\mu g}{m^3}$	Tagesmittelwert ¹
PM_{10}	$40 \frac{\mu g}{m^3}$	Jahresmittelwert
$PM_{2,5}$	$25 \frac{\mu g}{m^3}$	Jahresmittelwert

Tabelle 1.1: Immissionsgrenzwerte (Stand: Juni 2019)

¹ pro Kalenderjahr sind 25 Überschreitungen zulässig.

Die Immissionsgrenzwerte zum Schutz der Gesundheit in der Europäischen Union (EU) sind in Tabelle 1.1 angeführt [6]. Diese weichen noch deutlich von den Empfehlungen der WHO ab, ab 2020 sind aber Minderungsziele für die Feinstaubfraktion $PM_{2,5}$ festgelegt [7].

1.2 Messtechnik

Die Anforderungen an die Messtechnik unterscheiden sich je nach Anwendung stark, da sich der Größenbereich von wenigen nm bis hin zu einigen μm erstreckt.

Abhängig der gefragten Kenngröße wie z.B.: Größenverteilung, Partikelmasse oder etwa chemische Eigenschaften muss auf unterschiedliche Messprinzipien zurückgegriffen werden, siehe Abschnitt 2.2.

Die Anwendungsbereiche erstreckt sich von präzisen Laborgeräten für Referenzmessungen bis hin zu kleinen robusten Sensoren in Kraftfahrzeugen, welche die Partikelmasse in Echtzeit abbilden müssen. Für Umweltstationen ist hingegen ein Tagesmittelwert oft ausreichend, jedoch sollte dieser auf Grund seiner starken Ortsabhängigkeit, an möglichst

vielen Positionen erfasst werden. Optimale Ergebnisse hierfür würde Beispiels eine Vernetzung von Sensoren in Smartphones liefern, dafür wären aber kostengünstige als auch kleine Sensoren nötig.

Viele Messprinzipien lassen sich nicht miniaturisieren und somit günstiger herstellen. Daher müssen neue Konzepte entwickelt werden, welche auch mit kleinen Abmessungen repräsentative Ergebnisse liefern. Eine Möglichkeit dafür wird in der folgenden Arbeit vorgestellt und experimentell behandelt.

Grundlagen

2.1 Optische Eigenschaften von Aerosolen

Besonders in Bezug auf Metriken wie $PM_{2.5}$ und PM_{10} werden in der Messtechnik häufig optische Verfahren angewandt. Hierbei wird die Streuung von Licht an den zu messenden Partikeln ausgenutzt. Das gestreute Licht wird detektiert und dient als Maß für die Anzahl und die Größe der Partikel. Entscheidend für die Intensität des Streulichtes ist neben der Größe und der Morphologie der Partikel auch der Brechungsindex. Der Brechungsindex gibt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der im Material an und wird in komplexer Schreibweise $n = n_r + j \cdot n_i$ angegeben. Wobei n_r die Reflexion und n_i die Absorption angibt, n_r verkürzt die Wellenlänge und n_i dämpft sie. Er ist dimensionslos und im Allgemeinen von der Wellenlänge abhängig.

Material	Brechungsindex n
Vakuum	1
Luft	1.000277
Wasser	1.33
NaCl	1.54
Polystyrol	1.59
Ruß	1.34-2.42

Tabelle 2.1: Brechungsindex verschiedener Stoffe bei 589 nm [8]

Die Werte für einige Materialien bei 585 nm sind in Tabelle 2.1 aufgelistet. Die Brechzahl von Luft ist in erster Näherung 1, die eines Partikels ist etwa 50 % höher somit ergeben

sich gute Voraussetzungen mit Hilfe dessen Partikel nachweisen zu können.

2.2 Vorhandene Messprinzipien

Ein Partikel ist im Allgemeinen nicht kugelförmig, um die Größe trotzdem klassifizieren zu können wird ein Äquivalentdurchmesser angegeben. Dieser entspricht jenem Durchmesser, den eine Kugel aufweisen muss, um gleiches Verhalten wie das Partikel zu zeigen. Bei verschiedenen Verfahren werden verschiedene Eigenschaften zur Beurteilung herangezogen, dies können sein [9]:

- Volumen
- Projektionsfläche
- Lichtstreuung
- Aerodynamischer Widerstand
- Sinkgeschwindigkeit

Es werden mit unterschiedlichen Verfahren unterschiedliche Äquivalenzdurchmesser bestimmt, dies ist aber kein Messfehler, sondern ist den unterschiedlichen Eigenschaften geschuldet.

Im Folgenden werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige ausgewählte Messprinzipien erörtert. Weitere mögliche Verfahren sind unter anderem Sedimentationsverfahren, Feldstörungsverfahren, akustische Verfahren oder Oberflächenbestimmungsverfahren [9].

2.2.1 Streulichtdetektor

Das Prinzip des Streulichtdetektors hat wahrscheinlich jeder von uns schon selbst erlebt, wenn die Sonne tief steht und in einen Raum strahlt, werden Lichtstrahlen an Staubpartikel reflektiert und so selbst für das bloße Auge erkennbar.

Die Ursache dafür beschreibt im Allgemeinen die Mie Theorie. Durch den unterschiedlichen Brechungsindex von Luft und Partikel breitet sich bei Beleuchtung, vom Partikel ausgehend Streulicht, in alle Richtungen aus. Die Intensität ist vom Winkel abhängig und wird auch durch Material und Geometrie beeinflusst.

In solch einem Sensor wird meist ein Laser als Lichtquelle verwendet, um hohe Intensitäten

zu erreichen. Das Streulicht kann unter verschiedenen Winkeln vom Partikel aufgenommen werden. Verbreitet ist die Aufnahme unter rechtem Winkel [9].

Das Streulicht ist außerdem in weiten Bereichen proportional der Partikelgröße. Der Messbereich erstreckt sich z.B. beim MODEL 11-D des Herstellers Grimm von 250 nm bis $35\text{ }\mu\text{m}$, somit kann das Verfahren sowohl zum zählen als auch zum bestimmen der Partikelgröße verwendet werden [10].

Ein Nachteil ist die starke Abhängigkeit des Ergebnisses vom Absorptionskoeffizienten n_i und von der Morphologie der Partikel. Weiters liefert die Methode keine Aussage über die Dichte der Partikel. Um eine Massenkonzentration zu schätzen, daher muss eine mittlere Dichte angenommen werden.

Ein Spezialfall dieser Methode ist das Tyndallometer, dabei wird eine Staubwolke beleuchtet und das insgesamt gestreute Licht erfasst, welches proportional der Staubkonzentration ist.

2.2.2 Trübungsmessung

Bei der Trübungsmessung wird ein Messvolumen durchleuchtet, auf der Rückseite wird die Lichtabschwächung von einem Detektor erfasst. Abhängig davon wie viel Partikel sich im Volumen befinden wird mehr oder weniger Licht gestreut bzw. absorbiert und man erhält ein kontinuierliches der Partikelkonzentration proportionales Ausgangssignal.

Es wird dabei keine Einzelmessung durchgeführt sondern immer das Messvolumen als gesamtes analysiert [9].

2.2.3 Diffusions Charging

Eine Kammer wird mit Aerosol befüllt. Mit Hochspannung und einer Koronanadel werden positive Ionen freigesetzt und gelangen durch einen zweiten Einlass mit gefilterter Luft ebenso in die Kammer. In der Kammer kommt es zur Durchmischung und die Ionen setzen sich an Partikeln fest.

Im Auslass bindet eine Ionenfalle die restlichen noch freien Ionen, damit die Austretende Ladungsmenge proportional der Partikelkonzentration ist.

Auf diese Art kann ein relativ kostengünstiges Verfahren realisiert werden. Es ist lediglich eine Hochspannungsquelle von wenigen kV und ein Ladungsverstärker notwendig. Eine Problematik stellt die Tatsache dar, dass sich an großen Partikeln auch mehrere Ladungen

festsetzen können dar und diese Methode nicht beliebig miniaturisiert werden kann. [11]

2.2.4 Siebanalyse

Die Partikelmasse lässt sich mit Hilfe eines Filters sehr genau bestimmen. Dabei wird der Filter vor der Messung gewogen, anschließend wird durch den Filter ein bekanntes Volumen Aerosol geführt. Der Filter wird erneut gewogen um aus der Differenz die Partikelmasse zu bestimmen.

Um korrekte Ergebnisse zu erzielen muss das Volumen möglichst groß sein und genau erfasst werden. Die Messung liefert nur den Mittelwert der Partikelmasse über den gesamten Zeitraum, die Zeitauflösung ist also im Vergleich zu Streulichtgeräten typischer Weise stark limitiert.

Weiters ist keine Aussage über die Größenverteilung der Partikel möglich. Es ist nur möglich den Messbereich, durch einen vorgeschalteten Partikelabscheider, auf bestimmte Partikelgrößen einzuschränken.

Diese Methode misst direkt die Masse der Partikel pro Volumen, ohne Annahmen über die Partikel wie z.B. deren Brechungsindex, Form oder Massendichte treffen zu müssen. Ein großer Einflussfaktor ist die Luftfeuchtigkeit, daher muss der Filter vor dem Wiegen geheizt bzw. getrocknet werden.

Diese Methode findet häufig bei Umweltmessstationen ihren Einsatz, um zum Beispiel die Feinstaubbelastung PM_{10} oder $PM_{2.5}$ zu bestimmen. Unter PM_{10} fallen jene Partikel bei denen der Aerodynamische Durchmesser kleiner als $10 \mu m$ ist.

2.3 Messgeräte

Es gibt viele unterschiedliche Messgeräte um Partikel zu analysieren, von mobilen Handgeräten bis hin zu teuren Referenzgeräten. Bei den hier vorgestellten handelt es sich ausschließlich um Laborgeräte.

2.3.1 Condensation Particle Counter (CPC)

Beim Condensation Particle Counter (CPC) handelt es sich um ein Messgerät zur Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration mit einem integrierendem Verfahren.

Im ersten Teil wird das Aerosol bei erhöhter Temperatur über einen getränkten Schwamm geleitet, als Betriebsmittel wird oft gasförmiges Butanol verwendet. Die Luft nimmt Butanol-dampf auf und es bildet sich ein Gemisch aus Partikel und Dampf.

Im Kondensator wird das Gemisch wieder abgekühlt, da kalte Luft weniger Butanol-Dampf aufnehmen kann, entsteht übersättigte Luft und es kommt zur Kondensation. Als Kondensationskeime dienen die Partikel, dadurch gewinnen sie an Größe und sind von der Optik leichter erfassbar. Die Effizienz des Kondensators hängt von dem Verhältnis der Geschwindigkeiten von Materialtransport zu Wärmeableitung ab.

Die Zähl-optik besteht aus einem Laser und einem Detektor, welcher bei Passieren eines Partikels das Streulicht erkennt, die Anzahl und Stärke gibt Aufschluss über die Partikelanzahl.

Nachteilig ist, dass die Größeninformation durch den Kondensationsprozess verloren geht. Die Zähl-optik kann auch nicht beliebig viele Partikel auflösen, da es bei hoher Konzentration zu Koinzidenzen kommen kann oder zu wenig Dampf vorhanden sein kann.

Die untere Messgrenze ist in erster Linie durch die eingestellten Temperaturdifferenzen im CPC definiert wobei es auch eine Abhängigkeit von der Partikelmorphologie und chemischen Zusammensetzung gibt. Bei sehr großen Partikeln kann der Verlust beim Transport zur Zähl-optik zu groß sein, je nach Ausführung wird ein Größenbereich von 3 nm bis $5\text{ }\mu\text{m}$ abgedeckt, im automotiven Umfeld ist ein Cut-off bei 23 nm typisch [2].

Der CPC findet sowohl in der Medizin als auch Umwelttechnik Anwendung. Um zusätzlich die Größenverteilung zu evaluieren, kann er mit einem differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) kombiniert werden, dann spricht man von einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), siehe Abschnitt 2.3.2.

2.3.2 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)

Wie vorhin erwähnt, setzt sich der Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) aus einem differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA) und einem Condensation Particle Counter (CPC) zusammen. Mit dem DMA können Partikel einer bestimmten elektrischen Mobilität aus dem Aerosol selektiert werden, beeinflusst wird dies durch die Geometrie des Aufbaus und der angelegten elektrischen Spannung [2].

Zu Beginn werden sehr große Partikel durch den Impaktor herausgefiltert, das Aerosol getrocknet und neutralisiert, damit die Boltzmann Ladungsverteilung sichergestellt wird. Kleine Partikel tragen meist keine oder eine (positive oder negative) Ladung, größere können auch höher geladen sein. Kern des Aufbaus ist ein Zylinderkondensator, in dessen Inneren eine laminare Strömung gefilterter Luft, dem Shear-Volumenstrom herrscht.

Durch den Aerosoleinlass, welcher sich an der Außenwand des oberen Ende des Zylinders befindet, werden Partikel in den Luftstrom injiziert und durch ihn nach unten getragen. Liegt eine Spannung zwischen Außen- und Innenelektrode an, so werden sie je nach Ladung von einer der beiden Elektroden angezogen.

Am unteren Ende der Innenelektrode befindet sich ein ringförmiger Auslass, an diesen gelangen nur Partikel mit dem ausgewählten elektrischen Mobilitätsdurchmesser, da kleine bereits oberhalb mit der Innenelektrode kollidieren und große vom Luftstrom weiter nach unten getragen werden. Der Zusammenhang der elektrischen Mobilität Z_p und der angelegten Spannung U ist in Gleichung (2.1) angegeben [12].

$$U = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)}{2\pi \cdot l \cdot Z_p} \quad (2.1)$$

Wobei Q der Volumenstrom ist und r_a , r_i und l die Geometrie der Elektrodenröhre beschreiben.

Das monodisperse Aerosol des Auslasses wird anschließend einer Zählereinheit z.B. einem CPC zugeführt. Durch Variieren der Spannung und gleichzeitigem Zählen kann ein Scann durchgeführt werden und die Größenverteilung analysiert werden.

Eine Fehlerquelle stellen Doppelladungen dar, hierbei bleiben zwei anstatt nur einer Ladung am Partikel haften, dadurch wird es stärker von der Elektrode angezogen und verfälscht somit den Zusammenhang von Spannung und Mobilität.

2.3.3 Aerodynamic Particle Sizer (APS)

Wie der Name bereits verrät, gibt der Aerodynamic Particle Sizer (APS) den Durchmesser einer Kugel an, welche gleiches aerodynamisches Verhalten wie das Partikel aufweist. Mit dem APS ist das Zählen der Partikel und bestimmen derer Größe in nur einem Schritt möglich.

Von dem eingesaugtem Aerosol passiert $\frac{1}{5}$ die innere Düse, der Rest wird gefiltert und gelangt als Sheat-Volumenstrom durch die äußere Düse zur Zähloptik. Die Partikel werden nach der inneren Düse vom Sheat-Volumenstrom erfasst und dadurch beschleunigt.

Die Zähloptik besteht aus zwei Laserstrahlen mit einem Detektor. Jedes Partikel erzeugt zwei Impulse, daraus kann dessen Flugzeit gemessen werden. Da große Partikel auf Grund deren Trägheit weniger stark beschleunigt werden, kann aus der Flugzeit die Partikelgröße berechnet werden.

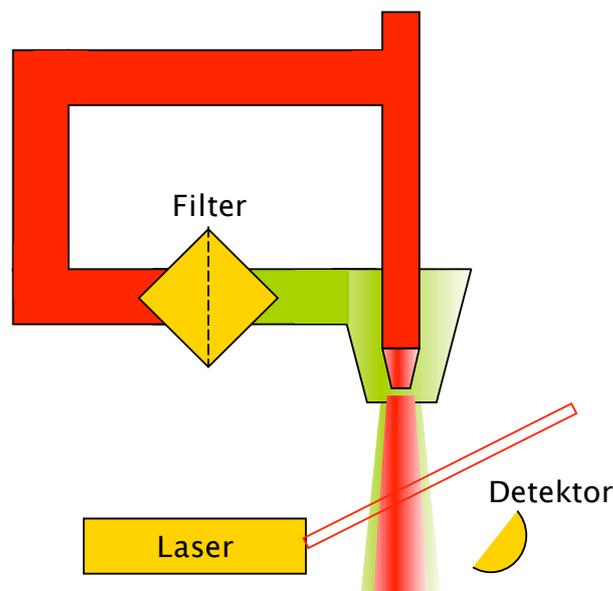


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau eines APS

Die Bestimmung mit dieser Methode ist vom Brechungsindex und Streulicht weitgehend unabhängig, dafür spielt aber die Dichte eine Rolle. Der Messbereich erstreckt sich von 500 nm bis $20\ \mu\text{m}$, die maximale Konzentration liegt bei etwa $1000\ \frac{\#}{\text{cm}^3}$ darüber hinaus würde es zu Überlagerungen der Doppelpulse kommen.

Analytische Betrachtung

3.1 Interferometer

Ein Interferometer ist ein Messgerät zur Bestimmung von Änderungen der Länge und Brechungsindizes mit höchster Präzision, das breite Anwendung in der Messtechnik findet. Hier sollen exemplarisch zwei Aufbauten vorgestellt werden. Das Mach-Zehnder Interferometer, als allgemeines Beispiel um Grundprinzipien abzuleiten und das Fabry-Perot Interferometer da es einige Vorteile gegenüber dem Mach-Zehnder Interferometer bietet und in weiterer Folge im Experiment Bedeutung erlangt.

3.1.1 Kohärenz und Interferenz

Die Theorie der Interferenz basiert auf dem Superpositionsprinzip, bei Überlagerung mehrerer Feldern kann durch bilden der Vektorsumme das resultierende Feld berechnet werden.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 + \dots \quad (3.1)$$

Und an einem ortsfesten Punkt ist die Intensität durch

$$I = |\mathbf{E}|^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \quad (3.2)$$

gegeben. Überlagerte Felder können gegenseitig abhängig ihrer Phasenlage verstärkt oder bis hin zum auslöschen, abgeschwächt werden. Dazu ist es notwendig das die Felder bzw. deren Quellen zeitlich stabil sind und einen festen Phasenbezug aufweisen.

Eine reale Lichtquelle emittiert Photonen, diese können als Wellenzüge eines oszillierenden Feldes, welches willkürlich seine Phase ändert, aufgefasst werden. Das Intervall in dem sich ein Wellenpaket als Sinusschwingung beschreiben lässt, wird als Kohärenzzeit bezeichnet. Durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich aus der Kohärenzzeit, die Kohärenzlänge berechnen [13].

Im Bezug auf die Interferometrie gilt die Voraussetzung, dass die Kohärenzlänge größer als die Wegstreckendifferenz ist, um Interferenz beobachten zu können [14].

Die für eine destruktive Interferenz notwendige Phasenverschiebung kann entweder durch geometrische Längenunterschiede oder durch optisch unterschiedliche Medien zustande kommen.

3.1.2 Mach-Zehnder Interferometer

3.1.2.1 Aufbau

Bei einem Mach-Zehnder Interferometer, wie es in Abb. 3.1 zu sehen ist, befinden sich zwischen Lichtquelle und Detektor ein Mess- und ein Referenzarm. Durch einen halbdurchlässigen Spiegel M_1 wird der Lichtstrahl aufgeteilt, ein Teil durchdringt die Messkammer und interagiert somit mit dem darin befindlichem Medium, der restliche Teil gelangt über den Referenzarm zum zweiten halbdurchlässigen Spiegel M_2 . An diesem wird jeweils die halbe Intensität der Lichtstrahlen miteinander überlagert und an den Detektor projiziert.

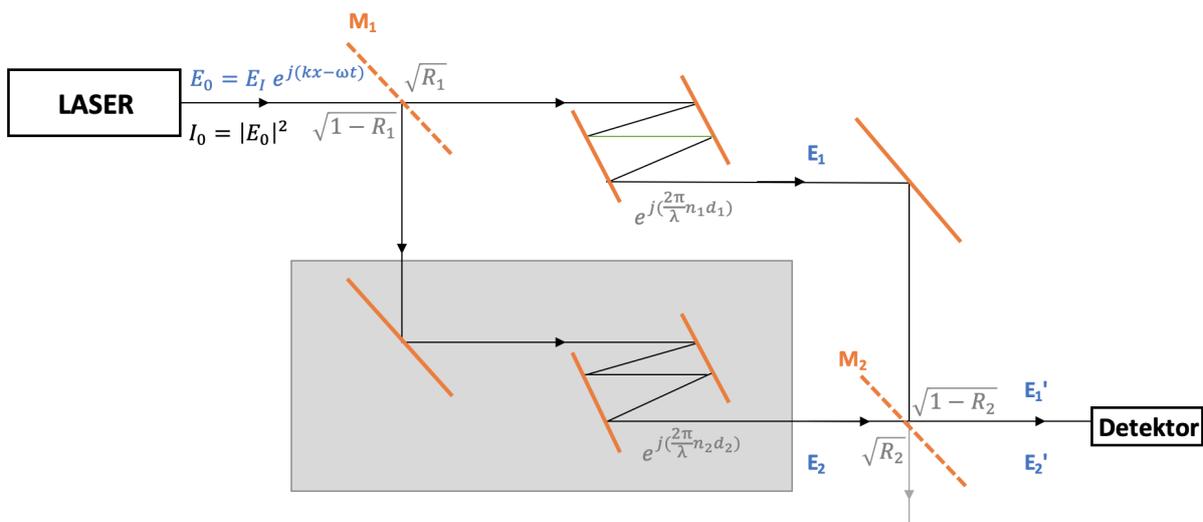


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau eines Mach-Zehnder Interferometers. Die orange Linien symbolisieren die Spiegel.

Befinden sich beide Lichtstrahlen in Phase wird der höchste Ausschlag am Detektor erzielt. Sind sie um 180° Phasenverschoben, löschen sie sich gegenseitig aus und es wird keine Intensität am Detektor festzustellen sein. Die Phasenverschiebung entsteht nun durch unterschiedliche optische Weglängen von Mess- und Referenzarm. Dieser Unterschied kann durch geometrische Veränderung der Spiegelanordnung erzielt werden, bei starren Systemen ist er auf die Änderung des Brechungsindex des Mediums zurückzuführen.

3.1.2.2 Berechnung der Intensität

Das elektromagnetische Feld der Quelle, kann mit der Wellengleichung

$$\mathbf{E}_0(t, x) = E_I \cdot e^{j(kx - \omega t)} \quad (3.3)$$

beschrieben werden, kx beschreibt die räumliche und ωt die zeitliche Ausbreitung.

Somit lässt sich die Amplitude nach dem Messarm mittels

$$\mathbf{E}_1' = E_I \cdot \sqrt{R_1} \sqrt{1 - R_2} \sqrt{S} \cdot e^{j(kx - \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1)} \quad (3.4)$$

und nach dem Referenzarm mittels

$$\mathbf{E}_2' = E_I \cdot \sqrt{R_2} \sqrt{1 - R_1} \sqrt{S} \cdot e^{j(kx - \omega t + \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2)} \quad (3.5)$$

berechnen.

Wobei R_1 und R_2 die Reflexionskoeffizienten der Spiegel M_1 und M_2 entsprechen und S die Einflüsse von Streuung und Absorption berücksichtigt. Die Wertebereiche liegen jeweils zwischen 0 und 1, wobei bei $R = 1$ alles reflektiert und bei $S = 0$ alles gestreut wird. λ ist die Wellenlänge der Lichtquelle, d der Abstand der Spiegel und n der Brechungsindex des darin befindlichen Mediums.

Die Intensität am Eingang ist somit

$$I_0 = |\mathbf{E}_0|^2 = \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_0^* = E_I^2 \quad (3.6)$$

am Detektor lässt sie sich folgendermaßen berechnen:

$$I_D = |\mathbf{E}_1' + \mathbf{E}_2'|^2 = (\mathbf{E}_1' + \mathbf{E}_2') \cdot (\mathbf{E}_1'^* + \mathbf{E}_2'^*) \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}
 I_D &= E_I^2 \cdot (\sqrt{R_1}\sqrt{1-R_2}\sqrt{S} \cdot e^{j(kx-\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}n_1d_1)} + \sqrt{R_2}\sqrt{1-R_1}\sqrt{S} \cdot e^{j(kx-\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}n_2d_2)}) \\
 &\quad \cdot (\sqrt{R_1}\sqrt{1-R_2}\sqrt{S} \cdot e^{-j(kx-\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}n_1d_1)} + \sqrt{R_2}\sqrt{1-R_1}\sqrt{S} \cdot e^{-j(kx-\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}n_2d_2)}) \\
 &= E_I^2 \cdot \{R_1(1-R_2)S + \sqrt{R_1R_2}\sqrt{1-R_1}\sqrt{1-R_2}S \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(n_1d_1-n_2d_2)} \\
 &\quad + R_2(1-R_1)S + \sqrt{R_1R_2}\sqrt{1-R_1}\sqrt{1-R_2}S \cdot e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(n_1d_1-n_2d_2)}\} \\
 &= E_I^2 \cdot \{R_1(1-R_2)S + R_2(1-R_1)S + \sqrt{R_1R_2}\sqrt{1-R_1}\sqrt{1-R_2}S \cdot 2 \cdot \cos(\frac{2\pi}{\lambda}(n_1d_1-n_2d_2))\}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Für den Spezialfall $R_1 = R_2 = R$ erhält man

$$\begin{aligned}
 I_D &= I_0 \cdot 2R(1-R)S \cdot \{1 + \cos(\frac{2\pi}{\lambda}(n_1d_1-n_2d_2))\} \\
 &= \underline{I_0 \cdot 4R(1-R)S \cdot \cos^2(\frac{\pi}{\lambda}(n_1d_1-n_2d_2))}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

3.1.3 Fabry-Perot Interferometer

3.1.3.1 Aufbau

Beim Fabry-Perot Interferometer, Abb. 3.2, werden im Gegensatz zum Mach-Zehnder Interferometer nur zwei parallel angeordnete halb-durchlässige Spiegel M_1 und M_2 verwendet, hier ist kein Referenzarm notwendig. Der Lichtstrahl wird in der im Bild linken Seite eingekoppelt, der Detektor kann auf der rechten Seite platziert werden und die Intensität I_1 messen oder sich wie im vorliegenden Fall Lichtquellen-seitig befinden, dann setzt sich die gemessene Intensität I_D aus der direkt reflektierten Intensität I_2 und der aus der Cavity austretenden Intensität I_3 zusammen.

Befindet sich der Lichtstrahl erst in der Messkammer, wird er dort abwechselnd an den beiden Spiegeln M_1 und M_2 reflektiert, wobei bei jeder Reflexion die Amplitude um $\sqrt{R_1}$ bzw. $\sqrt{R_2}$ abgeschwächt wird und ein Teil der Strahlung aus der Kammer austritt. Zusätzlich kommt es, abhängig des Abstandes d der Spiegel und des Brechungsindizes n des darin befindlichen Mediums zu einer Phasenverschiebung.

Das resultierende Feld kann als Summe aller austretenden Teilwellen, welche sich sowohl in der Amplitude als auch Phase unterscheiden, aufgefasst werden. Diese müssen Phasen richtig addiert werden und durch bilden des Betragsquadrat erhält man die Intensität.

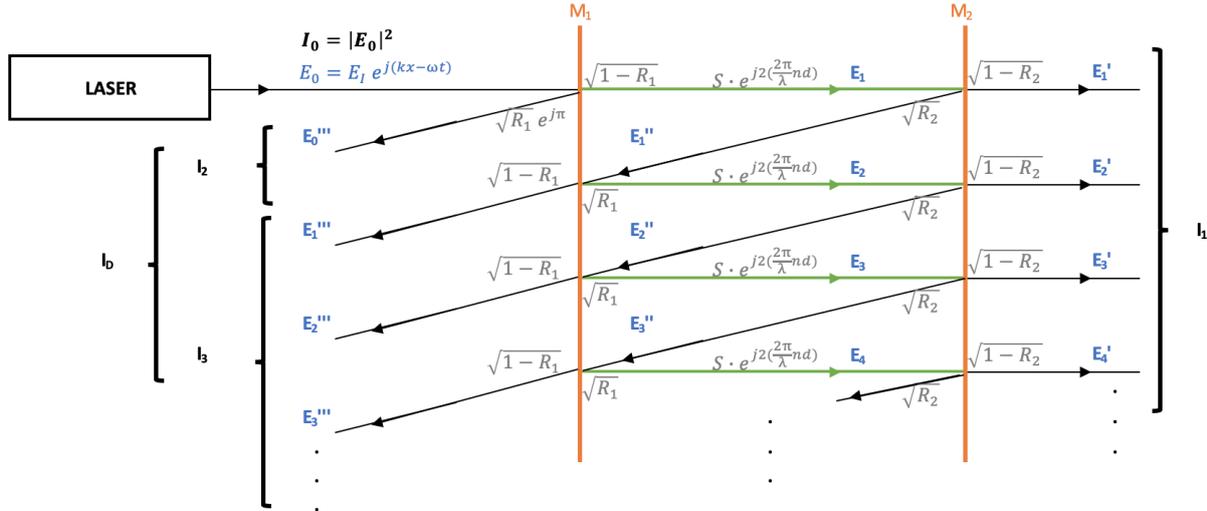


Abbildung 3.2: Prinzipskizze eines Fabry-Perot Interferometer.

3.1.3.2 Berechnung der Intensitäten

Im Folgenden wird der Fall in dem sich der Detektor Quellen-seitig befindet betrachtet und am Eingang wiederum ein elektromagnetisches Feld der Form

$$\mathbf{E}_0 = E_I \cdot e^{j(kx-\omega t)} \quad (3.10)$$

angenommen.

Der direkt reflektierte Teil wird um $\sqrt{R_1}$ abgeschwächt und dessen Phase um π gedreht.

$$\mathbf{E}_0''' = E_I \cdot e^{j(kx-\omega t)} \cdot \sqrt{R_1} \cdot e^{j\pi} \quad (3.11)$$

Der Lichtstrahl wird beim passieren des Spiegels M_1 um $\sqrt{1-R_1}$ abgeschwächt, dies wiederfährt jedem Teilstrahl einmal beim ein- und einmal beim austreten des Interferometers, somit ergibt sich der Faktor $(1-R_1)$.

Der i -te Teilstrahl wird i -mal an M_2 und $i-1$ mal an M_1 reflektiert. Die Weglänge ist $2d$ somit ergibt sich eine Phasenverschiebung um $2\frac{2\pi}{\lambda}nd$ und die Amplitude wird durch Streuung und Absorption um \sqrt{S} abgeschwächt.

$$\mathbf{E}_i''' = E_I \cdot e^{j(kx-\omega t)} \cdot (1-R_1) \cdot \frac{(\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j(2\frac{2\pi}{\lambda}nd)})^i}{\sqrt{R_1}}, \quad \forall i > 0 \quad (3.12)$$

Mit Hilfe der geometrischen Reihe Gl.3.13 lässt sich die Summe der Teilstrahlen in geschlossener Form anschreiben:

$$\sum_{i=1}^{\infty} a^i = \frac{-a}{a-1}, \quad \forall |a| < 1 \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{E}_i''' = E_I \cdot \frac{(1 - R_1)}{\sqrt{R_1}} \cdot e^{j(kx - \omega t)} \cdot \frac{-\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j(2\frac{\pi}{\lambda} nd)}}{\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j2(\frac{2\pi}{\lambda} nd)} - 1} \quad (3.14)$$

Mit dem Detektor kann allerdings nur die Intensität und nicht das elektromagnetische Feld mit Phaseninformation direkt festgestellt werden, dieser kann folgendermaßen berechnet werden:

Intensität am Eingang

$$I_0 = |\mathbf{E}_0|^2 = \mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{E}_0^* = E_I^2 \quad (3.15)$$

Intensität am Detektor

$$I_D = \left| \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{E}_i''' \right|^2 = \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{E}_i''' \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \mathbf{E}_i'''^* \quad (3.16)$$

Setzt man 3.10 und Gl.3.10 unter Verwendung der Abkürzungen

$$2\delta = 2\frac{2\pi}{\lambda} nd \quad (3.17)$$

und

$$\alpha = kx - \omega t \quad (3.18)$$

in Gl.3.16 ein, erhält man:

$$\begin{aligned} I_D &= E_I^2 \cdot \left[\sqrt{R_1} \cdot e^{j(\alpha + \pi)} - \frac{\sqrt{R_2 S}(1 - R_1)e^{j(\alpha + 2\delta)}}{\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j2\delta} - 1} \right] \cdot \left[\sqrt{R_1} \cdot e^{-j(\alpha + \pi)} - \frac{\sqrt{R_2 S}(1 - R_1)e^{-j(\alpha + 2\delta)}}{\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{-j2\delta} - 1} \right] \\ &= E_I^2 \cdot \left[R_1 - \frac{\sqrt{R_1 R_2 S}(1 - R_1)e^{-j(2\delta - \pi)}}{\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{-j2\delta} - 1} - \frac{\sqrt{R_1 R_2 S}(1 - R_1)e^{j(2\delta - \pi)}}{\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j2\delta} - 1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_2 S(1 - R_1)^2}{R_1 R_2 S - \sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{j2\delta} - \sqrt{R_1 R_2 S} \cdot e^{-j2\delta} + 1} \right] \quad (3.19) \end{aligned}$$

Durch konjugiert komplex erweitern der mittleren beiden Terme erhält man einen gemeinsamen Nenner Gl.3.21, dieser kann mit der Eulerschen Formel Gl.3.20 umgeformt werden.

$$\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \quad (3.20)$$

$$A = R_1 R_2 S - 2\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot \cos(2\delta) + 1 \quad (3.21)$$

$$I_D = E_I^2 \cdot \left[R_1 + \frac{-R_1 R_2 S(1 - R_1) \cdot e^{j\pi} + \sqrt{R_1 R_2 S}(1 - R_1) \cdot e^{-j(2\delta - \pi)}}{A} \right. \\ \left. + \frac{-R_1 R_2 S(1 - R_1) \cdot e^{-j\pi} + \sqrt{R_1 R_2 S}(1 - R_1) \cdot e^{j(2\delta - \pi)} + R_2 S(1 - R_1)^2}{A} \right] \quad (3.22)$$

Hier kann wieder die Eulersche Formel Gl.3.20 angewandt werden und da $\cos(\pi) = 1$ und $\cos(x - \pi) = -\cos(x)$ gilt entsprechend vereinfacht werden.

$$I_D = E_I^2 \cdot \left[R_1 + \frac{R_1 R_2 S(1 - R_1) \cdot 2 - \sqrt{R_1 R_2 S}(1 - R_1) \cdot 2\cos(2\delta) + R_2 S(1 - R_1)^2}{A} \right] \\ = E_I^2 \cdot \frac{R_1 + R_2 S - 2\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot \cos(2\delta)}{R_1 R_2 S - 2\sqrt{R_1 R_2 S} \cdot \cos(2\delta) + 1} \quad (3.23)$$

Für den Spezialfall das $R_1 = R_2 = R$, $S = 1$ und der Beziehung

$$1 - \cos(2x) = 2\sin^2(x) \quad (3.24)$$

kann noch weiter auf

$$I_D = E_I^2 \cdot \frac{2R - 2R\cos(2\delta)}{R^2 - 2R \cdot \cos(2\delta) + 1} \\ = E_I^2 \cdot \frac{2R(1 - \cos(2\delta))}{R^2 + 1 - 2R + 2R - 2R \cdot \cos(2\delta)}$$

$$I_D = I_0 \cdot \frac{4R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}nd\right)}{(R - 1)^2 + 4R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda}nd\right)} \quad (3.25)$$

umgeformt werden.

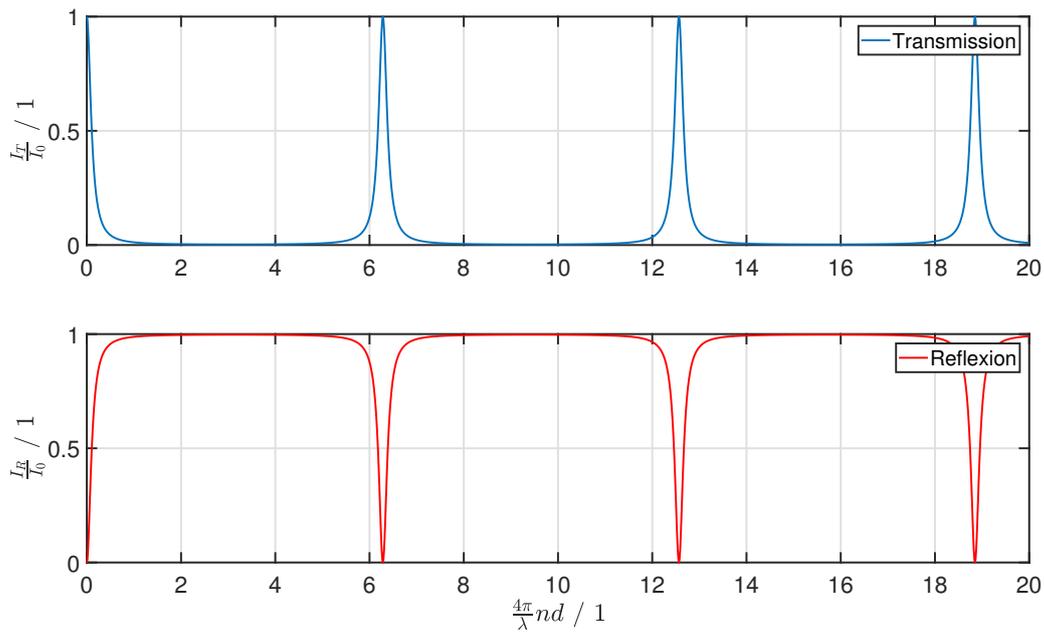


Abbildung 3.3: Intensität der Transmission und Reflexion eines Fabry-Perot Interferometers.

3.1.3.3 Vergleich mit Literatur

Entsprechend der Intensität welche Quellen-seitig reflektiert wird muss auf der anderen Seite transmittiert werden, Gleichung (3.26).

Für die Beschreibung wurden die Vereinfachungen, dass beide Spiegel den gleichen Reflexionskoeffizienten besitzen und keine Streuung auftritt, getroffen:

$$R_1 = R_2 = R, \quad S = 1$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{E_I^2 \cdot (1 - R)^2}{R^2 - 2R \cdot \cos\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right) + 1} = \frac{E_I^2 \cdot (1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right)} & (3.26) \\
 &= \frac{E_I^2}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda}\right)} = \frac{I_0}{1 + F \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)}
 \end{aligned}$$

wobei die Finesse

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2} \quad (3.27)$$

ist und

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta s}{\lambda} = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (3.28)$$

gilt. Die unter Abschnitt 3.1.3.2 gezeigte Herleitung stimmt für diesen Fall mit Gleichung (3.26) überein. [13]

3.2 Interferometrische Partikeldetektion

Befindet sich ein Partikel der Größe d_p im Messraum, treten zwei untrennbare Effekte auf. Zum einen wird ein gewisser Teil am Partikel gestreut und zum anderen wird der Laserstrahl, auf Grund des unterschiedlichen Brechungsindex eine Phasenverschiebung erfahren, welche durch ein Interferenzmuster am Ausgang sichtbar wird.

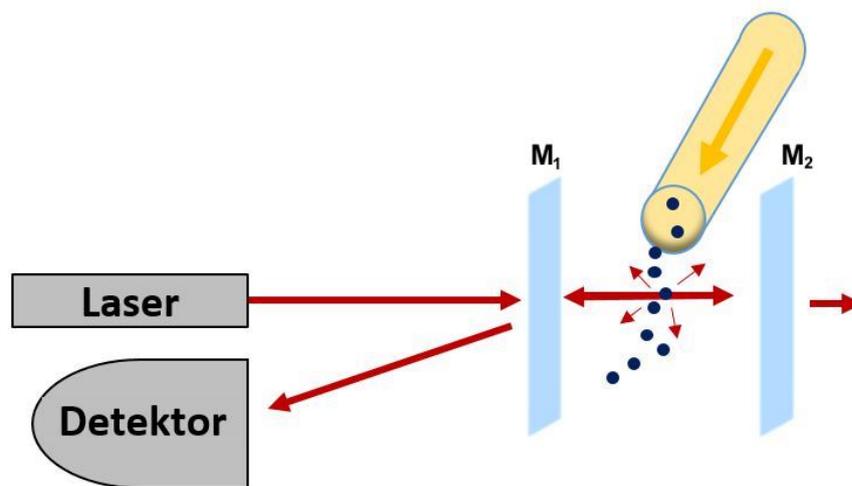


Abbildung 3.4: Aufbau um interferometrisch Partikel zu detektieren.

Um eine Partikelmessung praktisch umzusetzen, ist es nötig das Aerosol mit einer Düse auf einen Punkt zu konzentrieren um es somit durch den Laserstrahl des Interferometers zu leiten, wie in Abb. 3.4 ersichtlich.

3.2.1 Interferenz

Das Partikel weist einen anderen Brechungsindex als die Umgebungsluft auf, aufgrund der veränderten optischen Weglänge im Interferometer, kommt es zu einer Phasenverschiebung und am Detektor ändert sich die Intensität.

Dies lässt sich berechnen indem in die beiden Gleichungen (3.9) und (3.25)

$$I_D = E_I^2 \cdot 2R(1 - R)S \cdot \left\{ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(n_1d_1 - n_2d_2)\right) \right\}$$

$$I_D = I_0 \cdot \frac{4R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1\right)}{(R-1)^2 + 4R \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1\right)}$$

für den Ausdruck $n_1 d_1$, $n_p d_p + n_1 \cdot (d_1 - d_p)$ eingesetzt wird, über die Länge des Partikels d_p wird der Brechungsindex des Partikels n_p vorgegeben. Da sich die Gesamtlänge nicht ändert bleibt der Brechungsindex über die restliche Länge $d_1 - d_p$ gleich n_1 . Dabei ist darauf zu achten dass diese Formeln nur einen Punkt beschreiben, im vorliegenden Fall ist der gesamte Querschnitt des Partikels zu betrachten, über den sich der optische Weg ändert. Da sich der Brechungsindex bezogen auf die Fläche des Lasers in einem nur sehr kleinen Bereich ändert muss die Sensitivität des Interferometers entsprechend hoch sein.

Für den Betrieb des Interferometers sind verschiedene Arbeitspunkte möglich, betrachtet wird jener Fall in dem das Interferometer in Reflexion betrieben wird. Eine Möglichkeit ist der Punkt an dem die zweite Ableitung nach $\frac{2\pi}{\lambda} n d$ Null ist, siehe Abb. 3.12. Hier ist die Steigung am höchsten, damit wird die größte Empfindlichkeit für akustische Schallwellen erzielt, siehe Abschnitt 3.3.

Nachdem durch Partikel der Brechungsindex im Vergleich zur Umgebungsluft typischer Weise nur erhöht und nicht verringert wird, ist es am besten den Arbeitspunkt in destruktiver Interferenz festzulegen, also so, dass keine bzw. minimale Intensität messbar ist, wenn sich kein Partikel im Laserstrahl befindet.

Wird als Arbeitspunkt jener Punkt gewählt an dem ein Maximum vorliegt, so ändert sich das Ausgangssignal bei einbringen eines Partikels nur geringfügig. Die Differenz des Reflexionskoeffizienten R und der Kurve in Abb. 3.5 spannt eine Fläche auf, das Ausgangssignal wird durch Integration der Fläche gebildet und ist in diesem Fall nur sehr gering, da nur kurze Spitzen aufsummiert werden.

Zu beachten ist in Abb. 3.5 die Periodizität, welche insbesondere beim Mach-Zehnder Interferometer zu einem mehrdeutigen Ergebnis führen kann. Die weiteren Auswirkungen sollen in Abb. 3.8 veranschaulicht werden.

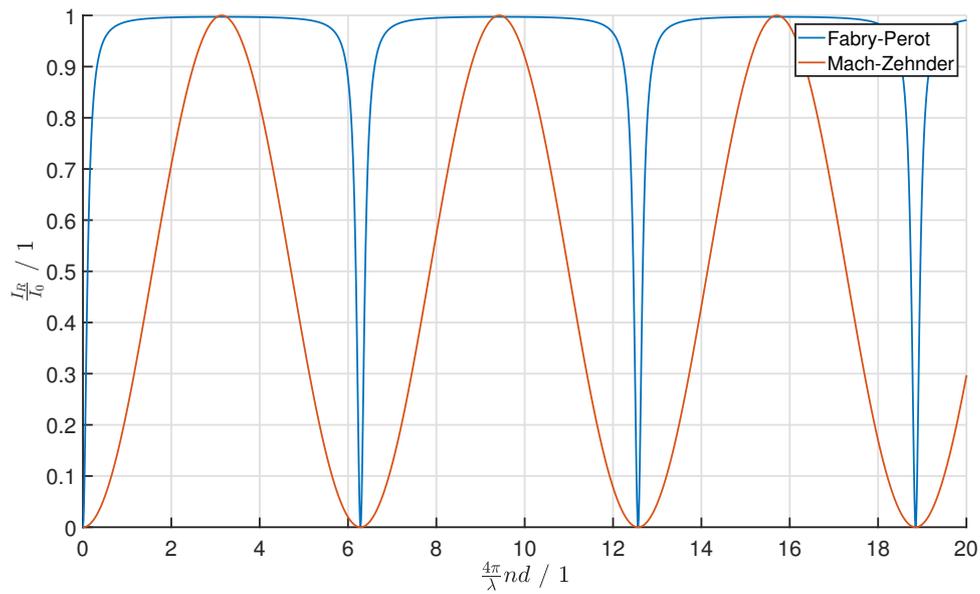


Abbildung 3.5: Vergleich der Intensitäten von Mach-Zehnder und Fabry-Perot in Reflexion.

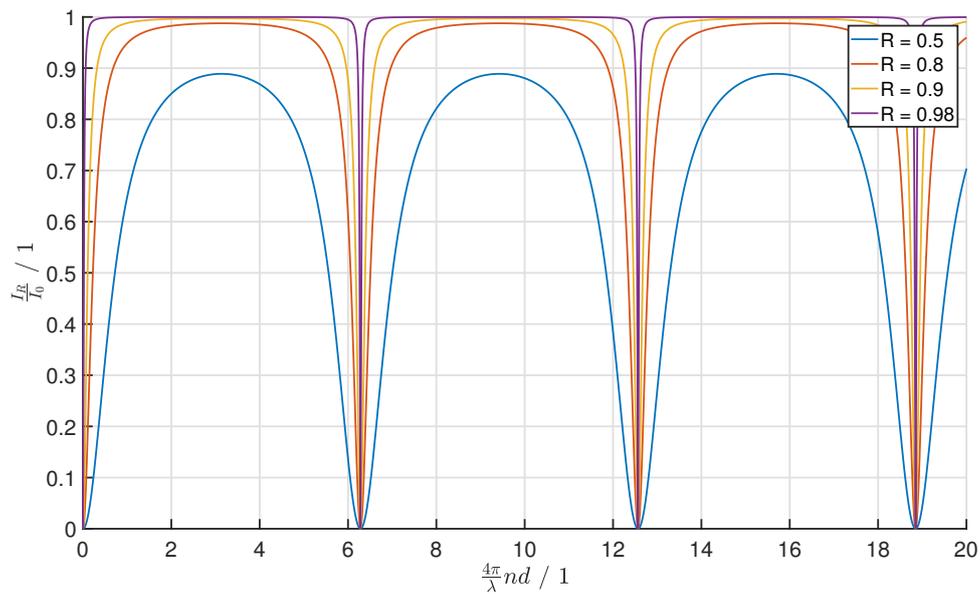


Abbildung 3.6: Reflexionsfunktion eines Fabry-Perot Interferometers mit verschiedenen Reflexionskoeffizienten R .

In Abb. 3.6 sind die Intensitätsverläufe des Fabry-Perot Interferometers mit unterschiedlichen Reflexionskoeffizienten dargestellt. Je höher der Reflektivität ist, desto steiler sind die Flanken, man spricht von einer hohen Finesse.

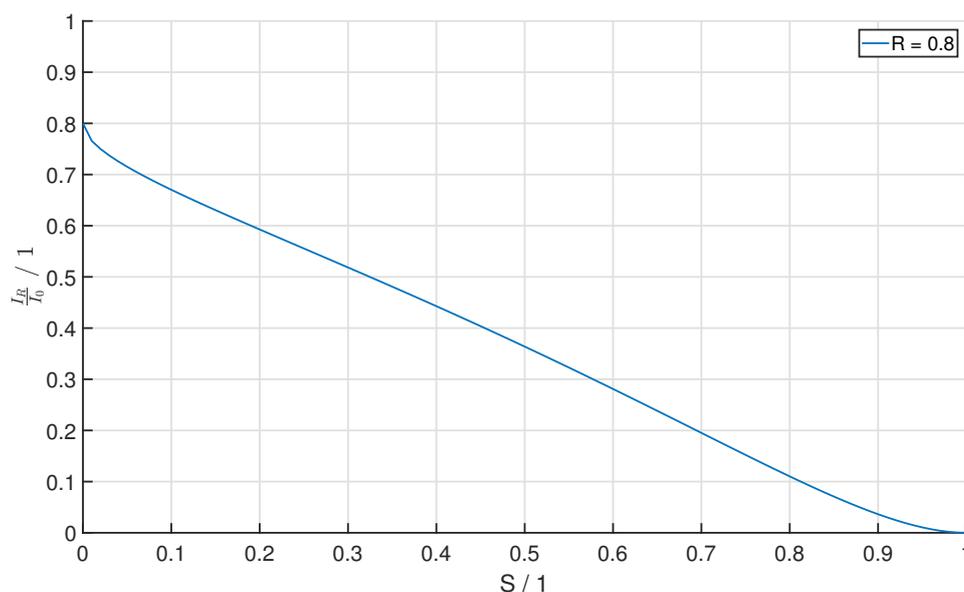


Abbildung 3.7: Streuung und Absorption.

Der Einfluss der Streuung und Absorption wird in den vorherigen Berechnungen mit S berücksichtigt, wobei $S = 0$ bedeutet dass die gesamte Intensität gestreut oder absorbiert wird. Das Interferometer befindet sich in destruktiver Interferenz, tritt Streuung oder Absorption auf, so steigt die Intensität am Detektor bis zu einem Maximalwert, welcher von den Reflexionskoeffizienten der Spiegel R abhängt, siehe Abb. 3.7.

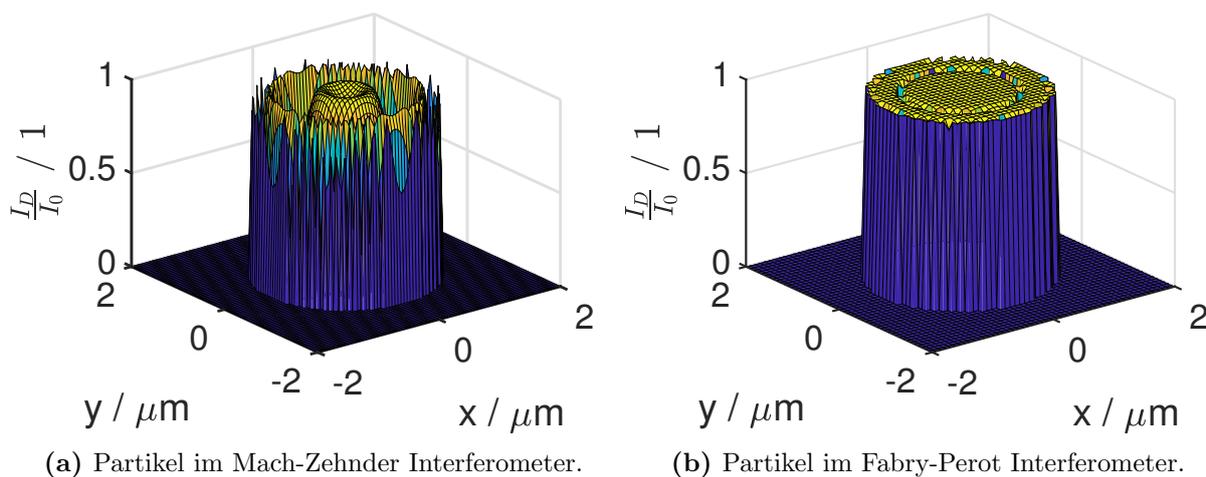


Abbildung 3.8: Intensität über den Querschnitt eines Partikels der Größe von $2.5 \mu\text{m}$, bedingt durch unterschiedliche Weglängen durch das Partikel.

Infolge der Tatsache, dass die Täler in Abb. 3.8b weniger ausgebreitet sind als in Abb. 3.8a, steigt sowohl die Intensität als auch die Eindeutigkeit. Die daraus resultierenden ku-

mulierten Intensitäten über die gesamte Fläche als Funktion der Partikelgröße, sind in Abb. 3.9 abgebildet. Die Kurve des Mach-Zehnder Interferometer weist periodisch sehr flache Stücke auf, dadurch kann die Partikelgröße nicht eindeutig bestimmt werden. Beim Fabry-Perot Interferometer ist dies nicht so deutlich zu sehen, ausschlaggebend hierfür ist eine hohe Finesse.

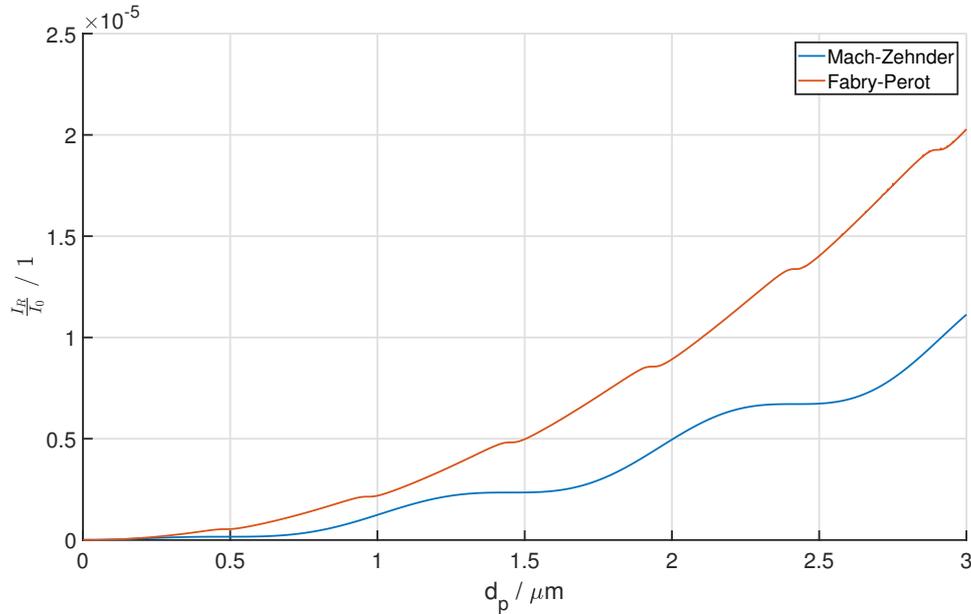


Abbildung 3.9: Vergleich der kumulierten Intensitäten von Mach-Zehnder und Fabry-Perot Interferometern in Abhängigkeit der Partikelgröße. Für das Partikel wurde ein Brechungsindex $n_p = 1.55$ angenommen, der Laser hat einen Durchmesser von $d_L = 300 \mu\text{m}$ und eine Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$.

3.2.2 Streuung

Um den Einfluss der Streuung zu ermitteln, wurden mit der Software MiePlot [15] verschiedene Partikelgrößen simuliert. Das frei erhältliche Programm berechnet die gestreute Intensität als Funktion von Partikelgröße, Brechungsindex und Wellenlänge des einfallenden Lichtes.

In Abb. 3.10 ist das Streulicht in Abhängigkeit des Winkels aufgetragen, bei einem herkömmlichen Streulichtdetektor wird typischerweise das Integral der Intensität über einen schmalen Winkel gebildet. Bei der interferometrischen Methode wird die Differenz eines Referenzstrahls und dem Messstrahl gebildet. Somit scheint im Ergebnis jener Teil auf, welcher in alle Richtungen gestreut wird und dementsprechend nicht an den Detektor

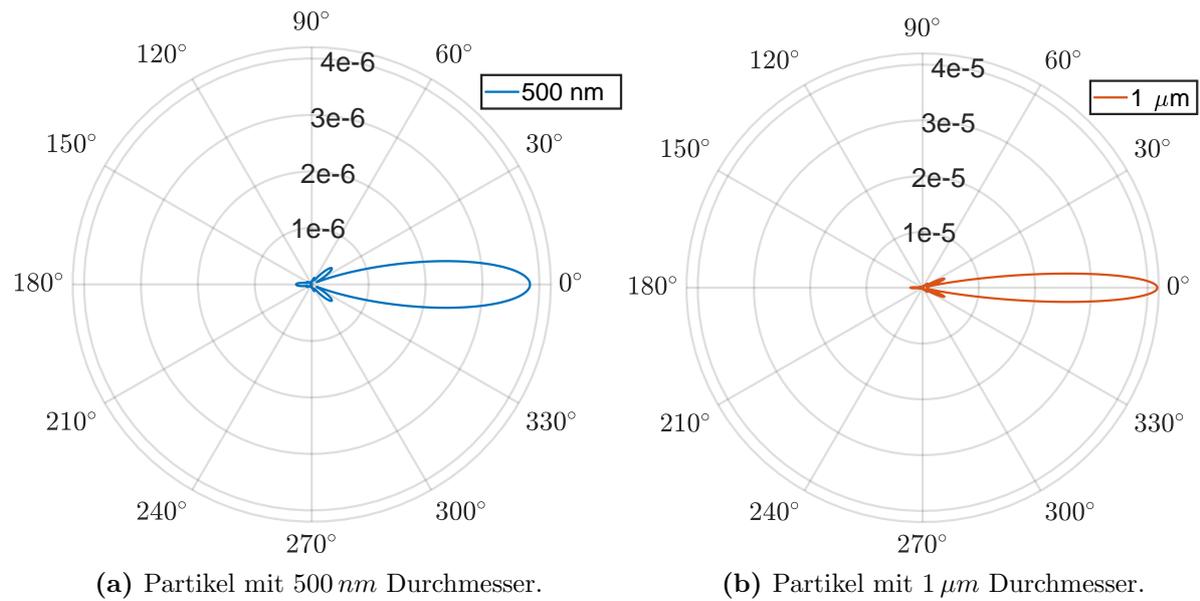


Abbildung 3.10: Streulicht bezogen auf die in Abhängigkeit des Winkels bei verschiedenen Partikelgröße [15]

gelangen kann. Folglich ist der Messausschlag auch größer und möglicherweise können damit kleinere Partikel auch detektiert werden.

Um den Effekt der Streuung mit dem Phaseneffekt näherungsweise vergleichen zu können, wurden die Intensitäten aller Winkel aufsummiert. In Abb. 3.11 sind beide Effekte in Abhängigkeit der Partikelgröße dargestellt.

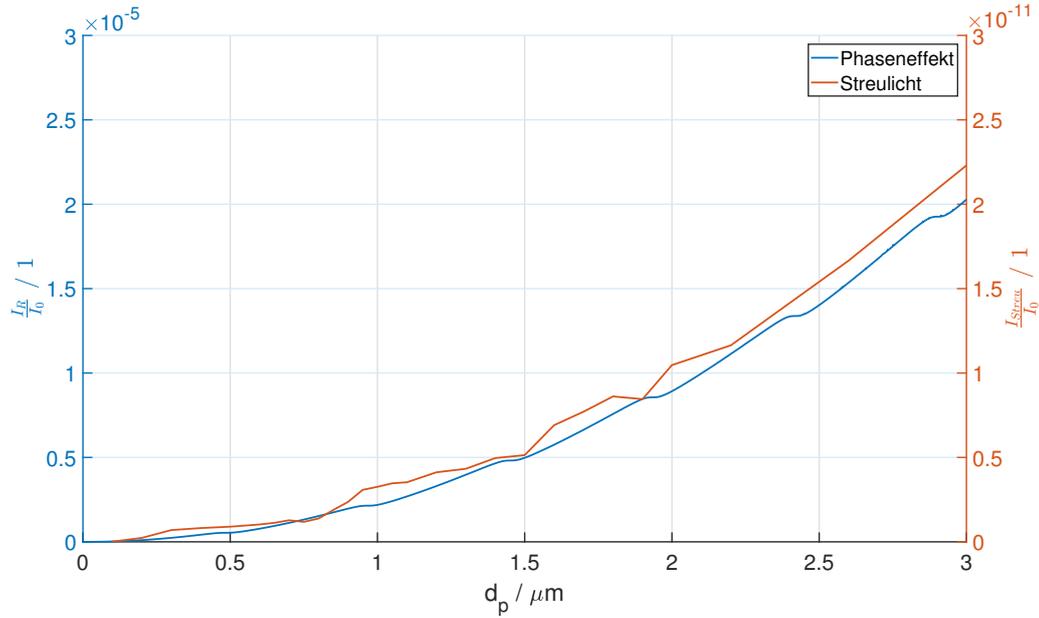


Abbildung 3.11: Kumulierte Mie Streuung (über alle Winkel) verglichen mit der kumulierten Intensität eines Fabry-Perot Interferometer in Reflexion ($R = 0.8$, $\lambda = 532 \text{ nm}$, $n_p = 1.55$) in Abhängigkeit der Partikelgröße.

3.3 Optisches Mikrofon

Das optische Mikrofon *Eta250* der Firma Xarion zeichnet sich dadurch aus, dass es keine Membran besitzt. Bei diesem Messprinzip wird die akustische Schallwelle nicht auf eine mechanische Auslenkung übertragen wie bei herkömmlichen Schallwandlern. Dadurch können Schallwellen von einer Frequenz bis zu 1 MHz erfasst werden.

Die Schallwelle, welche einem zeitlich veränderlichen Druck entspricht, kann gemessen werden, da sich der Brechungsindex n von Luft als Funktion des Druckes wie folgt ändert [16]:

$$\frac{dn}{dp} = 3 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{Pa}} \quad (3.29)$$

Der Sensorkopf besteht aus einem Fabry-Perot Etalon, in diesem Fall sind zwei Spiegel im Abstand von ca. 1.3 mm starr miteinander verbunden. Somit ist der Abstand d konstant und es können kleinste Änderungen des Brechungsindex n festgestellt werden.

Mit einer Glasfaser wird der Sensorkopf mit dem Laser verbunden, daher ist es

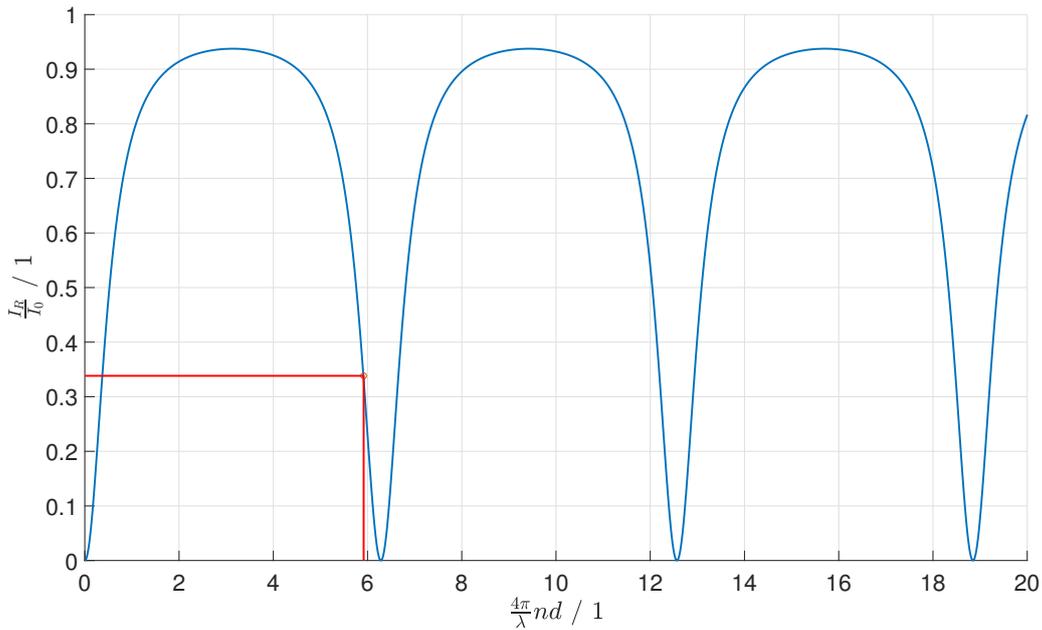


Abbildung 3.12: Arbeitspunkt des optischen Mikrofons mit geschätzten Reflektionskoeffizienten von $R = 0.95$

Darüber hinaus verfügt das Mikrofon über einen durchstimmbaren Laser, damit eine Arbeitspunktstabilisierung realisiert werden kann. Dazu sind zwei überlagerte Regelkreise notwendig. Einer für das Ausgleichen der atmosphärischen Luftdruckschwankungen und ähnlichen langsamen äußeren Einflüssen und ein Zweiter welcher schnellere Druckänderungen kompensiert.

Das Interferometer wird in Reflexion betrieben, wie in Abb. 3.12 zu sehen ist, befindet sich der Arbeitspunkt in jenem Punkt in dem die zweite Ableitung Null ist, dadurch wird die Empfindlichkeit maximiert und das Signal hat einen, zumindest in einem kleinen Bereich, linearen Zusammenhang mit dem Druck. Mit zunehmender Finesse steigt zwar die Empfindlichkeit, es wird aber zugleich die Stabilisierung des Arbeitspunktes deutlich heikler.

Obwohl sich der Arbeitspunkt nicht an der in Abschnitt 3.2.1 diskutierten Stelle befindet, eignet sich das Mikrofon dennoch für Versuche mit Partikeln. Das System kann als genügend ähnlich dem vorgeschlagenen Messsystem angesehen werden um es für Proof-of-principle Versuche heranziehen zu können.

3.4 Theoretische Messgrenzen

Bei einem Streulichtdetektor wird nur das in einen bestimmten Winkel gestreute Licht gemessen, folglich ist das Signal im Interferometrischen Aufbau größer, weil alle Richtungen von Bedeutung sind. Da bei einem Vergleich der Größenordnungen zwischen der gestreuten und der durch Phasenversatz und Interferenz zu Stande kommenden Komponente deutlich wird, dass der durch die Interferenz hervorgerufene Anteil dominiert und laut der vereinfachten analytischen Berechnung größer ist, als bei vergleichbaren Streulichtmessungen, ist davon auszugehen, dass das vorgeschlagene Prinzip zur Verwendung als Partikelsensor geeignet ist.

Ein weiterer Aspekt ist die nötige zeitliche Auflösung, ausschlaggebend hierfür ist in erster Linie der Durchfluss und die Abmessungen der verwendeten Düse aber auch die Breite des Laserstrahls, welche die Interaktionszeit mit dem Laser festlegen.

Die zeitlichen Anforderungen an die Auswerteeinheit sind im wesentlichen aber die gleichen wie bei einem Streulichtdetektor.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass laut den angeführten Abschätzungen das vorgeschlagene System in der Lage sein sollte Partikel zu detektieren. Theoretisch ist ein Fabry-Perot Interferometer einem Streulichtsensor überlegen, da zwei Effekte gleichzeitig zum Signal beitragen.

Es muss beachtet werden, dass die Konzentration hinreichend niedrig sein muss um Koinzidenzen zu vermeiden. Dies ist für den interferometrischen Aufbau umso wichtiger da nur die Änderung bei Ein- und Austreten gemessen werden kann, nicht aber ein permanentes Vorhandensein eines Partikels. Das Messprinzip ist also nicht ohne Durchfluss zu verwenden, da der AC- Anteil des Signals als Messgröße verwendet wird.

In Gleichung (3.30) wird die maximale Konzentration bei einer Düse von 1 mm Durchmesser abgeschätzt, diese ist wohlgermerkt unabhängig vom Durchfluss und ist auch nur theoretisch bei äquidistanter Verteilung der Partikel im gesamten Volumen gültig.

Ein Zylinder mit 1 mm Durchmesser und 1 cm³ Volumen besitzt folgendes Länge:

Ist der Abstand zwischen den Partikeln kleiner als 300 μm, so befindet sich im Mittel immer ein Partikel in der Messkammer und kann daher nicht mehr erkannt werden.

$$\text{Max.Konzentration} = \frac{1}{r^2 \pi b_l} = \frac{1}{0.25 \cdot 10^{-6} m^2 \pi \cdot 300 \cdot 10^{-6} m} = 4233 \frac{\#}{cm^3} \quad (3.30)$$

Im Bezug auf die folgenden Experimente in denen ein optisches Mikrofon verwendet wird, folgt eine Abschätzung ob dieses dafür geeignet ist.

Angenommen das Loch einer Düse hat einen Durchmessers von 1 mm und der Durchfluss beträgt 1 l/min , so folgt eine Geschwindigkeit der Partikel von

$$v = \frac{Q}{r^2\pi} = \frac{1/60 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.25\pi \cdot 10^{-9} \text{m}^2} = 21.22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.31)$$

Wird die Breite des Lasers mit $300\ \mu\text{m}$ angenommen so ergibt sich eine Pulsbreite von

$$t = \frac{b_L}{v} = \frac{300\ \mu\text{m}}{21.22 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 14.1\ \mu\text{s} \quad (3.32)$$

was in etwa der halben Periode einer Schallwelle mit der Frequenz von $35.46\ \text{kHz}$ entspricht.

$$f = \frac{1}{2 \cdot t} = \frac{1}{2 \cdot 14.1\ \mu\text{s}} = 35.46\ \text{kHz} \quad (3.33)$$

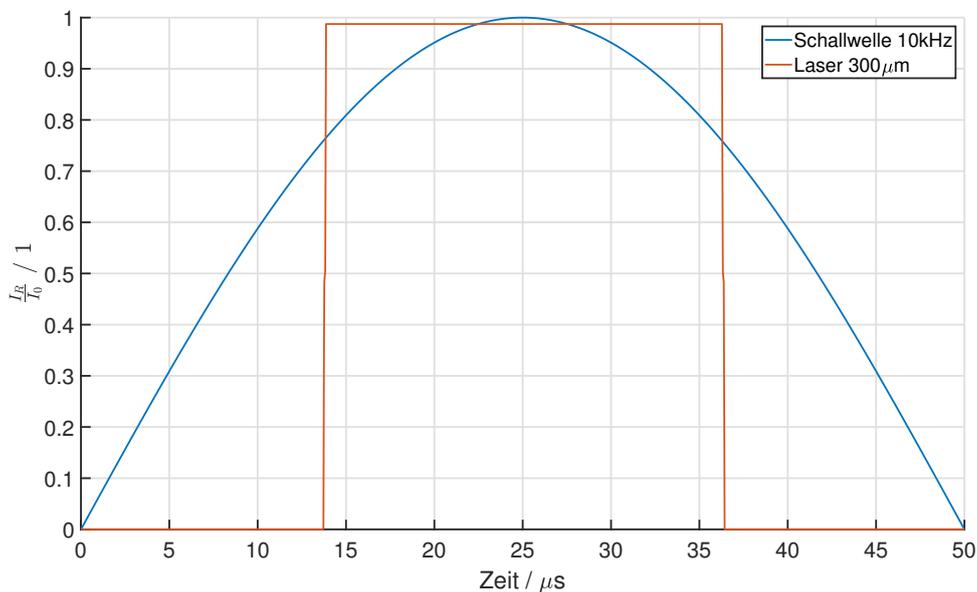


Abbildung 3.13: Zeitlicher Vergleich von Partikel und Schallwelle.

In Abb. 3.13 wurde der Vergleich mit einer Schallwelle dargestellt, mit einem Messbereich von $10\text{ Hz} - 1\text{ MHz}$ des optischen Mikrophones, stellen Frequenzen von etwa $40\ \text{kHz}$ kein Problem dar.

Entwicklung des Messsystems

4.1 Konzept des Messsystems

Es soll ein Gerät entwickelt werden, in dem die gesamte Messkette möglichst kompakt aufgebaut ist und auch ohne externen Rechner betrieben werden kann. Die Basis bildet ein Raspberry Pi mit Touchscreen, mit diesem können Eingabefelder implementiert und die Ausgabe grafisch dargestellt werden. Als Messgerät wird ein optisches Mikroskop verwendet, welches im Wesentlichen ein Fabry-Perot Interferometer ist, eine detailliertere Beschreibung befindet sich in Abschnitt 3.3. Das Messsignal wird analog über eine BNC-Buchse ausgegeben, weswegen ein Digitaloszilloskop notwendig ist, um anschließend Signalanalysen durchführen zu können. Mit diesem Verfahren können lediglich Partikel gezählt werden, um auch die Partikelkonzentration zu ermitteln muss auch der Durchfluss bekannt sein.

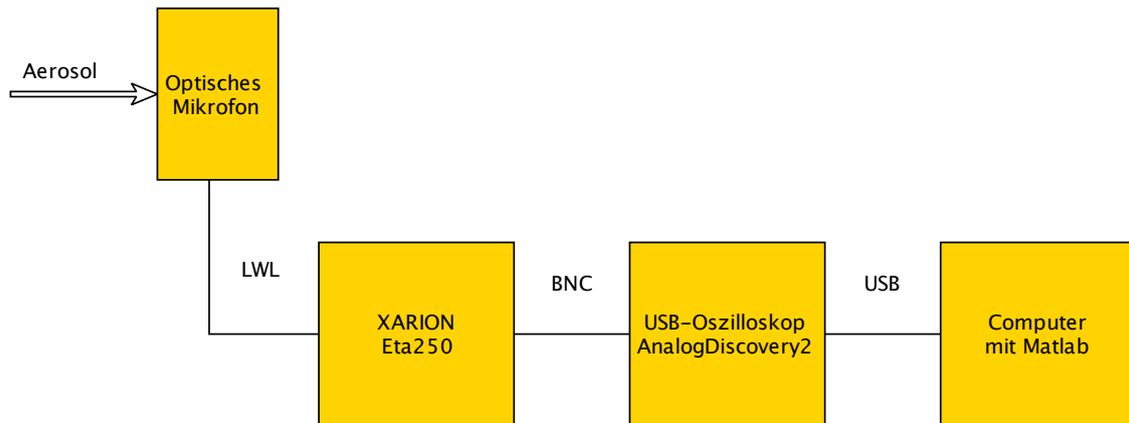


Abbildung 4.1: Aufbau des Messsystems mit Aerosolgenerator

4.2 Hardware

4.2.1 Konstruktion der Düse

Die Aufgabe der Düse ist es, das Aerosol möglichst mittig durch das Mikrofon zu leiten, damit möglichst viele Partikel mit dem Laser interagieren und zu einem Signal führen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wurde eine Düse konstruiert die zugleich eine Halterung für das Mikrofon darstellt, siehe Abb. 4.3. Nach dem Einsetzen des Mikrofons kann mit einer Schraube die Position in Längsrichtung justiert werden und anschließend mit zwei weiteren in dieser Position fixiert werden. Die Düse Abb. 4.2, verjüngt sich exponentiell auf ca. 0.9 mm um eine möglichst laminare Strömung zu gewährleisten, damit keine Partikel auf die Seitenwände der 1.3 mm breiten Öffnung des Mikrofons treffen können.

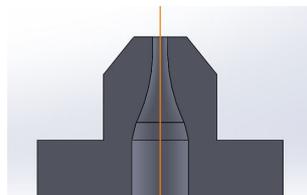
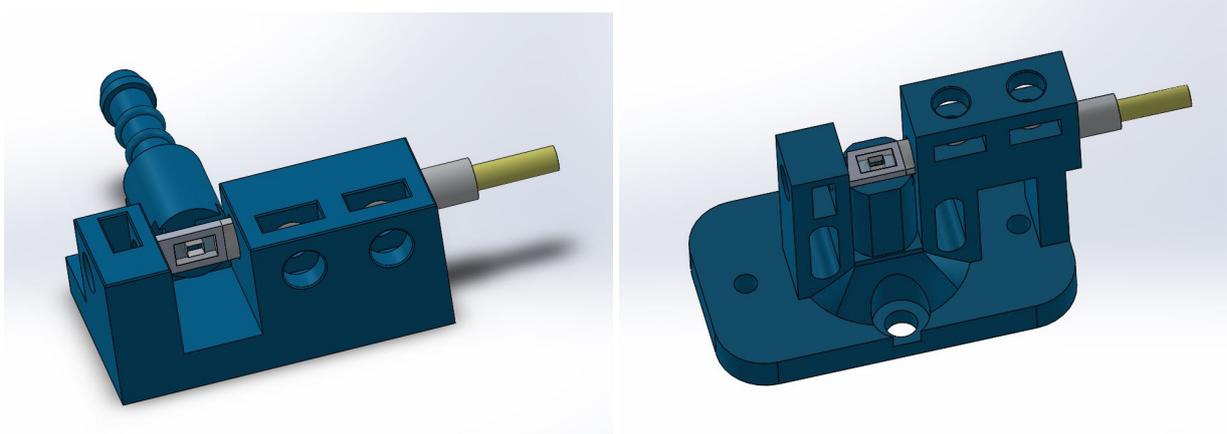


Abbildung 4.2: Schnitt der Düse

Ein Halter, Abb. 4.3a, wurde für den Anschluss eines 5 mm Schlauchs entworfen um Experimente mit dem Atomizer erzeugten Aerosolen durchführen zu können. Eine zweite Halterung wie in Abb. 4.3b zu sehen, kann an Stelle der Zähl-optik eines Condensation Particle Counter (CPC) verwendet werden, um größere Partikel zu messen.



(a) Adapter für einen 5 mm Schlauch

(b) Aufsatz anstelle der Zähloptik eines CPCs

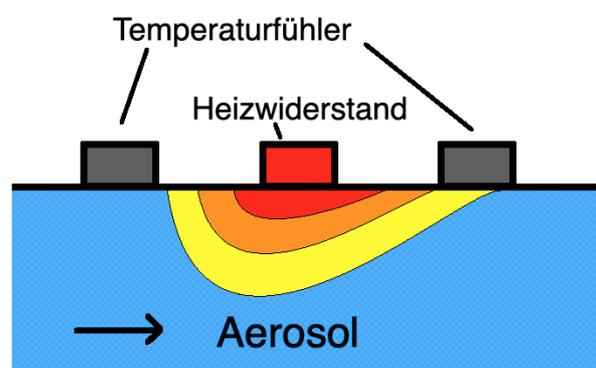
Abbildung 4.3: Konstruktion der Düse mit Halterung für das Mikrophon

4.2.2 Durchflussmeter

Vom Durchfluss des Aerosols hängt nicht nur die nötige Abtastfrequenz ab, sondern auch das Volumen welches während der Messdauer analysiert wird, da diese Kenngröße direkt in das Ergebniss mit eingeht wird sie auch mit aufgenommen.

Dazu wird ein kalorimetrischer Durchflusssensor, welcher im Rahmen des Masterprojekts vom Author der vorliegenden Arbeit entworfen wurde, verwendet.

Dieser besteht aus einem beheizbaren Rohr, in diesem Fall einer Kanüle welche von dem Aerosol durchströmt wird. Durch erfassen der Temperatur des Aerosols mit einem Heißleiter wird der Sollwert gebildet. Ein Proportional-Integral-Regler beheizt das Rohr so, dass sich zwischen Aerosol und Rohr ein konstanter Temperaturunterschied $\Delta\vartheta$ einstellt. Die benötigte Heizleistung ist nun ein Maß für den Durchfluss. Die Erwärmung erfolgt durch einen ohmschen Widerstand, somit kann die Spannung am Widerstand als Messsignal herangezogen werden.

**Abbildung 4.4:** Prinzip des kalorischen Durchflusssensors

Durch eine Look-Up Tabelle kann das nichtlineare Verhalten abgebildet werden und der Durchfluss einfach aus der Heizspannung ermittelt werden.

4.2.3 Elektrische Schaltung des Analog Digital Converter (ADC)

Um das Spannungssignal mit einem Raspberry Pi verarbeiten zu können ist ein externer Analog-Digital Converter notwendig. Dafür wurde der Baustein ADC122 ausgewählt, dieser verfügt über zwei Kanäle mit je 12 *Bit* Auflösung mit einer externen Referenzspannungsquelle können auch negative Spannungen gemessen werden. Die Abtastrate von 500 *MSamples/s* im dual-mode ist auch ausreichend hoch.

Die Schaltung Abb. 4.5 besteht aus dem Baustein ADC122, einer Referenzspannungsquelle REF5040 und einem Spannungsteiler, um bei Bedarf den Eingangsspannungsbereich zu erhöhen. Da die Referenzspannungsquelle 4.096 V liefert und der ADC mit 12 *Bit* auflöst, lässt sich die Auflösung durch

$$\Delta U = \frac{2 \cdot U_{Ref}}{2^{12}} = \frac{2 \cdot 4.096 V}{4096} = 2 mV \quad (4.1)$$

berechnen. Mit Verwendung des Spannungsteilers wird ΔU dementsprechend größer. Messungen haben gezeigt, dass die Widerstandswerte für den Spannungsteiler ausreichend niedrig sein müssen, mit $R_1 = R_2 = 10 k\Omega$ ergibt sich ein Eingangswiderstand von $R_i = 20 k\Omega$ wie es auch in der Audiotechnik üblich ist und ein Teilverhältnis von $\frac{1}{2}$, somit wird der Messbereich auf $\pm 8 V$ erweitert.

Die Widerstände R_3, R_5, R_6 wurden nicht bestückt und R_4 mit einer Nullohmbrücke bestückt, da für den zweiten Eingang kein Spannungsteiler benötigt wird und um negative Spannungen auch messen zu können die Massen nicht miteinander verbunden werden dürfen. Mit dem Jumper *J1* kann der Ausgabemodus festgelegt werden, bei einem logischem High wird Kanal A an *DOUTA* und Kanal B an *DOUTB* ausgegeben, andernfalls werden beide Ergebnisse nacheinander an *DOUTA* ausgegeben, in diesem Modus ist somit nur die halbe Abtastfrequenz möglich.

Im Layout Abb. 4.6 wurde für die unterschiedliche Potentiale verschiedenen Massenflächen erzeugt, um eine gute Schirmung zu erhalten. Die Anschlüsse auf der digitalen Seite sind als Steckerleiste ausgeführt, ein Analogeingang hat eine BNC Buchse um ihn mit dem Mikrofon zu verbinden und der Zweite hat einen Lötanschluss für das Durchflussmeter.

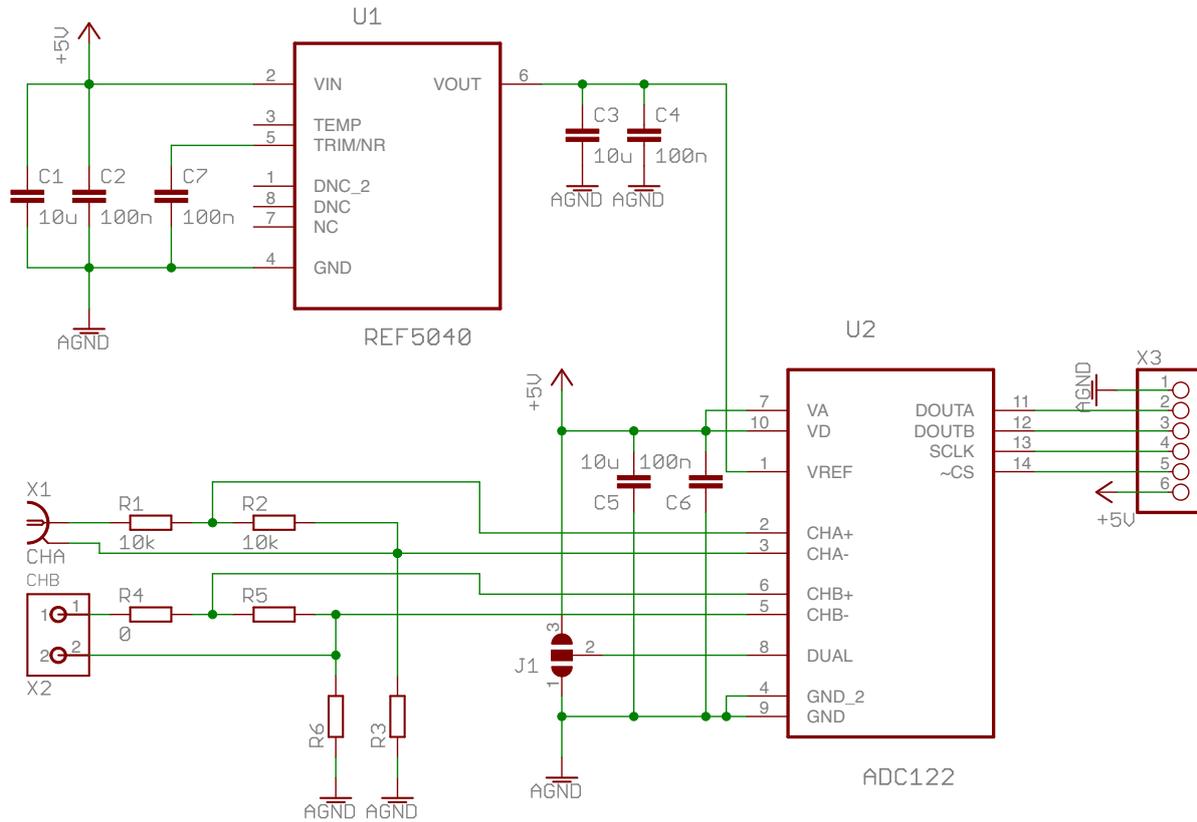


Abbildung 4.5: Schaltplan des Analog-Digital-Converters

Außerdem wurde darauf geachtet, dass die Leiterbahnen möglichst kurz gehalten und die Stützkondensatoren möglichst nahe an den IC's platziert wurden.

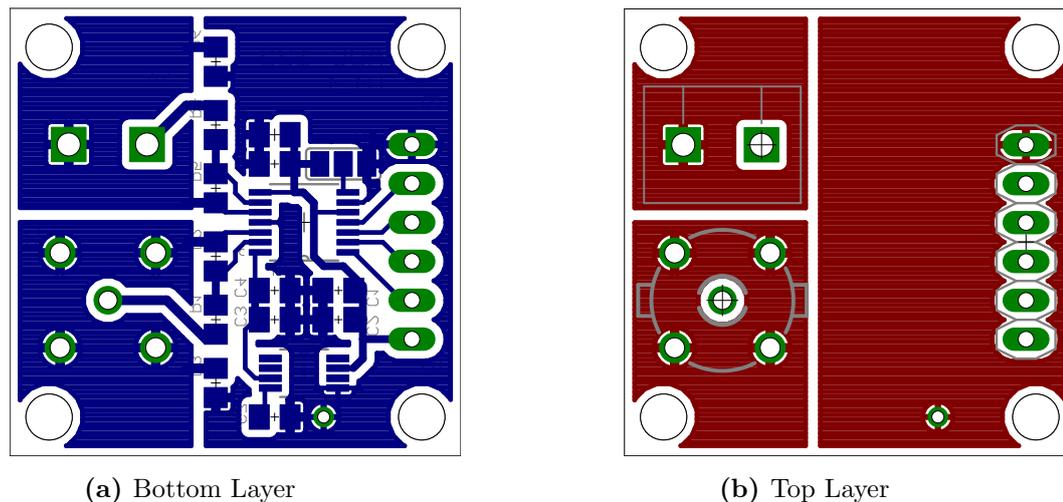


Abbildung 4.6: Layout des Analog-Digital-Umwandlers im Maßstab 2:1

4.3 Software

4.3.1 Ansteuerung des ADC

Der für den ADC gewählte Baustein verfügt über ein Serial Port Interface (SPI) über diese mit dem Raspberry Pi kommuniziert werden kann. Durch eine negativen Flanke an CS wird die Wandlung gestartet und die Ergebnisse der beiden Eingänge nacheinander an $DOUTA$ ausgegeben. Die Ergebnisse werden im Zweierkomplement dargestellt und mit vier führenden Nullen aufgefüllt, damit für jeden Kanal zwei Bytes ausgegeben werden können. Für einen Analogwert an jedem Kanal müssen folglich 4 Bytes übertragen werden, die maximale Abtastfrequenz ist in diesem Modus 500 MSamples/s .

In Python steht die Bibliothek *spidev* zur Verfügung, mit der eine SPI Schnittstelle angesprochen werden kann. Um die gewünschte Abtastrate zu erzielen muss die Busfrequenz auf ihr Maximum, $f_{BUS} = 15.8 \text{ MHz}$ gesetzt und auch die maximale Bufferlänge von 4096 Bytes ausgenutzt werden. Es können also 4096 Bytes direkt hintereinander übertragen werden, dann werden die Messwerte in eine Zeile der Matrix *data* geschrieben, *data* hat die Dimension $(n \times 4096)$ wobei n von der Messdauer abhängt. Während des Speicherns kann es zu Verzögerungen kommen und eine Echtzeitabtastung ist nicht mehr garantiert, allerdings kann die Verzögerung bestimmt und somit berücksichtigt werden.

Nachdem alle Werte eingelesen wurden, müssen diese noch richtig interpretiert werden um Werte im Dezimalsystem zu erhalten, dies geschieht in zwei überlagerten for-Schleifen:

```

1 for n in range(dim):
2     temp = data[n]
3     for i in range(1024):
4         data1[n*1024+i] = temp[4*i+0]*256 + temp[4*i+1] - 512*(temp[4*i+0]&8)
5         data2[n*1024+i] = temp[4*i+2]*256 + temp[4*i+3] - 512*(temp[4*i+2]&8)

```

Es wird jeweils eine Zeile von *data* geladen, in der sich die Abfolge der Bytes $[CHA_{High}, CHA_{Low}, CHB_{High}, CHB_{Low}]$ immer wiederholt. Aus diesen vier Bytes entsteht je ein Wert für *data1* und *data2*.

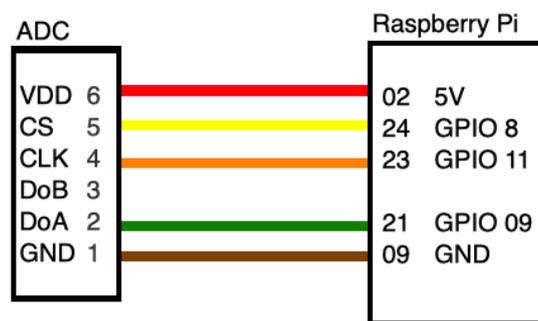


Abbildung 4.7: Anschlussbelegung SPI, ADC - Raspberry Pi

In Abb. 4.7 ist die Anschlussbelegung zwischen Raspberry Pi und der ADC-Platine dargestellt. Die Schaltung wird vom Raspberry Pi mit Spannung versorgt, die weiteren Leitungen sind für die Datenübertragung und das Startsignal der Wandlung notwendig.

4.3.2 Messsignal eines Partikels

Jedes Partikel das den Laserstrahl passiert erzeugt einen Ausschlag im Messsignal, allerdings lässt sich die eigentliche Funktion als Mikrofon nicht unterdrücken, weshalb Umgebungsgeräusche das Messsignal beeinflussen. Um von Partikel erzeugte Signale zu finden, wird das Messsignal mit der Funktion *Peakdetekt* untersucht. In der Funktion *Peakdetekt* werden zuerst Bereiche gesucht welche größer als die Schwellenspannung sind.

```

1 for k in range(len(data)-1):
2     if data[k] >= Threshold and data[k-1] < Threshold:
3         indexes = np.append(indexes, k)

```

Im zweiten Schritt wird auf Grund ihrer Breite bewertet ob es sich um von Partikel oder Schall verursachte Maxima handelt.

```
1 for i in range(len(indexes)):
2     indexpks = indexes[i]
3     n = 0
4     while data[indexes[i]+n]>=Threshold and ...
5         n<(len(data)-indexes[i]-1):
6         n += 1
7         if data[indexes[i]+n] > data[indexpks]:
8             indexpks = indexes[i]+n
9         if n >= MinWidth*fs and n <= MaxWidth*fs:
10            par_widths = np.append(par_widths, n/fs)
11            par_pks     = np.append(par_pks, data[indexpks])
12            par_index   = np.append(par_index, indexpks)
13 par_anz = len(par_widths)
```

Durch Filtern sollen die durch Partikel erzeugten Maxima bestmöglich zum Vorschein kommen, dies kann mit einem Optimalfilter erzielt werden.

4.3.3 Signalanalyse

Nachdem das vorliegende Signal nicht Periodisch ist, kann es keiner Frequenz zugeordnet werden und Rauschen kann durch einfache Filter nicht unterdrückt werden. Da die Form der Pulse annähernd gleich ist, bietet sich die Verwendung eines Optimalfilters an. Einige Pulse wurden mit dem Oszilloskop aufgenommen und sind in Abb. 4.8 dargestellt.

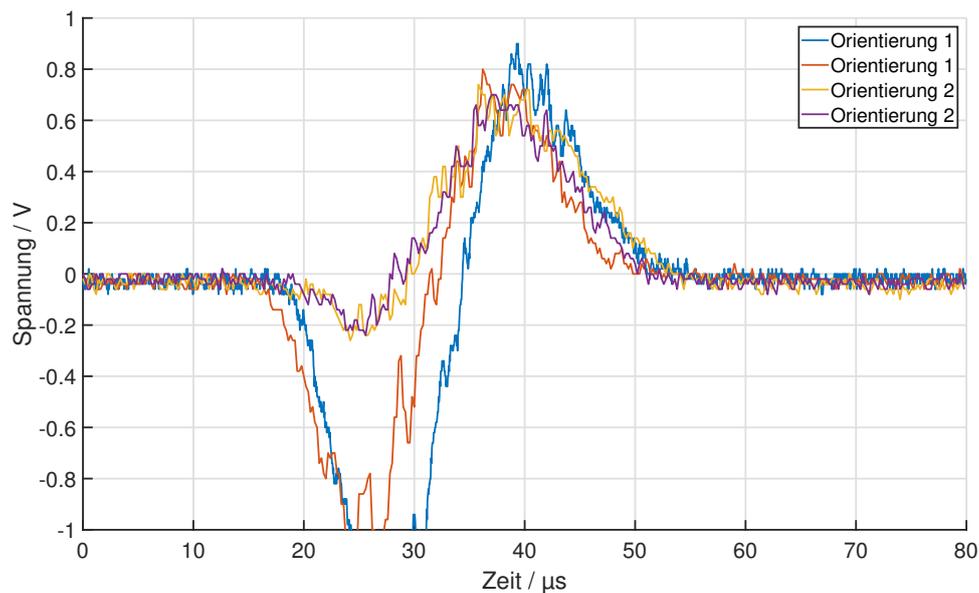


Abbildung 4.8: Messung eines einzelnen Partikels mit dem Oszilloskop

Interessant ist die Abhängigkeit des Signals von der Richtung des Durchströmens des Mikrofons, die beiden Möglichkeiten der Montage sind in Abb. 4.9 abgebildet.

Der Ausschlag nach unten bei Einbau nach Orientierung 1 ist überraschend, da sich der Brechungsindex nur erhöhen kann aber nicht geringer als der von Luft werden kann. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich das Loch der Düse nicht exakt in der Mitte befindet und daher Inhomogenitäten der Lichtintensität das Signal beeinflussen. Um aber genauere Aussagen darüber machen zu können, ist über den konkreten Aufbau des Mikrofons zu wenig bekannt.



(a) Orientierung 1



(b) Orientierung 2

Abbildung 4.9: Orientierungen des Mikrofons

Bei einem Optimalfilter wird der Signalverlauf eines Partikels nachgebildet und mit dem Messsignal gefaltet, das Ergebnis in Abb. 4.10 zeigt ein deutlich besseres Signal-Rauch-Verhältnisses.

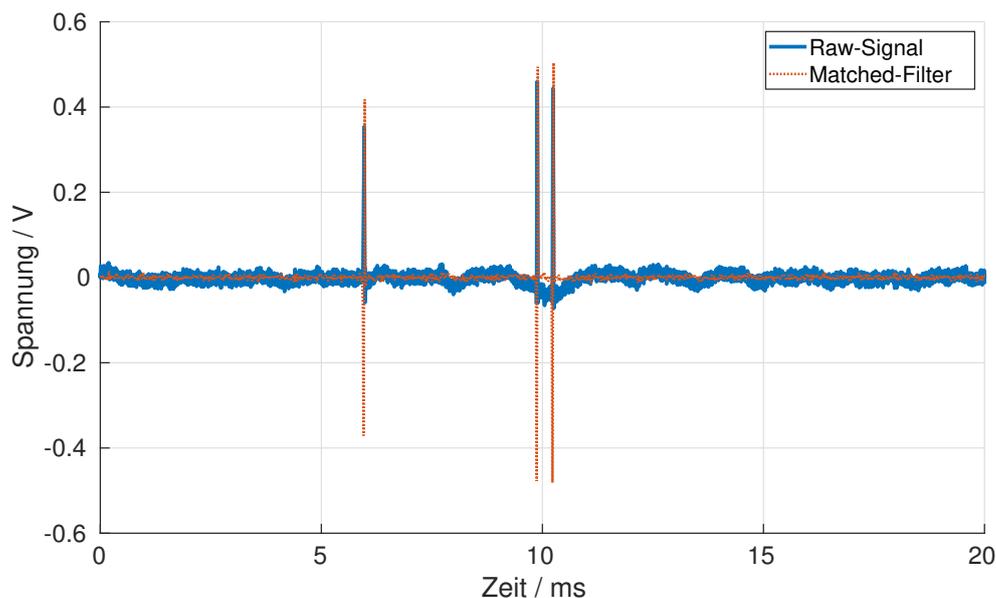


Abbildung 4.10: Ungefiltertes und gefiltertes Messsignal

4.3.4 Optimaler Schwellwert

Um abschätzen zu können wie sich Partikel von Lärm aus der Umgebung unterscheidet, wurde ein Histogramm aller Signalspitzen einer Messung erstellt, siehe Abb. 4.11. Für die Messung wurde der Aufstanz in Abb. 4.3 verwendet und anstelle der Zähloptik eines CPC's installiert, der Durchfluss wurde auf ca. $500 \text{ ccm}/\text{min}$ eingestellt.

Es gilt nun Schwellwerte für die minimale/maximale Breite und die Mindesthöhe eines Pulses zu definieren. Der markanter Rücken um $15 \mu\text{s}$, deckt sich mit den theoretischen Betrachtungen in Kapitel 3 und wird als von Partikeln verursachtes Signal identifiziert. Die Breite eines Pulses lässt sich demnach auf $5 - 25 \mu\text{s}$ einschränken. Einen vernünftigen Wert für die Schwellspannung zu finden ist etwas heikler, da sich die Rauschspannung nicht so deutlich vom Messsignal abhebt. Da auf Grund der Geometrie nur etwa $\frac{2}{3}$ aller Partikel tatsächlich den Laserstrahl passieren, wird ein Kalibrierfaktor eingeführt. In einem Experiment ergab sich, dass mit einer Schwellspannung von 0.5 V und einem Kalibrierfaktor von $\frac{2}{3}$ annähernd die gleichen Ergebnisse wie mit einem CPC erzielt werden können, näheres dazu in Abschnitt 5.4.

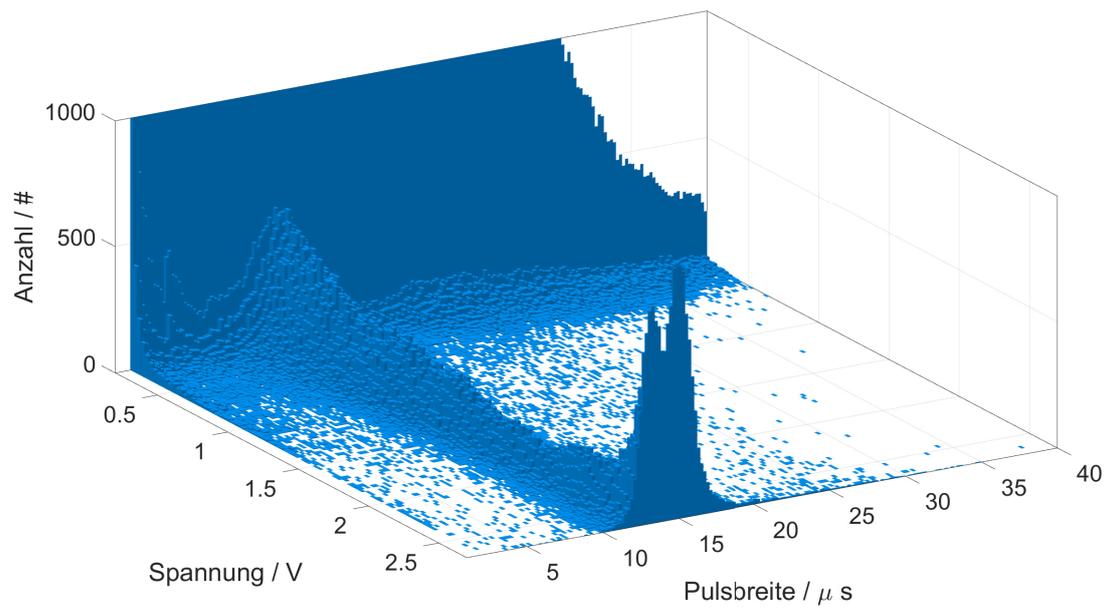


Abbildung 4.11: Histogramm einer Messung von Partikeln nach einem CPC

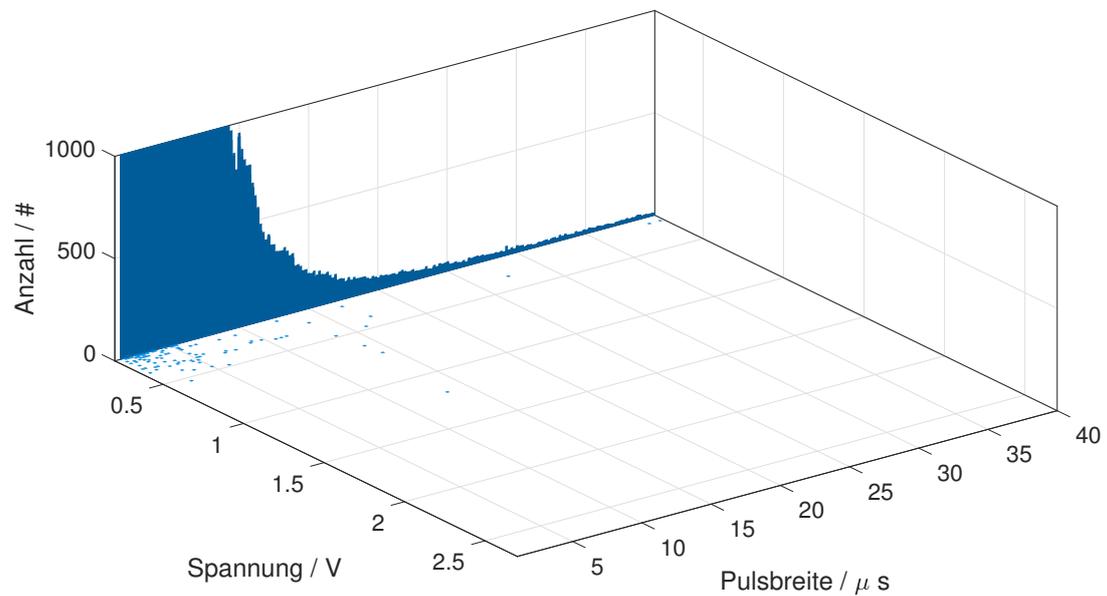


Abbildung 4.12: Histogramm einer Messung ohne Partikel

Bei der Messung in Abb. 4.11 wurden Kondensationspartikel verwendet, der Aufbau ist in Abschnitt 5.4 näher beschrieben.

4.3.5 Graphical User Interface (GUI)

Im GUI können sowohl Messungen aufgezeichnet, als auch gespeicherte Messungen geladen werden. Dazu kann die gewünschte Messdauer eingestellt werden, für die Berechnung der Partikelkonzentration können die in Abschnitt 4.3.4 diskutierten Schwellwerte vorgegeben werden. Zur schnellen Kontrolle der Messdaten wird außerdem der gemessene Durchfluss und der zeitliche Verlauf der Messung ausgegeben. Wahlweise können auch die Histogramme der Pulsbreite oder Pulshöhe dargestellt werden.

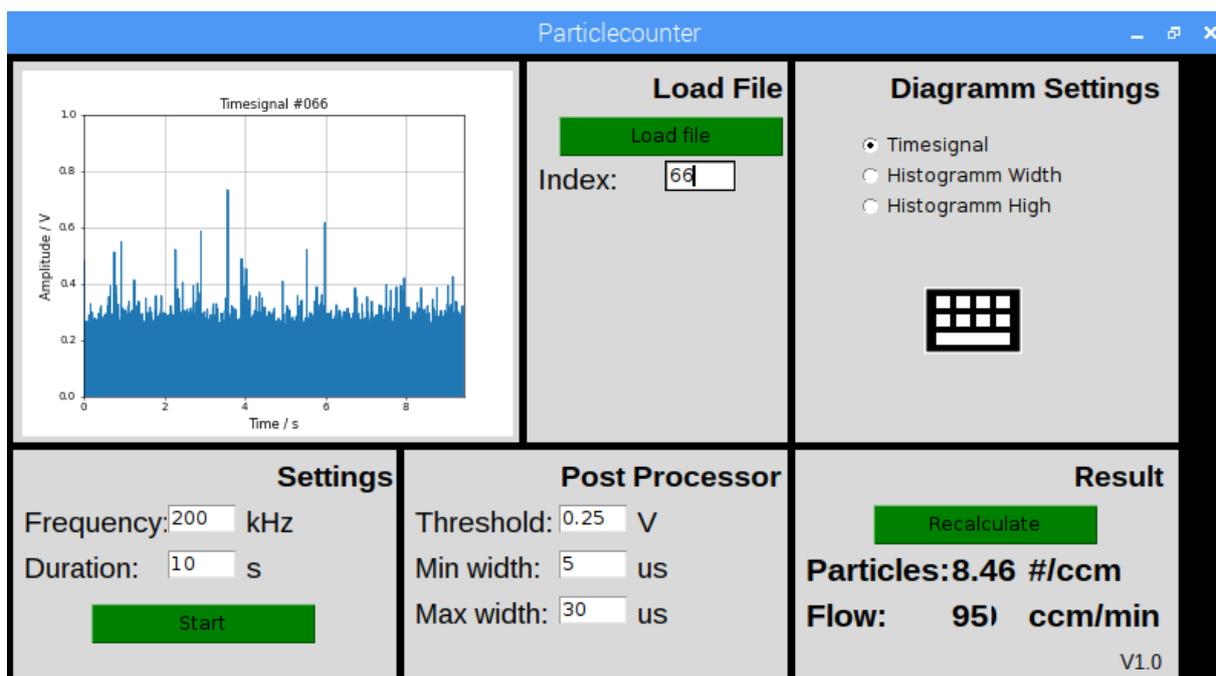


Abbildung 4.13: Benutzeroberfläche am Raspberry PI

Durch betätigen des *Start* Buttons werden die analogen Werte eingelesen und gespeichert, im Anschluss wird daraus der Durchfluss und die Partikelkonzentration berechnet. Um die Konzentration mit neu eingestellten Werten für die Schwellenspannung und Mindest- bzw. Maximale Breite zu berechnen, steht der Button *Recalculate* zur Verfügung. Wurden alle Größen berechnet wird automatisch ein neues Diagramm erzeugt, dessen Art im Sektor *Diagrammsettings* zwischen Zeitsignal und Histogramm ausgewählt werden kann.

Um die vorherig aufgezählten Schritte durchzuführen, werden folgende Funktionen nacheinander aufgerufen:

- $fs, data1, data2 = analog.read(duration)$

Hier werden die Analogwerte eingelesen und zusätzlich die tatsächliche Abtastfre-

quenz bestimmt.

- *index = file.write(path, fs, data1, data2)*

In dieser Funktion werden die Messdaten in eine Datei mit fortlaufender Nummer (index) gespeichert. In die ersten Spalte wird *data1* und in die Zweite *data2* gespeichert, jeder Wert wird gegeben falls mit Nullen auf fünf Stellen aufgefüllt um eine Einheitliche Struktur zu erhalten. Die ersten elf Zeichen werden für die Abtastfrequenz verwendet, die Daten beginnen also in der zweiten Zeile.

- *fs, data1, data2 = read(path, index)*

Mit dieser Funktion können zuvor abgespeicherte Messungen geladen werden, um Ergebnisse direkt miteinander vergleichen zu können.

- *flow_mean = flow.mean(data2)*

Ermittelt Anhand einer Look-Up Tabelle den mittleren Durchfluss.

- *par_anz, par_pks, par_widths, par_index = peak.detekt(fs, data1, Threshold, MinWidth, MaxWidth)*

Berechnet die Anzahl, Breite, Höhe sowie Position der Maxima welche den Kriterien wie Schwellspannung, Mindest- und Maximalbreite gerecht werden.

- *par_anz_per_ccm = peak.count(par_anz, flow_mean, duration, kFaktor)*

Mit Hilfe des Durchfluss kann von Partikelanzahl auf eine Konzentration geschlossen werden.

- *diagram.timeplot(data1, duration, path, index)*

- *diagram.histogram_widths(par_widths, path, index)*

- *diagram.histogram_pks(par_pks, path, index)*

In diesen Funktionen werden die Diagramme mit dem Zeitverlauf bzw. den Histogrammen für Breite und Höher der Maxima erzeugt.

- *data1 = matchedfilter(data1)*

Die Funktion das aufgenommene Signal zu filtern ist in der Version 1.0 nicht implementiert.

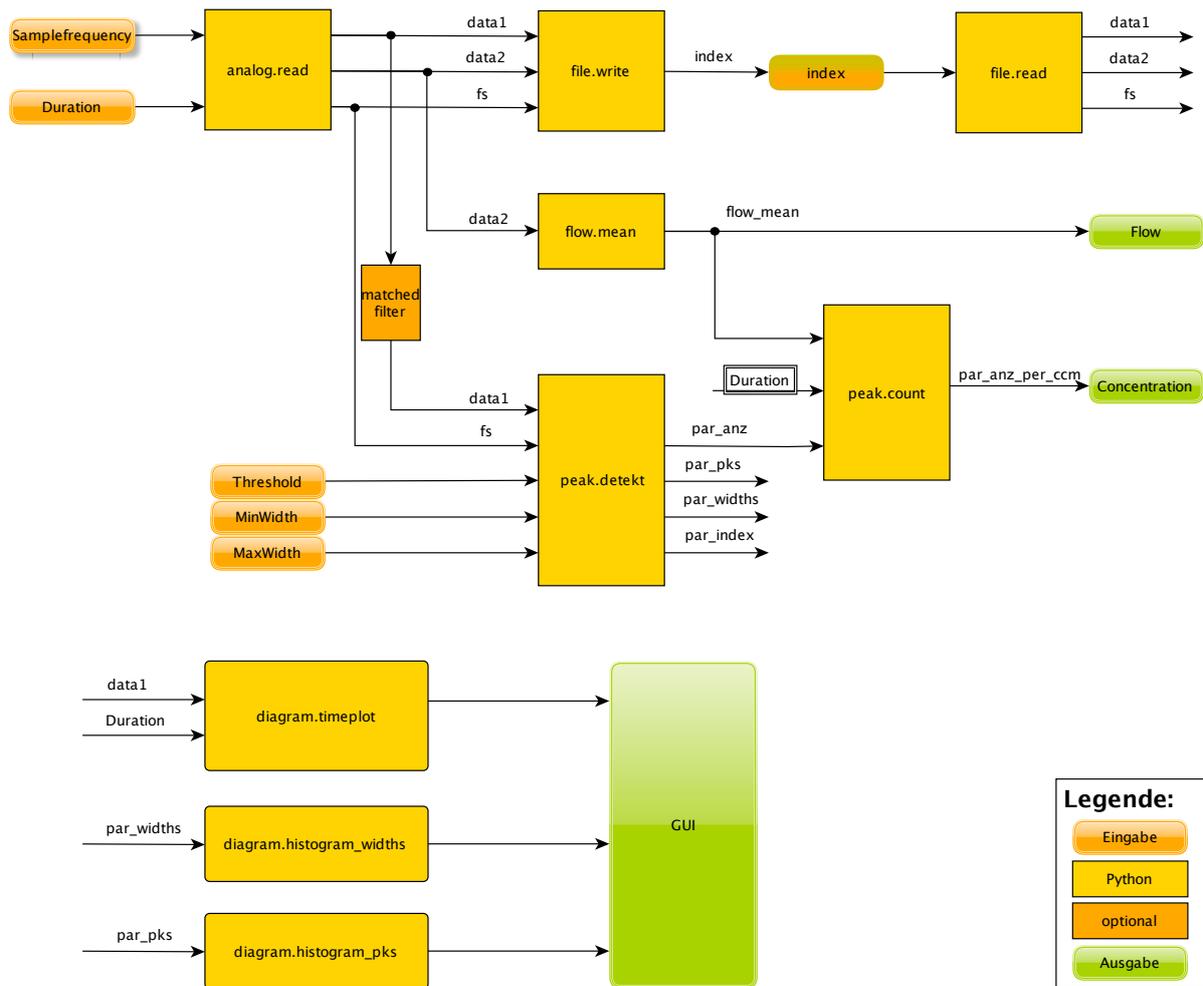


Abbildung 4.14: Blockschaftbild der Software

4.4 Gesamtsystem

Als Sensor zur Detektion der Partikel wird das optische Mikroskop Eta250 der Firma XARION verwendet. Mit einem eigens entwickeltem Durchflusssensor wird die Flussrate des Aerosols bestimmt und anschließend mit einer Düse durch die Öffnung des Mikroskops geleitet. Die beiden Messsignale, des Mikroskops und des Durchflussmessers, werden mit der ADC-Platine auf den Raspberry Pi übertragen. Auf welchem ein GUI implementiert ist, damit auf einfache Art und Weise eine Partikelmessung durchgeführt werden kann. Nach Einstellen der gewünschten Messdauer muss lediglich der Start Button gedrückt werden um eine Messung zu starten, die Einstellungen für anschließende Berechnungen können ebenfalls per Touchscreen getroffen werden. Für eine schnelle Kontrolle können verschiedene Diagramme angezeigt werden.

Für die Benutzung des GUI muss Python3 mit den Bibliotheken *tkinter*, *numpy*, *spidev* sowie *matplotlib* installiert sein.

4.4.1 Blockschaubild

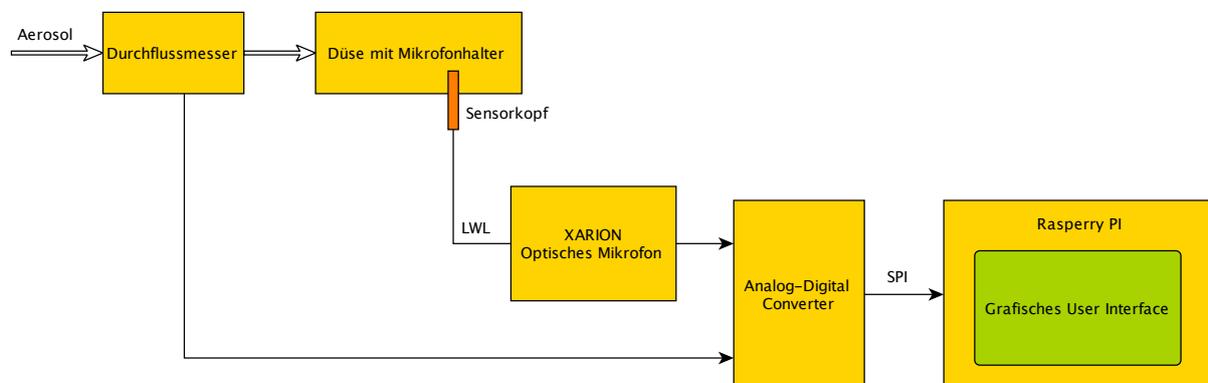


Abbildung 4.15: Blockschaubild der Gesamtsystems

Messergebnisse

5.1 Messaufbau

5.1.1 Aufbau

Für die ersten Versuche musste ein Setup entworfen werden, um die theoretischen Erkenntnisse experimentell zu belegen.

Als einfachste Variante erschien, das Messsystem auf Thorlabs Stages, wie sie für Laseranwendungen verwendet werden, aufzubauen. Damit lässt sich ein stabiler Aufbau realisieren und es ergeben sich viele Möglichkeiten die Komponenten untereinander zu justieren.

Um das Mikrofon nicht zu beschädigen, wurde eine Kanüle als Düse verwendet, diese ist in unterschiedlichen Durchmessern erhältlich, somit kann die Geschwindigkeit der Partikel variiert werden. Damit nicht zu viele Partikel in der Kanüle verloren gehen, wurde sie gekürzt, um die innere Oberfläche zu minimieren. Auf verstellbaren Stages montiert kann sie sehr nah ans Mikrofon gebracht und mittig ausgerichtet werden.

Durch die geometrischen Abmessungen der Kanüle ergibt sich der Zusammenhang von Geschwindigkeit und Durchfluss. Nachdem der verwendete Atomizer mit mindestens 1 *bar* betrieben werden muss, ist die mit dem Durchfluss verbundene Geschwindigkeit zu hoch und es sind Bypässe notwendig um den Durchfluss soweit zu reduzieren um den theoretischen Berechnungen gerecht zu werden.

Das Blockschaltbild in Abb. 5.1 zeigt alle Komponenten, die zur Evaluierung des Messsystems notwendig sind. Das System besteht aus einem Atomizer, mit dem ein Aerosol

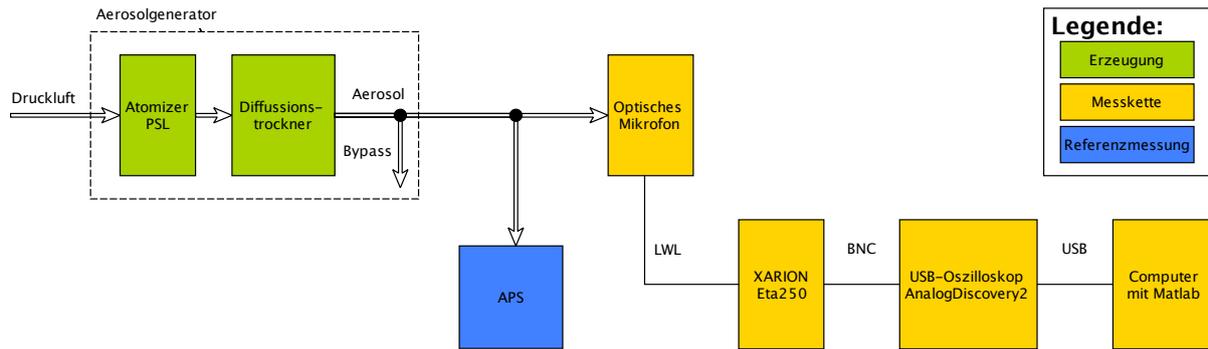


Abbildung 5.1: Blockschaltbild des Messsystems

erzeugt wird, einem Partikelmessgerät zur Durchführung der Referenzmessung und der Messkette bestehend aus einem optischen Mikroskop, einem USB-Oszilloskop und einem Rechner an dem die Auswertung durchgeführt wird.

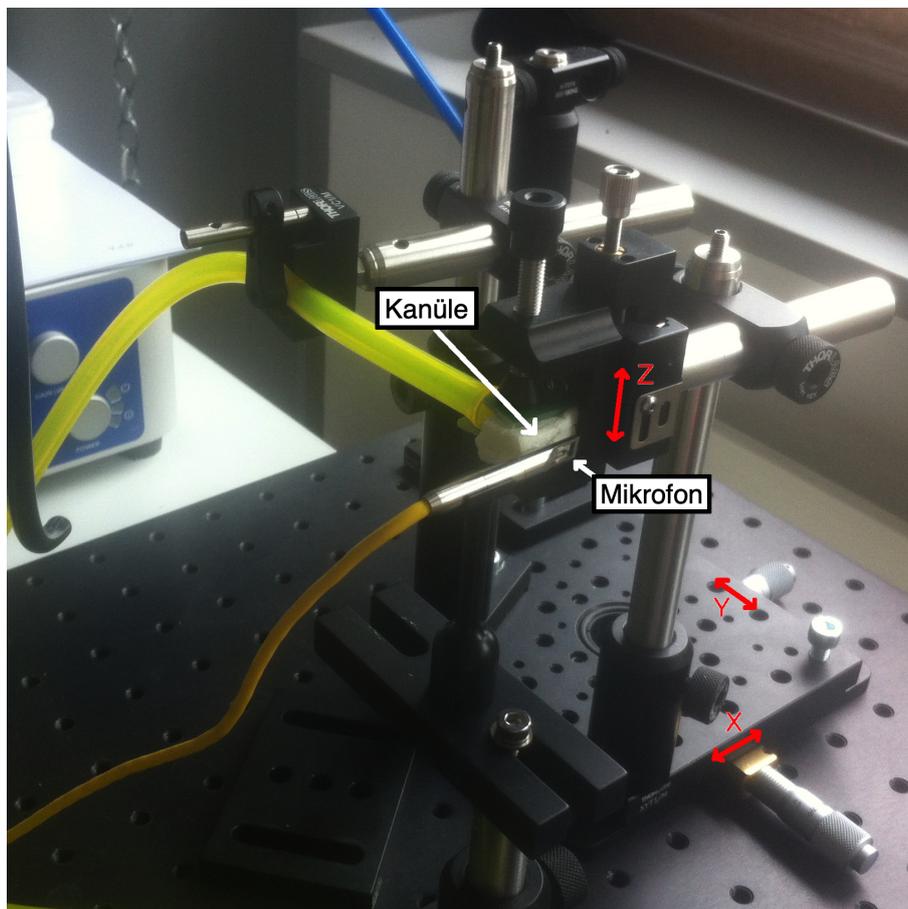


Abbildung 5.2: Aufbau für die ersten Experimente

In Abb. 5.2 ist der erste Aufbau zu sehen, das Mikrofon ist starr montiert und die Düse ist im Winkel von 90° dazu, auf einer in 3-Achsen verstellbaren Stages befestigt.

5.1.2 Erzeugung eines Aerosols

Um das System ausführlich testen zu können, ist es notwendig ein Aerosol konstanter Konzentration zu erzeugen. Weiter ist es nützlich die Partikelkonzentration und Größe vorgeben zu können. Zur Herstellung solch eines Aerosols eignet sich ein Atomizer, dessen Funktionsprinzip in Abb. 5.3 dargestellt ist. Dieser besteht aus einem Behälter mit Reinstwasser, in dem Partikel gelöst sind. Durch eine Druckluftzufuhr entstehen unter Wasser Blasen durch diese Tröpfchen der Lösung in die Luft mitgerissen werden, im Diffusionstrockner wird das Wasser an den Silicagelkugeln gebunden und es bleibt ein Gemisch aus Luft und den gelösten Partikel über. Die Partikelkonzentration hängt einerseits von der Konzentration der Partikellösung und andererseits vom verwendeten Druck ab. Später kann die Konzentration durch Verdünnen mit reiner Luft noch gesenkt werden.

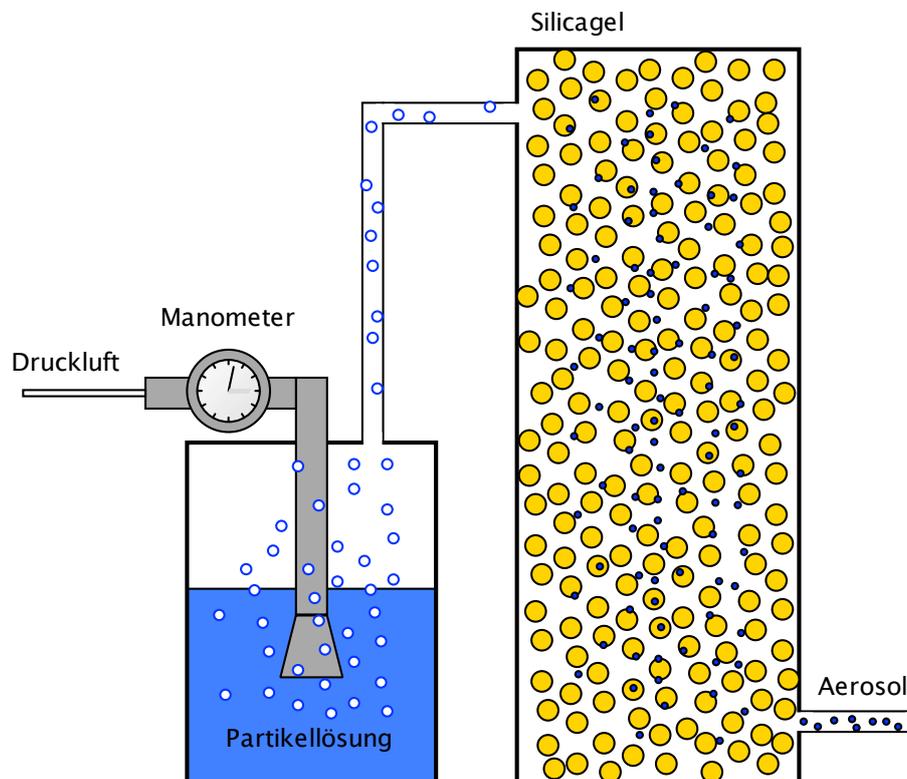


Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau des Atomizers ATM220 des Herstellers Topas

Die Größe hängt nur von den gelösten Partikeln ab. Dafür eignen sich entweder Polystyrol Latex (PSL) Kugeln, diese sind in unterschiedlichen Größen erhältlich oder Natriumchlorid. PSL Kugeln haben den Vorteil, dass sie monodispers sind und sowohl die Form als auch der Brechungsindex sehr gut bekannt sind. Es können damit Aerosole mit sphärische Partikeln der Größe von ca. 150 nm bis $3\text{ }\mu\text{m}$ generiert werden.

Im Gegensatz zu PSL ist die Größenverteilung und die exakte Form der Partikel bei NaCl nicht definiert.

Eine Andere Möglichkeit ein Aerosol zu erzeugen ist ein Rußgenerator, bei dem eine Flamme unter kontrollierter Sauerstoffzufuhr betrieben wird. Auf diese Variante wurde bei den durchgeführten Experimenten verzichtet, um eine mögliche Beschädigung des Mikrofons auszuschließen.

5.1.3 Auswertung

Die folgenden Messungen wurden nicht mit dem in Abschnitt 4.4 vorgestelltem System durchgeführt, da dieses erst durch Erkenntnisse der Experimente entwickelt wurde.

Um benutzerfreundliche Messungen und Auswertungen durchführen zu können, wurde mit Matlab ein GUI entwickelt, welches über ähnliche Funktionen wie das in Abschnitt 4.3.5 vorgestellte verfügt. Die Benutzeroberfläche ist in Abb. 5.4 abgebildet, es können ebenso Einstellungen zur Analog-Digitalwandlung und zur Berechnung der Konzentration getroffen werden. Messungen werden mit einer fortlaufenden Nummer und Datumstempel gespeichert und für einen direkten Vergleich könne auch ältere geladen werden.

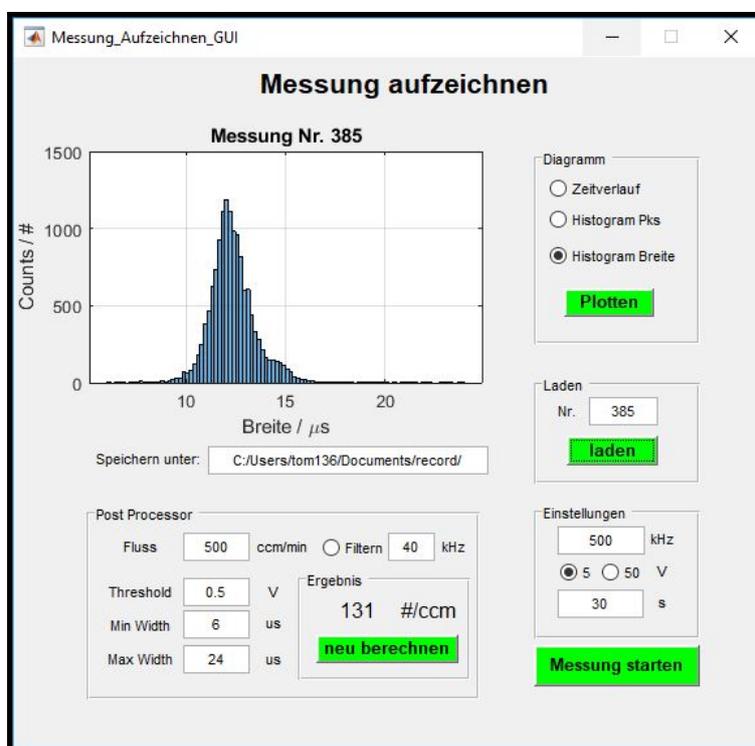


Abbildung 5.4: Benutzeroberfläche am Computer

Um die analogen Messsignale auf den Computer zu übertragen wurde das USB-Oszilloskop AnalogDiscovery2 der Firma Digilent verwendet. Dieses wurde über ein Pythonskript angesprochen. Es kann zwischen zwei Spannungsbereichen gewählt werden sowie die Abtastfrequenz und Messdauer vorgegeben werden. Die Messdaten werden direkt in eine Datei gespeichert und von dort im Matlabskript wieder geladen, damit sie zur Weiterverarbeitung und grafischen Darstellung bereit stehen. Die Messdaten können optional gefiltert oder direkt verwendet werden. Mit der Matlabfunktion *peakdetect* werden jene Maxima lokalisiert, welche den vorgegebenen Eigenschaften wie Breite und Höhe entsprechen.

In diesem Fall steht kein digitaler Durchflussmesser zur Verfügung, darum wurde der Durchfluss vor der Messung mit dem Bubbleflowmeter Gilibrator-2 des Herstellers Gilian gemessen und dementsprechend in der GUI eingegeben. Somit kann aus der Anzahl auch die Partikelkonzentration berechnet werden.

Für eine schnelle Kontrolle der Messung bzw. Berechnung kann wahlweise der Zeitverlauf oder Histogramme der Pulsbreite oder Höhe angezeigt werden.

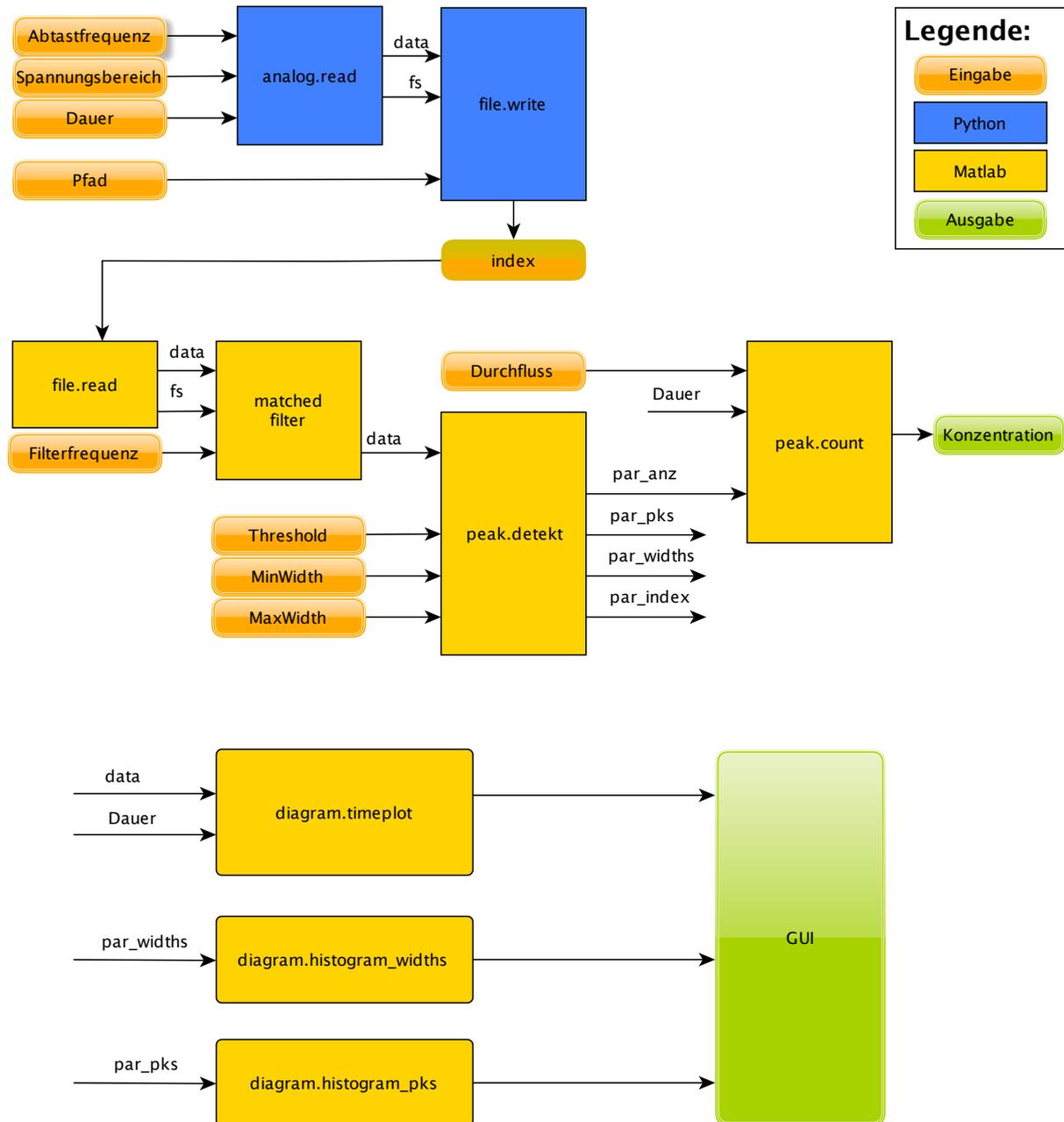


Abbildung 5.5: Blockschaltbild des GUI am Computer

5.2 Polystyrol Latex Partikel (PSL)

Die erste Messung wurde mit Polystyrol Latex (PSL) Kugeln durchgeführt. Bei der Auswahl der Größe der Partikel ist zu beachten dass der Ausschlag im Messsignal mit Partikelgröße zwar zunimmt, große Partikel aber leicht an Oberflächen haften bleiben und somit erst gar nicht dem Messsystem zugeführt werden können. Daher viel die Wahl auf $2\ \mu\text{m}$ großen PSL Kugeln.

Bei der in Abb. 5.6a gezeigten Messung wurde im Schlauch durch das das Aerosol zugeführt wird ein High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filter eingebaut, somit strömt reine Luft durch das Mikrofon und es werden nur Umgebungsgeräusche und durch den Luftstrom verursachte Turbulenzen gemessen. Dies liefert eine Referenzmessung aus der das Hintergrundrauschen des Setups sowie etwaige parasitäre Effekte abgeschätzt bzw. erkannt werden können.

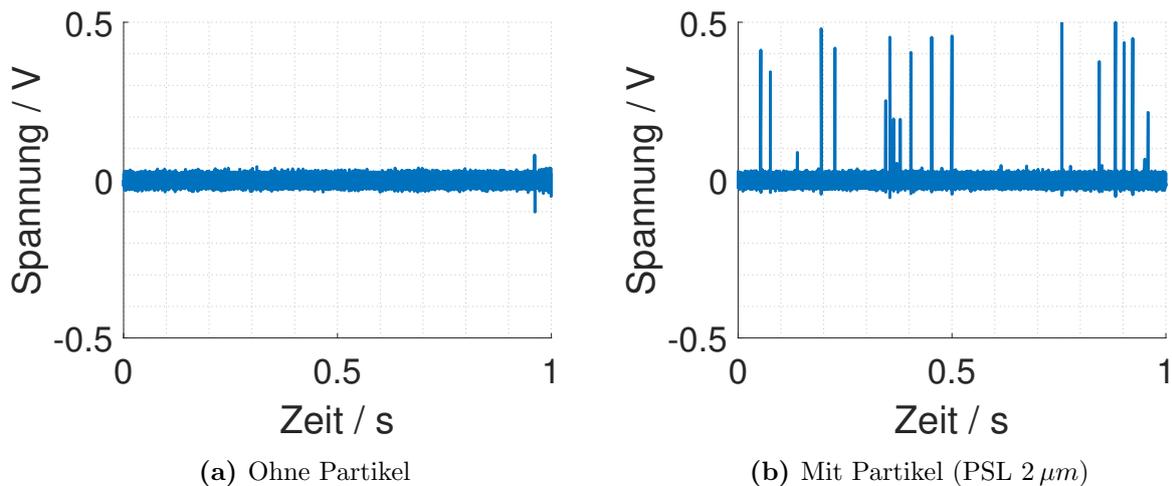


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Messsignale

In Abb. 5.6b sind neben dem ähnlich wirkendem Grundrauschen deutliche Spitzen zu erkennen, welche eindeutig mit dem Vorhandensein von PSL Partikeln im Strom korrelieren.

Durch genauere Betrachtung eines einzelnen Pulses, siehe Abb. 5.7, kann eine mittlere Signalbreite von $25\ \mu\text{s}$ abgelesen werden. Mit dem verwendeten Durchfluss von $230\ \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$ und einem Nadelinnendurchmesser von $0.603\ \text{mm}$ ergibt sich, nach den theoretischen Abschätzungen in Kapitel 3, eine Pulsbreite von $22.3\ \mu\text{s}$. Die berechnete und gemessene Pulsbreiten decken sich hinreichend gut um annehmen zu können, dass Partikel dafür

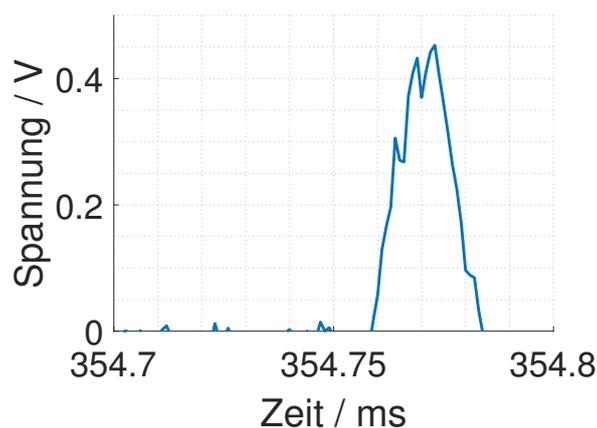


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf des Messsignals

verantwortlich sind.

Nachdem die Pulsbreite annähernd konstant ist, kann diese als einzelne Periode einer Wechselspannung aufgefasst werden und mit der Fast Fourier Transformation (FFT) analysiert werden. Mit dieser Methode kann gezielt die Amplitude einer bestimmten Frequenzkomponente erhoben werden, somit kommt das Rauschen nicht so sehr zum tragen.

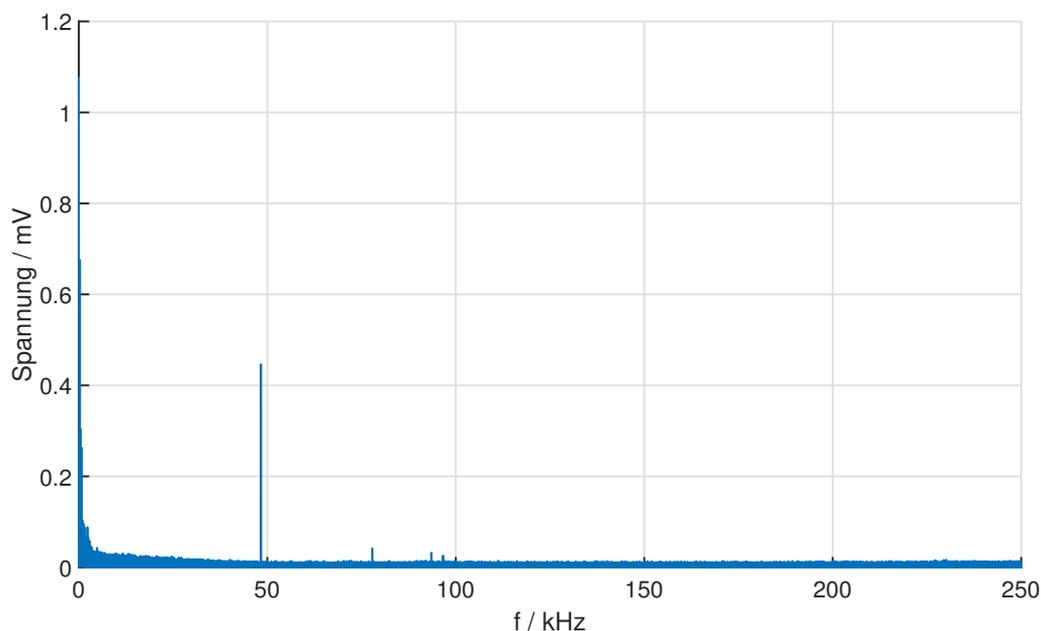


Abbildung 5.8: Messergebnisse der FFT

In Abb. 5.8 zeigt sich ein deutlicher Peak bei 48.3 kHz , laut Berechnung muss die zu-

gehörigen Frequenz aber

$$f = \frac{1}{2 \cdot t_p} = \frac{1}{2 \cdot 25 \mu s} = 20 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

sein. Nachdem der Peak auch nicht bei allen Messungen sichtbar ist, ist anzunehmen, dass der Peak durch eine Störung und nicht durch Partikel erzeugt wurde, daher muss die Auswertung im Zeitbereich erfolgen und das Rauschen entweder durch geringen Durchfluss oder digitale Filter klein gehalten werden.

Ob auch ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Spitzen im Messsignal zur Partikelkonzentration besteht, soll durch eine Referenzmessung gezeigt werden. Um die Konzentration $2 \mu m$ großer Partikeln zu bestimmen eignet sich der Aerodynamic Particle Sizer (APS) TSI APS 3320, zusätzlich zur Konzentration gibt dieser auch Auskunft über die Größenverteilung, wobei dieser hier eine untergeordnete Rolle zugeteilt wird, da PSL Kugeln ohnehin als monodispers angenommen werden können.

In diesem Versuch wurde die Partikelkonzentration verändert indem die Lösung im Atomizer ausgetauscht wurde.

Durch Zählen der Spitzen im Messsignal wird die Partikelanzahl ermittelt, nachdem zu Beginn der eingestellte Durchfluss kontrolliert wurde, gilt dieser als bekannt und somit kann die Partikelkonzentration berechnet werden:

$$\text{Partikelkonzentration} = \frac{\# \text{Spitzen}}{Q \cdot \Delta t} \quad (5.2)$$

Die Ergebnisse im Vergleich zur Referenzmessung mit dem APS sind in Tabelle 5.1 ersichtlich.

Tabelle 5.1: Vergleich Messung mit APS und Mikrofon

Messgerät	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3
-	$\frac{\#}{cm^3}$	$\frac{\#}{cm^3}$	$\frac{\#}{cm^3}$
APS	2.54	2.91	5.01
Mikrofon	3.60	5.05	7.74
Poissonfehler	± 0.97	± 1.15	± 1.43

Auch wenn mit dem Mikrofon nicht exakt die gleichen Werte erzielt werden konnten und befinden sich auch in der gleichen Größenordnung. Der Poissonfehler berechnet sich aus

$$\text{Poissonfehler} = \frac{\sqrt{\# \text{Spitzen}}}{Q \cdot \Delta t} \quad (5.3)$$

Zu bedenken ist, dass mit dem Mikrofon die Messdauer lediglich 1 s betrug, mit dem APS hingegen 30 s, wodurch sich ein gewisses Fehlerpotential ergibt, da in dieser Zeit nur $ca. 4 \text{ cm}^3$ durch das Mikrofon strömen, der APS hingegen einen halben Liter analysiert. Weitere Unsicherheiten sind die Stetigkeit des Durchflusses und damit einhergehende Änderung der scheinbaren Partikelkonzentration, sowie die verwendete Schwellspannung zur Unterscheidung von Messrauschen und Signalspitzen.

Durch weitere Messungen kann evaluiert werden ob der Abweichung zumindest gleichbleibend ist, dann könnte sie durch einführen eines Kalibrierfaktor kompensiert werden.

Es wurde gezeigt, dass Partikel grundsätzlich detektiert werden können. In weiteren Experimenten soll noch ermittelt werden, welche Größen überhaupt detektiert werden können und ob Aussagen über die Größenverteilung gemacht werden können.

5.3 Natriumchlorid (NaCl)

Mit gelöstem Kochsalz (NaCl) kann ein Aerosol mit deutlich kleineren Partikeln als mit PSL und hoher Konzentration hergestellt werden.

Unter Einsatz eines Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) kann dessen Größenverteilung und Konzentration erfasst werden. Der SMPS besteht im wesentlichen aus zwei Teilen, der Elektronenröhre welche, durch anlegen einer Spannung, nur eine bestimmte Größe von geladenen Partikeln passieren lässt und der Zählinheit z.B.: einem Condensation Particle Counter (CPC).

Nun kann das Aerosol vor dem CPC abgegriffen und zum Mikrofon geleitet werden, siehe Abb. 5.9.

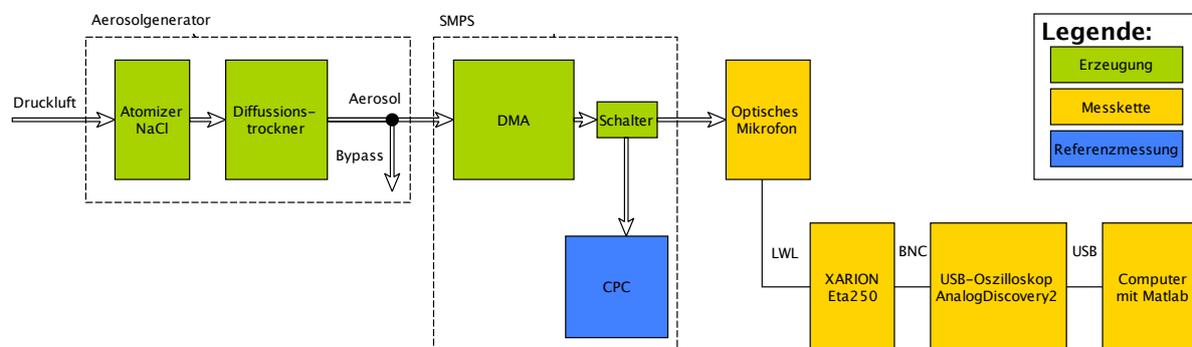


Abbildung 5.9: Aufbau zur Messung mit dem SMPS

Zu Beginn wird ein Scann durchgeführt, somit ist die Konzentration jeder Partikelgröße bekannt. Danach kann durch manuelles vorgeben der Spannung die gewünschte Partikelgröße eingestellt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass sich der Durchfluss bei umschalten zwischen CPC und Mikrofon nicht ändert, da der CPC über eine Pumpe verfügt und der Aufbau mit dem Mikrofon hingegen nur einen Gegendruck verursacht, dies wurde mit einem Massflowmeter (MFM) kontrolliert.

Somit wird ein näherungsweise monodisperses Aerosol erzeugt und mit dem Mikrofon die Konzentration bei einigen Größen zwischen 160 nm und 400 nm festgestellt.

Auf diese Art und Weise kann auch die kleinste Partikelgröße ausfindig gemacht werden, welche noch detektiert werden kann.

Tabelle 5.2: Mikrofon und SMPS im Vergleich bei verschiedenen Partikelgrößen

d_p	Mikro	CPC	Zähleffizienz
μm	$\frac{\#}{\text{cm}^3}$	$\frac{\#}{\text{cm}^3}$	%
Filter	4.1	-	-
400	11.9	51	23.3
385	17.3	57	30.4
372	14.3	64	22.3
346	14.1	80	17.6
322	16.3	99	16.5
300	12.8	121	10.6
279	14.9	142	10.5
260	13.3	170	7.8
241	20.4	200	10.2
225	12.8	234	5.5
200	9.6	290	3.3
180	7.5	349	2.1
160	13.5	426	3.2

Die Messergebnisse sind in Tabelle 5.2 aufgelistet, obwohl die Schwellspannung schon so nahe an das Grundrauschen gelegt wurde, dass selbst mit einem HEPA-Filter vermeintliche Partikel detektiert werden, kann trotzdem nur ein Bruchteil der Partikel gezählt werden. Selbst bei 400 nm ragen die meisten Signalspitzen nicht über das Grundrauschen hinaus und sind daher nicht mehr zuverlässig detektierbar, siehe Abschnitt 5.3.

Es muss bedacht werden, dass mit dem Mikrofon bloß die Änderung bei ein- bzw. austreten, nicht aber das permanente Vorhandensein eines Partikels erfasst werden kann. Die Konzentrationen können bei so kleinen Partikeln wie sie durch NaCl entstehen, deutlich höher sein als mit PSL Kugeln. Sind die Partikel nicht homogen verteilt, beeinflusst dies unter Umständen das Messergebnis und es kann eine Ansammlung als nur ein Partikel

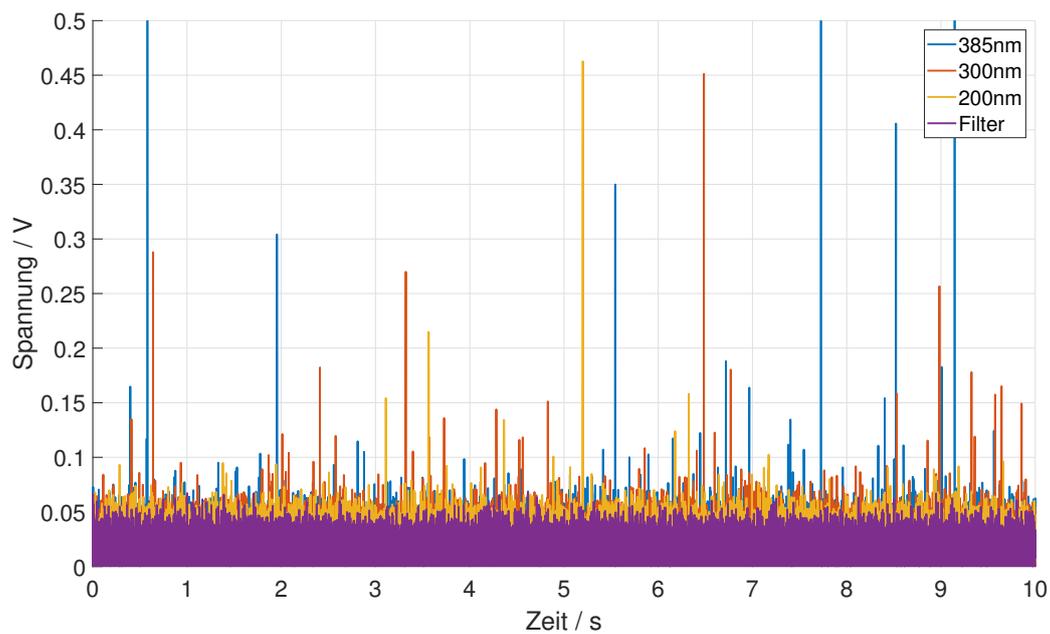


Abbildung 5.10: Messergebnisse mit verschiedenen Partikelgrößen, mit NaCl

gezählt werden.

Aus dem Experiment muss geschlossen werden, dass die kleinste messbare Partikelgröße jedenfalls höher als 400 nm liegt. Es ist zu beachten, dass das vorliegende System nicht exakt dem vorgeschlagenen Messprinzip entspricht und lediglich als Proof-of-Principle herangezogen werden sollte. Die hier gefundene Einschränkung ist nicht uneingeschränkt auf das vorgeschlagene Messsystem übertragbar.

5.4 Kondensationspartikel

Bei diesen Messungen wurde das Mikrophon an Stelle der Zähloptik eines Condensation Particle Counters (CPC) eingebaut, dazu wurde die Halterung Abb. 4.3b verwendet. Im CPC wachsen die Partikel auf eine Größe von *ca.* $10 \mu\text{m}$ auf, um vom nachfolgenden Streulichtsensor detektiert werden zu können. Je größer die Partikel sind desto größer ist auch der Ausschlag im Mikrophonsignals. Damit ergibt sich eine gute Möglichkeit das System zu kalibrieren, weil der Unterschied zwischen Grundrauschen und Nutzsignal sehr groß ist.

Als Ausgangsmaterial für die Lösung im Atomizer wurde wieder NaCl verwendet, damit kann eine hohe Konzentrationen erzielt werden, die Größenverteilung ist belanglos da die Partikel im CPC ohnehin wachsen und als Referenz eine klassische Zähloptik verwendet wird.

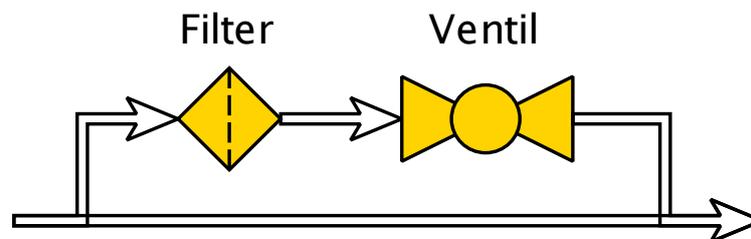


Abbildung 5.11: Aufbau einer Verdünnungsbrücke

Durch eine Verdünnungsbrücke wie sie in Abb. 5.11 zu sehen ist, kann die Konzentration reduziert werden, indem ein Teil des Aerosols gefiltert und anschließend dem restlichen Aerosol wieder beigemischt wird. Durch ein Nadelventil lässt sich somit das Verhältnis von gefiltertem zu ungefiltertem Aerosol und somit die Konzentration verändern.

Außerdem ist es bei dieser Messung besonders einfach, für die Referenzmessung mittels CPC gleiche Bedingungen zu schaffen, da die beiden Messsysteme somit bloß die Zähloptik und der Durchfluss unterscheiden.

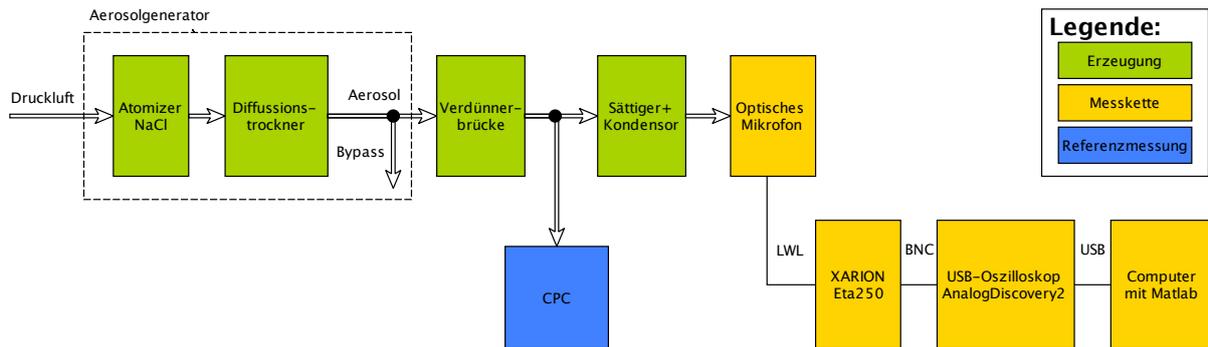


Abbildung 5.12: Messaufbau für einen Vergleich mit CPC

Das Setup wird in einem Modus betrieben in dem der CPC mit $1.5 \frac{l}{min}$ an Probe versorgt wird und $0.5 \frac{l}{min}$ durch das Mikrofon geführt werden.

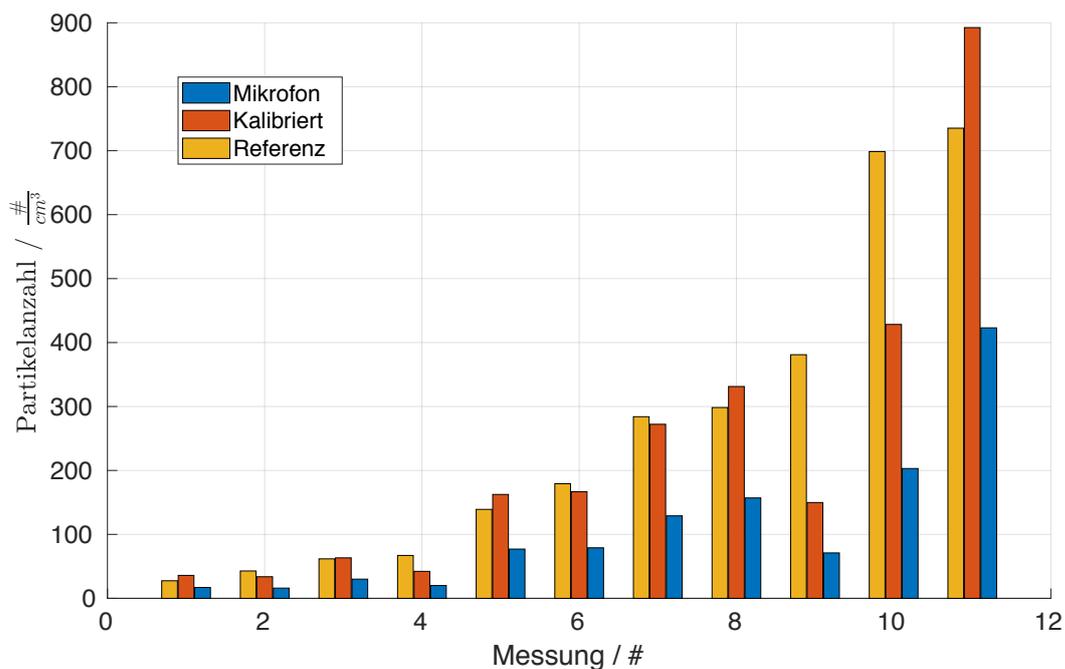


Abbildung 5.13: Vergleich der Messergebnisse von CPC mit herkömmlicher Messoptik mit CMA und Mikrofon

Die Konzentration wurde schrittweise erhöht und mitprotokolliert. Die Ergebnisse in Abb. 5.13 zeigen wiederum eine gute Korrelation zur Referenzmessung, für die Kalibrierung wurde der durch Minimierung der Fehlerquadrate errechnete Korrekturfaktor k_{gem} herangezogen. Durch Annahme eines linearen Verlaufs des Fehlers über die Konzentration, kann mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ein Kalibrierfaktor berechnet

werden. Bei auswerten dieser elf Messungen ergibt sich ein Faktor von

$$\min_{k_{gem}} \left\{ \sum (\#_{Ref} - k_{gem} \cdot \#_{Mikro})^2 \right\} \quad (5.4)$$

$$k_{gem} = 2.11$$

Dieser Faktor kann aber auf einen systematischen Messfehler im Aufbau zurückgeführt werden, nachdem die Öffnung der Düse einen Durchmesser von 0.9 mm hat und der Laser nur $300\ \mu\text{m}$ breit ist, strömt ein Teil des Aerosols daran vorbei.

$$A_{Duese} = \left(\frac{0.9\text{ mm}}{2} \right)^2 \cdot \pi = 0.64\text{ mm}^2 \quad (5.5)$$

$$A_{Laser} = 300\ \mu\text{m} \cdot 0.9\text{ mm} = 0.27\text{ mm}^2$$

$$k_{ber} = \frac{A_{Duese}}{A_{Laser}} = 2.36$$

Der berechnete Korrekturfaktor basierend auf geometrischen Überlegungen passt mit dem berechneten aus dem Vergleich der Messungen hinreichend gut überein. Unterschiede ergeben sich einerseits aus der nicht exakt bekannten Geometrie des Mikrofans sowie andererseits aus experimentellen Unsicherheiten.

Mit der Matlabfunktion *polyfit* wurde der Zusammenhang zwischen den Messwerten und der Referenzmessung mit einer linearen Funktion beschrieben und in Abb. 5.14 dargestellt. Daraus ergibt sich eine Steigung von $P_1 = 0.41$ und ein Offset von $P_2 = 1.01$, unter Vernachlässigung des Offsets lässt sich ein Kalibrierfaktor bestimmen:

$$\#_{Ref} = \frac{\#_{Mikro} - P_2}{P_1} \approx k_{polyfit} \cdot \#_{Mikro} \quad (5.6)$$

$$k_{polyfit} = 2.45$$

Das Bestimmtheitsmaß der lineare Regression beträgt hierbei $R^2 = 0.7878$.

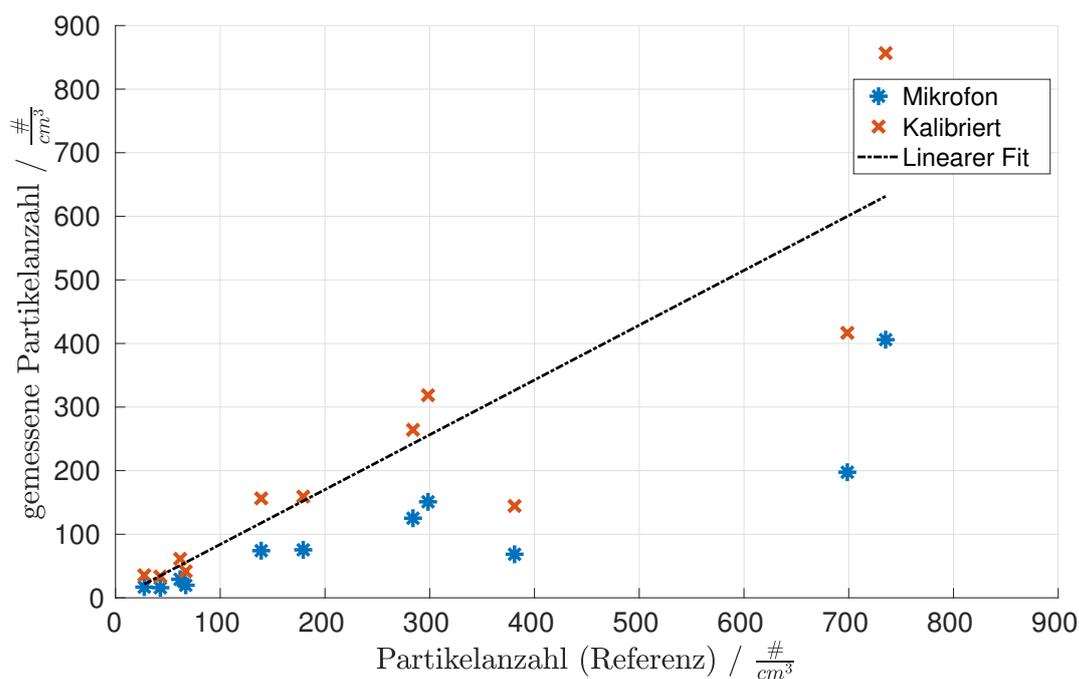


Abbildung 5.14: Vergleich der Messergebnisse von CPC mit herkömmlicher Messoptik mit CMA und Mikrofon, Linearer Fit

5.5 Messungen mit dem Gesamtsystem

Mit diesen Messergebnissen wird gezeigt wie gut das entwickelte System nun funktioniert und in welchen Bereichen noch Entwicklungspotential steckt. Der wesentliche Unterschied zu den vorherigen Messungen ist, dass mit diesem System der Durchfluss permanent mitgemessen werden kann. Daraus kann einerseits die Einschränkung der Pulsbreite der zu zählenden Maxima erfolgen, andererseits geht die Kenngröße "Volumenstrom" direkt in das Ergebnis, die Partikel pro Kubikzentimeter, mit ein und sollte daher sehr gut gekannt werden.

Der Messaufbau ist gleich wie in Abb. 5.1, als Referenz dient wiederum ein APS. Bei den Testversuchen wurden PSL Kugeln zwischen 750 nm und $3\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser verwendet. Die besten Ergebnisse wurden mit $2\text{ }\mu\text{m}$ großen Partikeln erzielt, mit dem System konnte eine Partikelanzahlkonzentration von $6.3\frac{\#}{cm^3}$ festgestellt werden, die Referenzmessung lieferte $8\frac{\#}{cm^3}$. Der in Abschnitt 5.4 diskutierte Kalibrierfaktor von $k_{ber} = 2.45$ wurde hierbei schon berücksichtigt. Allerdings können auf Grund der beschränkten Rechenleistung des Raspberry Pi immer nur wenige Kubikzentimeter analysiert werden.

Bei $3\text{ }\mu\text{m}$ großen Partikel muss so sehr darauf geachtet werden, dass der Aerosolschlauch

gerade geführt wird, da die Partikel aufgrund Ihrer Trägheit keinen scharfen Kurven folgen können und verloren gehen. Um die Messgrenze was die Partikelgröße betrifft nach oben zu verschieben, müsste der Sensorkopf so aufgebaut werden dass ein gerader Aerosolstrom gewährleistet wird. Dazu ist es auch notwendig den Durchfluss erst nach dem Sensorkopf zu erfassen. Es hat sich gezeigt das der dafür vorgesehene Durchflusssensor nur bedingt eignet, da das Aerosol eine 90° Kurve zu bewältigen hat und somit große Partikel dabei leicht mit der Seitenwand kollidieren. Dies kann durch konstruktive Veränderung des Einlasses des Durchflusssensor behoben werden.

Bei kleinen Partiken muss der Durchfluss sehr gering gehalten werden um das Rauschen gering zu halten, dadurch sinkt die analysierte Aerosolmenge. Abhilfe hierfür schafft nur die Integration des Interferometers in die Düse, durch den nahtlosen Übergang werden Turbulenzen weitgehend vermieden und es tritt weniger Rauschen auf.

Zusammenfassung und Diskussion

Ein neuartiges auf optischer Interferenz in einem Fabry-Perot Resonator basierendes Messprinzip wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit erörtert, theoretische Eigenschaften mittels vereinfachter analytischer Methoden abgeschätzt und eine experimentelle Überprüfung erbracht. Es konnte gezeigt werden, dass das vorgeschlagene Messprinzip in einer leicht abgeänderten experimentellen Realisierung mittels eines kommerziell erhältlichen optischen Mikrofones zum Zählen von Partikeln verwendet werden kann. Es wurde weiters ein Messsystem erarbeitet, das teilautomatisierte Messungen erlaubt.

Nach der theoretischen Einarbeitung in die Materie der Aerosolmesstechnik, wurden Experimente zur Evaluierung des Messprinzips durchgeführt. Nachdem sich die grundsätzliche Funktion bestätigte, wurden Schritt für Schritt die Grenzen ausgelotet.

Einschränkungen bzw. kritischen Parameter des Messsystems sind:

- Durchfluss
- Konzentration
- Partikelgröße

Außerdem kann mit einem Interferometer nur das Produkt aus n und d bestimmt werden, daraus ergeben sich systematische Einschränkungen, da eine der beiden Größen als bekannt vorausgesetzt werden muss.

Der Durchfluss beeinflusst einerseits das Hintergrundrauschen und andererseits die Häufigkeit ein Partikel anzutreffen, es muss daher ein Kompromiss gefunden werden welcher beide

Interessen miteinander vereint. Die Turbulenzen welche für das Hintergrundrauschen verantwortlich sind, entstehen in erster Linie durch die Düse. Mit dem konstruierten Halter kann bis etwa $0.5 \frac{l}{min}$ gemessen werden, darüber hinaus ist keine Sinnvolle Unterscheidung von Signalspitzen und Grundrauschen mehr möglich.

Die in Abschnitt 3.4 berechnete maximale Konzentration kann auf Grund der fehlenden Gleichverteilung über das Volumen nicht erreicht werden. Da sich schon bei geringerer Konzentration mehrere Partikel gleichzeitig in der Messzelle befinden und nur Änderungen bei Ein- und Austreten erfasst werden können, sinkt dadurch der Ausschlag des Messsignals.

Das größte Problem der unteren Messgrenze hinsichtlich Partikeldurchmesser ist das Grundrauschen, aber auch bei sehr niedrigen Durchflüssen ist es nicht sinnvoll kleinere Partikel als 500 nm zu analysieren. Wobei keine harte Grenze definiert werden kann, da die Anzahl der Signalspitzen kontinuierlich mit der Partikelgröße sinkt und bei bekannt sein der Partikelgröße die Abweichung teilweise mit einem Kalibrierfaktor behoben werden könnte.

Es ist hierbei zu beachten, dass der Arbeitspunkt des Mikrofones nicht dem Arbeitspunkt des für Partikelmessungen vorgeschlagenen Systems entspricht. Der Arbeitspunkt für Partikelmessungen liegt bei minimalem Signal am Detektor. Es ist zu erwarten, dass das Rauschen an diesem Punkt niedriger ist, da auch das Grundsignal niedriger ist. Auch kann das Rauschen durch Weglassen der Düse und integrieren des Fabry-Perot Interferometers in den Aerosolfluss minimiert werden, da es zu keinen Turbulenzen mehr kommt. Daher ist zu erwarten, dass ein auf Partikel optimiertes System eine bessere Performance als das Mikrofon *Eta250* zeigt.

Um die praktische Realisierbarkeit zu untermauern wurde ein Gerät entworfen, mit dem in Verbindung mit dem optischen Mikrofon die Partikelanzahlkonzentration bestimmt werden kann. Trotz der oben genannten Einschränkungen konnten mit diesem System reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, welche sich jeweils um einen konstanten Faktor von der Referenzmessung unterscheiden.

Als abschließendes Fazit lässt sich sagen, dass das bestimmen der Partikelanzahlkonzentration mit dieser Methode möglich ist und desto genauere Ergebnisse erzielt werden je größer die Partikel sind.

Durch vereinfachte analytische Abschätzungen konnte gezeigt werden, dass das vorge-

schlagenen interferometrische System einem Streulichtsensor in der Signalhöhe überlegen ist und weiter das Signal eine Abhängigkeit der Partikelgröße bzw. dem Brechungsindex aufweist. Diese Abhängigkeit konnte unter Verwendung des optischen Mikrofones experimentell nicht exakt ermittelt werden. Es ist dennoch tendenziell eine Abnahme des Signals bei kleiner werdenden Partikeln zu erkennen.

Ausblick

Die vorliegende Arbeit kann als Proof-of-principle für das vorgeschlagene interferometrische Messprinzip gesehen werden. Optimierungspotential ist in folgenden Bereichen vorhanden:

Durch einen sehr einfachen Aufbau wurde bereits dessen Funktion bestätigt, da nur wenige Parameter verändert wurden, liegt es nahe den optimalen Arbeitspunkt bzw. Aufbau nicht gefunden zu haben.

Außerdem übersteigt das hier verwendete optische Mikrofon die notwendigen Anforderungen hinsichtlich der Empfindlichkeit deutlich. Es ergeben sich grob gesagt drei Kategorien, welche optimiert werden könne:

- **Kosten**
- **Miniaturisierung**
- **Erweiterung**

Die teuerste Komponente ist der abstimmbare Laser und seine Ansteuerung, um ein kostengünstiges System zu entwerfen, muss dieser ersetzt werden.

Ein Alternativer Ansatz ist, anstatt des Lasers eine Breitbandigen Lichtquelle zu verwenden und dafür den Detektor als Wellenlängenabhängiges Array auszuführen. Somit entfällt die Regelung der Wellenlänge. Die Änderung des Signals kann so aber trotzdem mit dem Detektor mitverfolgt werden wenn auch nur diskret.

Mit dem obigen Ansatz entfällt die große thermische Masse welche für einen stabilen Laser

notwendig ist und somit fällt diese Komponente deutlich kleiner aus.

Der nächste logische Schritt ist, den Sensorkopf selbst kleiner aufzubauen. Dies lässt sich auch kostengünstig realisieren, da die Anforderungen an diesen bei weitem nicht so hoch sind wie für ein Mikrofon. Eine zu hohe Finesse des Fabry-Perot Interferometer würde nur zu einer komplexeren Auswertung führen und ist daher nicht nur vorteilhaft.

Es ist bereits möglich eine kleine Cavity in eine einzelne Glasfaser zu ätzen, es muss aber auch beachtet werden dass das analysierte Volumen auch mit der Sensorgröße sinkt. Somit sinkt bei kleinen Konzentrationen die Wahrscheinlichkeit überhaupt ein Partikel anzutreffen.

Da der Brechungsindex im allgemeinen nicht bekannt ist und nur $n \cdot d$ gemessen werden kann, ist eine eindeutige Zuordnung nicht möglich. Abhilfe würde ein ähnlicher Aufbau wie bei einem Aerodynamic Particle Sizer (APS) schaffen. Wird die Düse von einem Sheathflow umgeben so werden die Partikel abhängig ihrer Größe unterschiedlich beschleunigt. Die Flugzeit kann anschließend über zwei hintereinander angeordneten Sensoren bestimmt werden, damit kann die Größe und Anzahl als auch der Brechungsindex der Partikel bestimmt werden und so auf dessen Material geschlossen werden. Anstelle der zwei Sensoren wäre es auch möglich, nur einen Sensor mit einem so breiten Laserstrahl zu verwenden, dass allein durch die Pulsbreite die Flugzeit bestimmt werden kann. Nachteilig daran ist aber die Abnahme der Intensität mit der Laserbreite, da das Verhältnis der Fläche des Partikels $A_{Partikel}$ zu Laserfläche A_{Laser} sinkt.

Weiterführende Arbeiten umfassen weiters eine wellenoptische Betrachtung bzw. Simulation des Aufbaus um den Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Signal zu finden.

Literaturverzeichnis

- [1] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed. s.l.: Wiley-Interscience, 2012. [Online]. Available: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1120423>
- [2] Palas GmbH, Karlsruhe, Germany, *Brevier to Aerosol Technology*, 2nd ed., 2011.
- [3] Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Immissionsschutzgesetz – Luft, Fassung vom 23.06.2019. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10011027>
- [4] Umweltbundesamt, “Feinstaub (pm2.5),” abgerufen am: 22.06.2019. [Online]. Available: www.umweltbundesamt.at/pm25
- [5] Wikipedia, “Die freie enzyklopädie: Emission (umwelt),” abgerufen am: 27.09.2019. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Emission_\(Umwelt\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Emission_(Umwelt))
- [6] Umweltbundesamt, “Grenz-, ziel- und schwellenwerte,” abgerufen am: 23.06.2019. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftguete_aktuell/grenzwerte/
- [7] Right to clean Air, “Fristen zur einhaltung der grenzwerte,” abgerufen am: 23.06.2019. [Online]. Available: <https://www.right-to-clean-air.eu/hintergruende/eu-fristen-zur-einhaltung-der-grenzwerte/>
- [8] Mikhail Polyanskiy, “Refractive index database,” abgerufen am: 23.06.2019. [Online]. Available: <https://refractiveindex.info>
- [9] J. Hoffmann, *Taschenbuch der Messtechnik*, 7th ed. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015.

- [10] Grimm Aerosol, “The dust decoder: Model 11-d,” abgerufen am: 11.09.2019. [Online]. Available: <https://www.grimm-aerosol.com/products-en/indoor-air-quality/the-dust-decoder/11-d/>
- [11] Heinz Johannes Fissan, “Schematic of opposed flow diffusion charger,” abgerufen am: 11.09.2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-opposed-flow-diffusion-charger_fig3_239791819
- [12] Wikipedia, “Die freie enzyklopädie: Differentieller mobilitätsanalysator,” abgerufen am: 22.06.2019. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Differentieller_Mobilit%20analysator
- [13] E. Hecht, *Optics*, 5th ed., ser. Pearson global edition. Boston and Columbus and Indianapolis: Pearson, 2017.
- [14] spektrum.de, “Lexikon: Kohärenz,” abgerufen am: 17.09.2019. [Online]. Available: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kohaerenz/8123>
- [15] P. Laven, “Mieplot.” [Online]. Available: www.philiplaven.com/mieplot.htm
- [16] XARION laser acoustics, “Membrane wireless microphone with the help of light interference,” Patent, 27.06.2006.