



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

# **Lasertriangulationsmessung der zeitlichen Änderung der Staubkuchendicke an flexiblen Filtermedien zur Validierung numerischer Simulationen**

**Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades**

in der  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

vorgelegt von  
**Matthias Haenecke, M.Eng.**  
aus Halle (Saale)

Wuppertal 2020

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20210218-164743-3

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20210218-164743-3>]

DOI: 10.25926/j94s-7w13

[<https://doi.org/10.25926/j94s-7w13>]

# Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist als Ergebnis einer kooperativen Promotion zwischen der Bergischen Universität Wuppertal und der Hochschule Nordhausen entstanden.

Besonders danke ich meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt vom Institut für Partikeltechnologie des Fachbereichs Sicherheitstechnik und Umweltschutz der Bergischen Universität Wuppertal für die gewährten Freiheiten und die hervorragende Betreuung meiner Dissertation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Achim Dittler danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Poerschke von der Hochschule Nordhausen, welcher mir während meiner Tätigkeit an der Hochschule Nordhausen stets beratend zur Seite stand, mich moralisch unterstützt und als Projektverantwortlicher alles dafür getan hat, dass sowohl das Projekt *IngenieurNachwuchs*, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, als auch die Promotion erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Natürlich gilt mein Dank auch all meinen Kollegen der Hochschule Nordhausen und der Bergischen Universität Wuppertal, welche mich bei meiner Promotion fachlich und moralisch unterstützt haben.

Abschließend danke ich meiner Familie, sowie meiner Partnerin Sara für die aufgebrachte Geduld und Unterstützung.

**Zusammenfassung:** Diese Arbeit behandelt die Entwicklung eines Messverfahrens zur Online-Ermittlung der Staubkuchendicke an einem Filterschlauch. In unzähligen modernen Anlagen wird die Oberflächenfiltration eingesetzt, um Partikeln aus Gasen abzuscheiden. Dabei bildet sich an der Oberfläche des Filtermediums ein Staubkuchen aus, welcher einen maßgeblichen Einfluss auf den Prozess der Partikelabscheidung und den Energieverbrauch der Anlage besitzt. Um die Bildung des Staubkuchens genauer zu analysieren, wird in der vorliegenden Arbeit ein Messsystem untersucht, welches mittels Lasertriangulation die Staubkuchendicke während des Anlagenbetriebs erfasst. Zunächst werden Einflussfaktoren ermittelt, welche das Messsystem beeinflussen. Es zeigt sich, dass für die Messung von validen Werten ein Differenzmessverfahren, bestehend aus zwei Sensoren, einzusetzen ist. Die Differenzmessung bedingt die Applikation eines Referenzmessobjekts am Filterschlauch. Mithilfe dieses Referenzmessobjekts ist es möglich, die Staubkuchendicke unabhängig von der Verformung des Filtermediums infolge des Druckverlusts zu untersuchen. Nach der Analyse der einflussnehmenden Parameter wird das Messsystem an einem Teststand nach VDI 3926 eingesetzt. Es werden Messungen an unkonditionierten Prüffiltern mit und ohne ePTFE-Beschichtung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in der Bildung des Filterkuchens zwischen beschichteten und unbeschichteten Filtern. Weitere Messungen werden an einer Filterschlauchtestanlage durchgeführt. Hierbei wird das Messsystem unter realen Bedingungen eingesetzt und die Bildung des Staubkuchens an einem Filterschlauch untersucht. Die Ergebnisse werden vergleichend mit denen einer numerischen Simulation betrachtet. Es zeigt sich, dass die Messung der Staubkuchendicke als zusätzliche Validierungsgröße die Qualität von numerischen Simulationen verbessern kann. Das untersuchte Messsystem ist für die exakte Messung des Staubkuchens an flexiblen Filtermedien geeignet und liefert Ergebnisse mit bislang nicht erreichter Genauigkeit.

**Abstract:** This thesis deals with the development of a measuring method for online determination of the dust cake thickness on a filter bag. In countless modern plants surface filtration is used to separate particles from gases. During this process a dust cake is formed on the surface of the filter medium. This dust cake has a significant influence on the process of particle separation. In order to investigate the formation of the dust cake in detail, a measuring system is investigated in this thesis. The measuring system uses the principle of laser triangulation to measure the thickness of the dust cake during plant operation. First of all, factors are determined which influence the measuring system. It is shown that for the measurement of valid values a differential measurement method consisting of two sensors has to be used. The differential measurement method requires the application of a reference object to the filter bag. By using this reference object, it is possible to investigate the formation of the dust cake independently of the deformation of the filter medium due to the pressure drop. After the analysis of the influencing parameters, the measuring system is used on a test rig according to VDI 3926. Measurements are carried out on unconditioned test filters with and without coating. The results show significant differences in the formation of the filter cake between coated and uncoated filters. Further measurements are carried out on a filter bag test rig. In this case, the measuring system is used under realistic conditions and the formation of the dust cake on a filter bag is examined. The results are compared with those of a numerical simulation. It is shown that the measurement of the dust cake thickness as an additional validation variable can improve the quality of numerical simulations. The investigated measuring system is suitable for the exact measurement of the dust cake on flexible filter media and delivers results with very high accuracy.



# Inhaltsverzeichnis

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung in die Thematik . . . . .	1
1.2 Struktur der Dissertation . . . . .	2
1.3 Stand der Wissenschaft . . . . .	2
1.3.1 Numerische Untersuchung von Vorgängen der Oberflächenfiltration	2
1.3.2 Staubkuchenmessung an Filterschläuchen . . . . .	3
1.4 Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1 Grundlagen der Oberflächenfiltration . . . . .	7
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise . . . . .	7
2.1.2 Abscheidemechanismen . . . . .	9
2.1.3 Druckverlust . . . . .	13
2.2 Grundlagen der numerischen Simulation . . . . .	14
2.2.1 RANS-Gleichungen . . . . .	14
2.2.2 Fluidmodellierung . . . . .	15
2.2.3 Modellierung der Partikelbewegung . . . . .	15
2.3 Grundlagen der Laserdistanzmessung . . . . .	18
2.3.1 Aufbau und Wirkungsprinzip . . . . .	18
2.3.2 Lasertypen . . . . .	18
2.3.3 Anwendungen . . . . .	19
2.3.4 Prinzip der Laserdistanzmessung . . . . .	20

<b>3</b>	<b>Lasertriangulationsteststand</b>	<b>27</b>
3.1	Ziel der Versuche . . . . .	27
3.2	Beschreibung des Versuchsstands . . . . .	27
3.3	Messtechnik . . . . .	30
3.3.1	Differenzdruckmessung . . . . .	30
3.3.2	Lasertriangulationsmessung . . . . .	31
3.4	Durchgeführte Versuchsreihen . . . . .	32
3.4.1	Messverfahren . . . . .	32
3.4.2	Vermessung des Filterschlauchs . . . . .	37
3.4.3	Einfluss der Messposition . . . . .	41
3.4.4	Einfluss der transparenten Schutzmaterialien . . . . .	44
3.4.5	Einfluss von Verschmutzung . . . . .	47
3.4.6	Einfluss von Farbe und Material des Messobjekts . . . . .	51
3.4.7	Referenzmessobjekt . . . . .	51
3.5	Modell zur Verschmutzungsabschätzung . . . . .	55
3.5.1	Ziel der Modellierung . . . . .	55
3.5.2	Strömungsfeld . . . . .	55
3.5.3	Partikelbahn . . . . .	56
3.5.4	Implementierung . . . . .	59
3.5.5	Randbedingungen . . . . .	59
3.5.6	Ergebnisse . . . . .	63
3.6	Einflussnehmende Parameter . . . . .	64
3.7	Umsetzungskonzept für Filterteststände . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Filterstreifenteststand</b>	<b>67</b>
4.1	Ziel der Versuche . . . . .	67
4.2	Beschreibung des Versuchsstands . . . . .	67
4.3	Betriebsparameter . . . . .	70
4.3.1	Filtermedien . . . . .	70
4.3.2	Volumenströme . . . . .	70
4.3.3	Staubdispergierung und -dosierung . . . . .	71
4.4	Messtechnik . . . . .	72
4.4.1	Volumenstromsensoren . . . . .	72
4.4.2	Partikelkonzentration . . . . .	72
4.5	Messergebnisse . . . . .	73
4.5.1	Effekt der ePTFE-Membrane . . . . .	73
4.5.2	Staubkuchenwachstum . . . . .	74
4.5.3	Druckverlust . . . . .	74
4.5.4	Partikelkonzentration . . . . .	74

4.5.5	Gravimetrische Vergleichsmessung . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Filterschlauchteststand</b>	<b>77</b>
5.1	Ziel der Versuche . . . . .	77
5.2	Beschreibung des Versuchsstands . . . . .	77
5.3	Betriebsparameter . . . . .	79
5.3.1	Volumenströme . . . . .	79
5.3.2	Partikelkonzentration . . . . .	80
5.3.3	Druckverluste . . . . .	80
5.3.4	Verwendete Stäube . . . . .	80
5.3.5	Verwendetes Filtermedium . . . . .	84
5.3.6	Konditionierung des Filters . . . . .	84
5.4	Versuchsablauf . . . . .	86
5.5	Messtechnik . . . . .	87
5.5.1	Messgeräte . . . . .	87
5.5.2	Messstellen . . . . .	91
5.5.3	Kalibrierung . . . . .	91
5.6	Betrachtung der Messunsicherheiten . . . . .	93
5.6.1	Differenzdrucksensor . . . . .	93
5.6.2	Volumenstromsensoren . . . . .	93
5.6.3	Partikelkonzentrationsmessung . . . . .	93
5.6.4	Lasertriangulationsmessung . . . . .	94
5.7	Analyse der Schwingungen . . . . .	94
5.8	Messergebnisse . . . . .	96
5.8.1	Wachstum des Staubkuchens . . . . .	96
5.8.2	Filterkoeffizienten . . . . .	98
5.8.3	Partikelkonzentration . . . . .	98
5.8.4	Entwicklung über mehrere Messreihen . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Numerische Untersuchung</b>	<b>103</b>
6.1	Ziel der Untersuchung . . . . .	103
6.2	Verwendete Software und Hardware . . . . .	103
6.3	Modellierung . . . . .	103
6.3.1	Geometrie . . . . .	103
6.3.2	Diskretisierung . . . . .	106
6.3.3	Fluidmodelle . . . . .	106
6.3.4	Partikelmodelle . . . . .	106
6.3.5	Randbedingungen . . . . .	108
6.3.6	Solvereinstellungen . . . . .	110
6.3.7	Initialisierung . . . . .	111

6.4	Simulationsergebnisse . . . . .	111
<b>7</b>	<b>Vergleich und kritische Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>117</b>
7.1	Ziel des Vergleichs . . . . .	117
7.2	Ergebnisvergleich von Experiment und Simulation . . . . .	117
7.2.1	Staubkuchendicke . . . . .	117
7.2.2	Staubkuchenwachstum . . . . .	118
7.2.3	Druckverlust . . . . .	118
7.3	Kritische Diskussion der Ergebnisse . . . . .	119
7.3.1	Ergebnisse des Lasertriangulationsteststands . . . . .	119
7.3.2	Ergebnisse des Filterstreifenteststands . . . . .	121
7.3.3	Ergebnisse des Filterschlauchtteststands . . . . .	121
7.3.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchung . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>123</b>
8.1	Zusammenfassendes Fazit . . . . .	123
8.1.1	Aufgestellte Thesen . . . . .	123
8.1.2	Auswertung These I . . . . .	123
8.1.3	Auswertung These II . . . . .	125
8.1.4	Auswertung These III . . . . .	126
8.1.5	Weitere Erkenntnisse . . . . .	126
8.2	Mögliche weiterführende Forschung . . . . .	127
8.2.1	Simulation . . . . .	127
8.2.2	Lasertriangulation . . . . .	129
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Regenerierungsmechanismen . . . . .	9
2.2	Abscheidegrade . . . . .	13
2.3	Druckverlustkurven . . . . .	14
2.4	Aufbau Laser . . . . .	18
2.5	Prinzip Laufzeitmessung . . . . .	20
2.6	direkte und diffuse Reflexion . . . . .	21
2.7	Messprinzip - Lasertriangulation . . . . .	22
2.8	Durchmesseränderung Laserstrahl . . . . .	23
2.9	Doppelte Streuung durch unebenes Messobjekt . . . . .	24
3.1	Triangulationsteststand - Übersichtsfoto und Schema . . . . .	28
3.2	Triangulationsteststand . . . . .	28
3.3	Funktion induktiver Sensor . . . . .	29
3.4	Differenzdrucksensor HESCH HE 5409 . . . . .	30
3.5	Prinzip Differenzdruckmessung . . . . .	31
3.6	Ringmessstelle . . . . .	31
3.7	Frequenzverstärkung/-auslöschung . . . . .	31
3.8	Verfeinerung Stützkorb . . . . .	33
3.9	Ausgleichsfunktionen . . . . .	34
3.10	Messwerte ohne Ausgleichsfunktion . . . . .	35
3.11	Messwerte mit Ausgleichsfunktion . . . . .	36
3.12	Aufbau Differenzmessung . . . . .	37
3.13	Ergebnisse Filterschlauchvermessung . . . . .	40
3.14	Messposition in Relation zum Stützkorb . . . . .	41
3.15	Fehlersummen und Schwankungsbreiten der Messpositionen . . . . .	42
3.16	Ergebnisse verschiedener Messpositionen . . . . .	42
3.17	horizontale/vertikale Ausrichtung der Lasertriangulationssensoren . . . . .	43
3.18	Parallelverschiebung Laserstrahl durch Glas . . . . .	44
3.19	Teststand Referenzmessobjekt . . . . .	45
3.20	Messpositionen Gläser . . . . .	46
3.21	Einfluss des Messwinkels im Glasdurchgang . . . . .	47

3.22	Übergang Tape zu Filtermedium - Mikroskopieaufnahme . . . . .	50
3.23	Verschmutzungsgrade des Referenzmessobjekts - Mikroskopieaufnahme . . . . .	50
3.24	Referenzobjekt - Ansatz 1 . . . . .	52
3.25	Verbiegung Referenzmessobjekt . . . . .	53
3.26	Referenzobjekt - Ansatz 2 . . . . .	53
3.27	Referenzobjekt - Ansatz 3 . . . . .	54
3.28	Referenzmessobjekt Tape . . . . .	54
3.29	Referenzobjekt - Fehler nahe Stützkorb . . . . .	55
3.30	Staupunktströmung . . . . .	56
3.31	Programmablaufplan des erstellten Modells . . . . .	60
3.32	Modellierung der Abscheidung . . . . .	62
3.33	Funktion der Verschmutzungsneigung . . . . .	63
4.1	Aufbau Teststand nach VDI 3926 . . . . .	68
4.2	Einbauten Filterstreifenteststand . . . . .	69
4.3	Messpositionen Filterstreifenteststand . . . . .	69
4.4	Filteroberfläche - Mikroskopieaufnahme . . . . .	70
4.5	Bürstendispergierer PALAS BEG 1000 . . . . .	71
4.6	Aufbau Bürstendispergierer . . . . .	71
4.7	Messergebnisse Filterstreifenteststand . . . . .	73
5.1	Filterschlauchteststand - Übersichtsfoto . . . . .	78
5.2	Verteilungsdichte APYRAL16 . . . . .	83
5.3	Verteilungssumme APYRAL16 . . . . .	83
5.4	Datenblatt Filtermedium . . . . .	85
5.5	Messprinzip Dusthunter T50 . . . . .	87
5.6	Prinzip Messkreuz . . . . .	90
5.7	Übersicht - Messstellen . . . . .	91
5.8	Auftretende Schwingungen . . . . .	95
5.9	Ergebnis der Schichtdickenmessung . . . . .	96
5.10	Einfluss Porosität auf Staubkuchenwachstum . . . . .	97
5.11	Ergebnisse für luftdurchlässiges Tape . . . . .	100
5.12	Ergebnisse für luftundurchlässiges Tape . . . . .	101
5.13	Ergebnisvergleich luftdurchlässig/luftundurchlässig . . . . .	102
6.1	Geometrie . . . . .	104
6.2	Symmetrieebene . . . . .	104
6.3	Diskretisierung der Teststandgeometrie . . . . .	105
6.4	Partikelgrößenverteilung - Abgrenzung der Fraktionen . . . . .	107
6.5	Strömung am unteren Ende des Filterschlauchs . . . . .	113

6.6	Dicke des Staubkuchens . . . . .	114
6.7	Wachstum des Staubkuchens . . . . .	114
6.8	Druckverlust des Staubkuchens . . . . .	115
6.9	Änderung Druckverlust über Schichtdicke des Staubkuchens . . . . .	115



# Tabellenverzeichnis

3.1	Bestandteile des Messaufbaus zur Messung der Staubkuchendicke . . . . .	32
3.2	Daten des Lasertriangulationssensors KEYENCE LK-H087 . . . . .	32
3.3	Ergebnisse Filtervermessung . . . . .	39
3.4	Ergebnisse Messpositionen . . . . .	41
3.5	Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Gläser bei 0° Ausrichtung . .	46
3.6	Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Gläser bei 10° Ausrichtung .	46
3.7	Ergebnisse verschiedener Farben/Materialien . . . . .	51
3.8	Modell Verschmutzung Referenzmessobjekt - Materialwerte . . . . .	62
4.1	Komponenten Filterstreifenteststand . . . . .	68
4.2	Volumenströme - Filterstreifenteststand . . . . .	70
4.3	Komponenten Bürstendispergierer . . . . .	71
4.4	Staubkuchenwachstum mit und ohne ePTFE-Membrane . . . . .	74
4.5	Ergebnisse der gravimetrischen Vergleichsmessung . . . . .	75
5.1	Messreihen Schüttdichte . . . . .	81
5.2	Messreihen Materialdichte . . . . .	82
5.3	Durchgeführte Messreihen zur Partikelgrößenverteilung . . . . .	82
5.4	Ergebnisse der Messreihen zur Partikelgrößenverteilung (volumenbezogen)	84
5.5	Prüfablauf eines Filtrationsprüfstands nach DIN ISO 11057 . . . . .	86
5.6	Werte des Volumenstromreglers SCHAKO VRA-E 250 . . . . .	89
5.7	Messwerte der Kalibrierungsmessungen der Partikelkonzentration . . . . .	92
6.1	Repräsentative Durchmesser der einzelnen Fraktionen . . . . .	107
6.2	Volumenanteil der einzelnen Partikelfraktionen am Gesamtvolumenstrom	108
8.1	Benötigte Interfaces für mehrskalige Simulation . . . . .	128



# Symbolverzeichnis

## Lateinisch

Symbol	Einheit	Erklärung
$a$	$1/s$	Koeffizient
$a$	$m/s^2$	Beschleunigung
$c$	-	Koeffizient
$c$	$m/s$	Lichtgeschwindigkeit
$c$	$g/m^3$	Partikelkonzentration
$c$	$J/kg \cdot K$	spezifische Wärmekapazität
$e$	<i>variabel</i>	Messfehler
$f$	m	Brennweite
$f$	Hz	Frequenz
$g$	$m/s^2$	Erdbeschleunigung
$k$	$m^2 \cdot kg/s^2 \cdot K$	Boltzmann-Konstante
$k$	-	Extinktionskonstante
$m$	kg	Masse
$\dot{m}$	$kg/s$	Massenstrom
$n$	-	Brechungsindex
$p$	Pa	Druck
$q$	-	Volumenverteilungsdichte
$r$	m	Radius
$s$	m	Länge/Abstand/Dicke
$t$	s	Zeit
$u$	m	Umfang
$v$	$m/s$	Geschwindigkeit
$x$	m	Position/Abstand/Länge
$y$	m	Position
$z$	m	Position
$A$	$m^2$	Fläche
$B_{FM}$	$m^2$	Filtermediendurchlässigkeit

Symbol	Einheit	Erklärung
$B_{SK}$	$m^2$	Staubkuchendurchlässigkeit
$CFL$	-	Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl
$Cu$	-	Cunningham-Korrektur
$D$	m	Durchmesser
$E$	-	Einheitsmatrix
$E$	-	Extinktion
$E$	-	Gesamtabscheidegrad
$F$	N	Kraft
$FFB$	$m/min$	Filterflächenbelastung
$H$	-	Haftanteil
$I$	$W/m^2$	Lichtintensität
$K$	-	Koeffizient
$K_{FM}$	$1/m$	Filtermedienkoeffizient
$K_{SK}$	$m/kg$	Staubkuchenkoeffizient
$L$	m	Länge
$M$	-	Verstärkungsfaktor
$N$	-	Ladungsanzahl, Anzahl
$N$	-	Normierungskonstante
$O$	-	Opazität
$PDK$	$m^2/s$	Partikeldiffusionskoeffizient
$Pe$	-	Péclet-Zahl
$Q$	C	Elektrische Ladung
$R$	-	Sperreffektparameter
$Re$	-	Reynolds-Zahl
$T$	s	Periodendauer
$T$	K oder °C	Temperatur
$T$	-	Transmission
$V$	$m^3$	Volumen
$\dot{V}$	$m^3/h$	Volumenstrom
$VN$	-	Verschmutzungsneigung
$W$	$\mu m/min$	Wachstum

## Griechisch

Symbol	Einheit	Erklärung
$\alpha$	°	Winkel
$\beta$	°	Winkel
$\gamma$	1/s	Scherrate
$\epsilon$	-	Porosität
$\epsilon_0$	A·s/V·m	Dielektrizitätskonstante
$\eta$	Pa · s	dynamische Viskosität
$\eta$	-	Einzelfaserabscheidegrad
$\lambda$	W/m·K	Wärmeleitkoeffizient
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität
$\pi$	-	Kreiszahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\tau$	Pa	Spannungstensor
$\varphi$	-	Einzelauftreffgrad
$\psi$	-	Trägheitsparameter
$\Phi$	N	Coulomb-Kraft
$\phi$	-	Volumenanteil

## Indizes

Index	Erklärung
A	Umgebung (Ambient)
Abs	absolut
Bes	Beschleunigung
Dyn	dynamisch
Eff	effektiv
El	elektrisch
F	Fluid
FA	Faser
FM	Filtermedium
Frak	Fraktion
FS	Filterschlauch
GG	Grundgenauigkeit
i,j	Zählvariablen
Kuw	Kuwabara
L1	Laser 1
L2	Laser 2
m	Mittelwert
Max	Maximum
Mess	Messung
Min	Minimum
MU	Messunsicherheit
P	Partikel
Pot	Potential
Rein	Reingas
Rel	relativ
Roh	Rohgas
S	Schwerkraft
Saff	Saffmann
Sch	Schütt
SK	Staubkuchen
Stat	statisch
TD	Temperaturdrift
Tot	total
W	Widerstand
x	x-Komponente
y	y-Komponente

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Einführung in die Thematik

Die vorliegende Arbeit behandelt die Anwendung eines Lasertriangulationsmesssystems im Bereich der Entstaubung. Dieses weite Feld, welches auf der Entfernung von Partikeln aus Fluiden basiert, unterliegt einem stetigen Wandel. Zahlreiche Gesetze und Normen beschränken die Emission von Partikeln. Auf europäischer Ebene ist dies das 7. Umweltaktionsprogramm der Europäischen Union [1]. National ist vor allem das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [2] zusammen mit den Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) relevant. Diese regeln die zulässigen Emissionen, beispielsweise von Industrieanlagen. Zahlreiche Industrien erzeugen große Mengen an Staubpartikeln. Um zu verhindern, dass die Partikeln die Umgebungsluft kontaminieren, müssen diese abgeschieden werden. Diese Aufgabe übernimmt die Entstaubungstechnik. In der Entstaubung werden feste Partikeln aus gasförmigen Strömungen entfernt. Hierfür stehen die Methoden der filternden Abscheider, der elektrostatischen Abscheider, der Massenkraftabscheider sowie der Nassentstaubung zur Verfügung. Das älteste Verfahren ist dabei das der filternden Abscheider, bei denen die Partikeln an einer porösen Schicht abgeschieden werden. Weiterhin sind die filternden Abscheider in die Tiefenfiltration und die Oberflächenfiltration unterteilt. Schlauchfilteranlagen, als Teil der Oberflächenfiltration, scheiden die Partikeln an ihrer Oberfläche unter Bildung eines Staubkuchens ab. Aufgrund der Bildung des Staubkuchens, einer porösen Schicht aus Partikeln, entsteht ein wachsender Druckverlust in der Anlage. Dieser Druckverlust ist ein wesentlicher Betriebsparameter, da er die Energieeffizienz der Anlage maßgeblich beeinflusst. Zahlreiche Forschungsprojekte widmen sich der Optimierung der Schlauchfilteranlagen, sowohl unter dem Aspekt des Trenngrads, als auch um die Energieeffizienz zu verbessern. Es ist für die Entwicklung notwendig, die stattfindenden Prozesse zu bestimmen und zu modellieren. Hierbei sind exakte Messwerte wesentlich. An diesem Punkt liefert die vorliegende Arbeit einen Beitrag. Mithilfe einer exakten Vermessung des Staubkuchens auf Filterschläuchen ist es möglich, die stattfin-

denden Prozesse besser zu definieren und die Modellierung zu verbessern. Hinsichtlich der Modellierung sind Werte zur Modellvalidierung erforderlich, welche das entwickelte Messsystem zu liefern vermag.

## **1.2 Struktur der Dissertation**

Die vorliegende Dissertation beinhaltet acht Kapitel. Zunächst wird im aktuellen Kapitel eine Einführung in das Forschungsfeld gegeben sowie der Stand der Wissenschaft dargestellt. Anschließend werden Grundlagen in den Bereichen Oberflächenfiltration, Strömungssimulation und der Laserdistanzmessung behandelt. Diese Grundlagen werden zum Teil nur oberflächlich behandelt. Entsprechende Literaturhinweise zur Vertiefung sind in den einzelnen Abschnitten angegeben. Kapitel 3 beschreibt die Versuchsdurchführungen an einem Teststand, welcher dazu dient, die Einflussfaktoren für die Lasertriangulationsmessung zu bestimmen. Daraus wird ein Messkonzept für die spätere Anwendung des Messsystems abgeleitet. In Kapitel 4 wird die Lasertriangulationsmessung zunächst an einem Teststand nach VDI 3926 angewandt. Unter vereinfachten Randbedingungen, wie zum Beispiel einem weitestgehend fixierten Filtermedium, wird der Staubkuchenaufbau an Prüffiltern mit und ohne ePTFE-Beschichtung untersucht. Das darauffolgende Kapitel 5 beinhaltet experimentelle Untersuchungen an einem Filterschlauchteststand. Hier bietet sich die Möglichkeit, das Messsystem unter realen Bedingungen zu verwenden und damit das Wachstum des Staubkuchens an einem Filterschlauch zu untersuchen. Die Bedingungen unter denen die Versuche durchgeführt werden, sind vergleichbar mit denen einer industriellen Schlauchfilteranlage. Anschließend behandelt Kapitel 6 die numerische Analyse der in Kapitel 5 durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Die Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln werden im Kapitel 7 verglichen und kritisch diskutiert. Abschließend sind eine Zusammenfassung, sowie ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder in Kapitel 8 dargestellt.

## **1.3 Stand der Wissenschaft**

### **1.3.1 Numerische Untersuchung von Vorgängen der Oberflächenfiltration**

Zur numerischen Simulation von Filtrationsprozessen, im speziellen zu Schlauchfilteranlagen, existieren bereits zahlreiche Veröffentlichungen. Der Aufbau eines Staubkuchens wird von Schmidt in [3] modellhaft betrachtet. Partikeln, welche bis an die Filteroberfläche gelangen, werden entsprechend ihres Abscheidegrads abgeschieden. Bei Überlappung einer Partikel mit einer bereits abgeschiedenen Partikel, wird diese ebenfalls abgeschieden. Es zeigt sich ein Aufbau in Dendritenform. Grundlegende Modelle zur numerischen

Berechnung von Filtration beschreibt Janoske [4]. In Schrooten et al. [5] werden Schlauchfilteranlagen an zwei Beispielen numerisch betrachtet. Hierbei wird allerdings lediglich die Strömung des Trägerfluids untersucht und die Anlage dahingehend optimiert. Ebenso untersucht Nielsen [6] diverse Filtrationsanlagen unterschiedlichen Typs hinsichtlich der Strömungsverhältnisse. Partikeln werden hierbei nicht betrachtet, sondern eine Erhöhung des Druckverlusts über den spezifischen Filterwiderstand modelliert. Sedláček und Kovařík [7] untersuchen eine Schlauchfilterkammer und modellieren hierbei die Filter als poröses Medium, welches mit einer Permeabilität und einem Filterkoeffizienten versehen ist. Dadurch ist es möglich, eine zeitliche Varianz des Druckverlusts zu berechnen. Es wird angeführt, dass die beiden Größen Permeabilität und Filterkoeffizienten nur durch experimentelle Voruntersuchungen sicher ermittelt werden können. Zudem wird die Modellierung des Staubkuchens als problematisch dargestellt. Als Software wird ANSYS Fluent verwendet. Qian et al. [8] betrachten die Bildung des Staubkuchens mithilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) und Discrete Element Method (DEM). Hierbei wird sowohl die Strömung, als auch die Interaktion der Partikeln untereinander betrachtet. Auch Zi-Ming et al. [9] untersuchen eine Schlauchfilteranlage. Diese besteht im Modell aus nur einem Filterschlauch. Es wird ebenfalls ohne Partikeln gerechnet. Weiterhin untersuchen Solari et al. [10] eine Kombination aus Schlauchfilter und Zyklon. Dabei werden ebenfalls keine Partikeln modelliert. Es zeigt sich, dass bereits umfangreich zum Thema Schlauchfilteranlagen simuliert wurde. Jedoch finden sich keine Arbeiten, in denen Partikeln in der Strömung berücksichtigt werden. Entsprechend können die Ergebnisse kein heterogenes Wachstum des Staubkuchens abbilden. Es finden sich keine vergleichbaren Arbeiten zum Thema dieser Dissertation.

### **1.3.2 Staubkuchenmessung an Filterschläuchen**

Bezüglich der Messung der Staubkuchendicke gibt es bereits Veröffentlichungen wie zum Beispiel Dittler et al. [11]. Hier werden Online-Messungen der Staubkuchendicke auf einer begrenzten Fläche durchgeführt. Hierfür wird eine Bilderfassung genutzt, welche die Höhenprofile der Oberfläche des Staubkuchens erfassen kann. Durchgeführt wird das Verfahren an einem starren Filter. Flexible Filter mit dem selben Verfahren wie Dittler untersuchen Rüther et al. [12]. Luan et al. [13] nutzen einen nicht weiter spezifizierten lasergestützten Sensor, um den Regenerierungsprozess an keramischen Filterkerzen zu untersuchen. Cheng und Tsai [14] untersuchen die Kompression von Staubkuchen und nutzen hierfür ebenfalls Lasertriangulationssensoren, um die Staubkuchendicke zu messen. Hierbei wird die Messung nicht an einem Filterschlauch, sondern an einem Probestück durchgeführt, welches mit einer speziellen Stützstruktur versehen ist, um die Verformung infolge der Durchströmung zu minimieren. Hamachi und Mietton-Peuchot [15] messen punktförmig den Staubkuchenaufbau auf einer Membrane. Dabei wird die Dicke anhand

der Lichtabsorption des Staubkuchens bestimmt. In Rüter et al. [16] wird die Staubkuchendicke an einem realen Filterschlauch untersucht. Hierbei kann die Dicke online, mithilfe zweier Kameras und entsprechender Auswertungsalgorithmen, ermittelt werden. Die ermittelte Genauigkeit von  $50 \dots 300 \mu\text{m}$  ist dabei allerdings vergleichsweise grob. Hinsichtlich des Aufbaus von Staubkuchen, besonders unter Berücksichtigung der Kompression, sei Schmidt [17] zu nennen. Es zeigt sich, dass eine lokale Kompression des Staubkuchens dazu führt, dass die Druckverlustkurve Sprünge aufweist. Der experimentelle Ansatz wird ebenfalls von Schmidt in [18] mithilfe eines vereinfachten Simulationsmodells im Ergebnis bestätigt. Die allgemeinen Vorgänge der Staubkuchenbildung sind in [19] ausführlich dargestellt.

## 1.4 Problemstellung und Zielsetzung

Bezugnehmend auf den aktuellen Stand der Wissenschaft zeigt sich, dass bereits ein Verfahren zur Onlinemessung des Staubkuchens an Filterschläuchen existiert. Jedoch ist die Messgenauigkeit der von Dittler entwickelten Methode, welche von Rüter an flexiblen Filtern angewandt wird, mit  $50 \mu\text{m}$  vergleichsweise hoch. Zur Generierung wissenschaftlich verwertbarer Daten, ist eine verbesserte Messgenauigkeit wünschenswert. Die Lasertriangulation bietet in der verwendeten Form eine Messgenauigkeit von  $7,2 \mu\text{m}$  und damit eine deutliche Verbesserung der Messgenauigkeit im Vergleich zum von Rüter et al. [16] verwendeten Messsystem.

Weiterhin wird untersucht, ob sich die Messung der Staubkuchendicke dazu eignet, die Regenerierungssteuerung von Schlauchfilteranlagen zu verbessern. Die These hierzu ist, dass es mittels der Messung der Staubkuchendicke möglich ist, den Beladungszustand einzelner Schläuche zu ermitteln und entsprechend eine bedarfsgerechte Regenerierung durchzuführen.

Es zeigt sich, dass umfangreiche Arbeiten zu numerischen Untersuchungen bei Schlauchfilteranlagen existieren, diese jedoch meist auf der Analyse des Strömungszustands des Trägerfluids beruhen. Eine numerische Untersuchung unter Einbeziehung der Partikeln bietet die Möglichkeit, die Abscheidung der Partikeln genauer zu verfolgen. Es wird überprüft, ob die aus der Messung gewonnenen Daten für eine Validierung der numerischen Simulation geeignet sind.

Bezugnehmend auf die vorangegangenen Absätze werden die folgenden Thesen formuliert, an denen sich die Arbeit orientiert.

- These I: Mithilfe eines optischen Messverfahrens lässt sich die zeitliche Änderung der Staubkuchendicke eines Filterschlauchs während des Betriebs erfassen, ohne die Strömung und den Filtrationsprozess zu beeinflussen.
- These II: Die mit der Lasertriangulation ermittelten Messwerte sind als Eingangsparmeter für die Regenerierungssteuerung einer Schlauchfilteranlage geeignet und liefern potenziell einen Beitrag zur Verminderung der Degradation der Filterschläuche im Vergleich zur Regenerierungssteuerung mittels Druckverlust.
- These III: Die Ergebnisse der Messung der Staubkuchendicke mittels Lasertriangulation sind als zusätzliche Validierungsgröße für eine numerische Simulation des Filtrationsprozesses geeignet.



# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Grundlagen der Oberflächenfiltration

#### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Oberflächenfilter sind weit verbreitet, um Feststoffpartikel aus Gasströmungen abzuscheiden. Hierbei wird ein Filtermedium in die Strömung eingebracht, an welchem sich die Partikeln abscheiden, das Trägergas jedoch passieren kann. Anlagen, welche auf dem Prinzip der Oberflächenfiltration basieren, können über weite Anwendungsfälle mit Volumenströmen über  $10^6 \text{ m}^3/\text{h}$  und sehr hohen Rohgaskonzentrationen von einigen  $100 \text{ g}/\text{m}^3$  betrieben werden. Die Anlagen können kontinuierlich arbeiten und das abgeschiedene Material steht nach der Regenerierung des Filters für eine Rückgewinnung zur Verfügung. Im Folgenden werden Schlauchfilter behandelt. Die Inhalte entstammen im Wesentlichen den Quellen [20] und [21]. Für weitere Arten von Oberflächenfiltern sei auf die einschlägige Literatur [19], [22] oder [23] verwiesen.

#### Filtermedien

Als Filtermedium werden heutzutage hauptsächlich Nadelfilze aus synthetischen Fasern eingesetzt. Diese sind meist, je nach Anwendungsfall, mit einer zusätzlichen Beschichtung versehen, welche eine verbesserte Resistenz gegenüber gewissen Stäuben mit sich bringt und zu einer besseren Regenerierung des Filters beiträgt.

#### Aufbau und Betrieb

Die einfachste Form der Schlauchfilteranlage besteht aus einer Filterkammer, welche in zwei getrennte Bereiche unterteilt ist. Die Seite, in welche das partikelbeladene Gas einströmt ist die Rohgasseite. Diese wird durch das Filtermedium von der Reingasseite getrennt. Das Rohgas wird je nach Partikelgrößenverteilung des verwendeten Staubs im oberen (feine Stäube) oder unteren Teil (grobe Stäube) der Filterkammer eingeleitet.

Gegebenenfalls ist ein zusätzliches Prallblech installiert, welches für eine Vorabscheidung grober Partikeln sorgt. Ebenso wird durch ein Prallblech vermieden, dass Partikeln mit hohem Impuls auf das Filtermedium treffen und dieses in seiner Struktur beschädigen. Um eine Kontamination der Umgebung im Leckfall zu verhindern, werden die Anlagen reingasseitig mit Unterdruck betrieben. Die Auslegung der Anlage geschieht zunächst nach dem vorhandenen Volumenstrom. Wird das Filtermedium mit einer zu hohen Geschwindigkeit durchströmt, kommt es zu Problemen wie erhöhtem Verschleiß, erhöhtem Energieaufwand oder einem erschwerten Regenerationsprozess. Als Maß hierfür wird die Filterflächenbelastung verwendet:

$$FFB = \frac{\dot{V}_{Roh}}{A_{eff}} \quad (2.1)$$

Mit: Filterflächenbelastung  $FFB$ ; Rohgasvolumenstrom  $\dot{V}$ ; effektive Filteroberfläche  $A$

Als optimale Filterflächenbelastung ist ein Wert von  $0,5 \dots 2,5 \text{ m}^3/\text{min}$  zu wählen. Bei einem gegebenen Volumenstrom lässt sich so die benötigte effektive Filterfläche und somit die Anzahl der benötigten Filterelemente ermitteln.

### **Filtrationsphase**

In der Filtrationsphase ist die Strömungsrichtung des Trägergases von der Rohgasseite in Richtung der Reingasseite. Die Partikeln werden beim Auftreffen auf den Filter zum großen Teil ( $\geq 99\%$ ) abgeschieden. Dies geschieht allerdings im Wesentlichen nicht an den Fasern des Filtermediums selbst. Nach Erstinbetriebnahme eines Filterschlauchs kann ein hoher Prozentsatz der Partikeln den Nadelfilz penetrieren. Lediglich ein kleiner Teil der Partikeln scheidet sich aufgrund der Abscheidemechanismen einer Faser ab. Diese abgeschiedenen Partikeln vergrößern jedoch nach und nach die Filtrationswirkung des Filters, da sich ein zunehmend dichter Staubkuchen entwickelt. Nach kurzer Zeit werden Partikeln an der Oberfläche des Staubkuchens abgeschieden und der Filter erreicht seinen stabilen Betriebszustand. Aufgrund des Wachstums des Staubkuchens stellt sich ein zunehmender Druckverlust zwischen Roh- und Reingasseite ein. Wird dieser Druckverlust zu hoch, muss der Filter regeneriert werden.

### **Regenerationsphase**

Die Regenerierung des Filters erfolgt online oder offline. Abbildung 2.1 stellt die Regenerierung schematisch da. Frühere Anlagen wurden häufig durch Schwing- oder Klopf-einrichtungen regeneriert. Moderne Anlagen hingegen werden mittels kurzer Druckluftstöße von der Reingasseite regeneriert [24].

Dabei treten drei wesentliche Mechanismen auf, die zu einer Entfernung des Staubkuchens führen.

- Rückspülkräfte
- Trägheitskräfte
- Scherkräfte

Die Rückspülkräfte ergeben sich durch die Umkehr der Strömungsrichtung von der Reingas- zur Rohgasseite, wodurch Partikelagglomerate vom Staubkuchen weg transportiert werden. Die Trägheitskräfte wirken infolge der sich einstellenden Schwingung des Filterschlauchs. Dabei können Teile des Staubkuchens der Schwingung nicht folgen und lösen sich somit vom Filtermedium ab. Die Scherkräfte wirken aufgrund des Aufblähens des Filterschlauchs infolge der rapiden Druckerhöhung im Inneren. Dabei wird der Staubkuchen in Fragmente geteilt, welche von den beiden übrigen Kräften vom Filter gelöst werden können. Durch die Regenerierung abgelöste Brocken des Staubkuchens fallen anschließend aufgrund ihres Gewichts nach unten und können im Boden der Filterkammer ausgetragen werden.

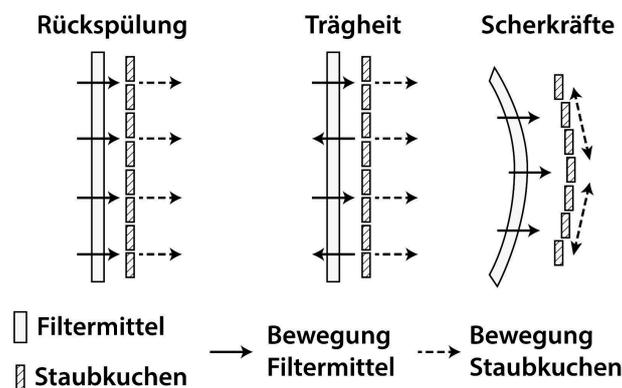


Abbildung 2.1: Regenerierungsmechanismen (in Anlehnung an [25])

## 2.1.2 Abscheidemechanismen

Bei der Abscheidung von Partikeln an einer Einzelfaser wirken verschiedene Mechanismen. Diese sind:

- Trägheit
- Diffusion
- Elektrostatik

## Trägheit

Die Trägheit einer Partikel sagt aus, wie gut diese der Transportströmung folgen kann. Besitzen Partikeln eine hohe Trägheit, können diese einen Richtungswechsel des Trägergases nicht zeitnah folgen und treffen ggf. auf eine Faser und werden abgeschieden.

Die Grundformel zur Bestimmung der Trägheit von Partikeln lautet:

$$\psi = \frac{\rho_P \cdot D_P^2 \cdot v}{18 \cdot \eta \cdot D_{FA}} \cdot Cu \quad (2.2)$$

Mit: Trägheitsparameter  $\psi$ ; Partikeldichte  $\rho$ ; Partikel- und Faserdurchmesser  $D$ ; Geschwindigkeit  $v$ ; Viskosität des Trägergases  $\eta$ ; Cunningham-Korrektur  $Cu$

Die Cunningham-Korrektur berücksichtigt eine abweichende Berechnung für Partikeln mit einer Größe nahe der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle, welche im Normalzustand ca. 65 nm beträgt.

Sind die Partikeln sehr groß (bspw.  $> 100 \mu\text{m}$ ), kann es zu einer Abscheidung aufgrund der geometrischen Größe führen. Dieser Vorgang nennt sich Interzeption und wird durch den Sperreffektparameter  $R$  beschrieben [26].

$$R = \frac{D_P}{D_{FA}} \quad (2.3)$$

Mit: Sperreffektparameter  $R$

## Diffusion

Sehr kleine Partikeln (kleiner  $1 \mu\text{m}$ ) werden besonders häufig durch Diffusion abgeschieden. Dabei weichen die Partikeln aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung von den Stromlinien des Trägergases ab und können so auf eine Faser treffen. Beschrieben wird der Effekt durch die Péclet-Zahl:

$$Pe = \frac{v \cdot D_{FA}}{PDK} \quad (2.4)$$

Mit: Péclet-Zahl  $Pe$ ; Partikeldiffusionskoeffizient  $PDK$

Der Partikeldiffusionskoeffizienten ist wie folgt zu berechnen:

$$PDK = \frac{k \cdot T_A}{3 \cdot \pi \cdot D_P \cdot \eta} \cdot Cu \quad (2.5)$$

Mit: Boltzmann-Konstante  $k$ ; Umgebungstemperatur  $T$

## Elektrostatik

Treten Partikeln in ein elektrisches Feld ein, werden diese abgelenkt. Dies trifft vor allem auf ebenfalls geladene Partikeln zu, kommt jedoch aufgrund der Polarisierung auch bei ungeladenen Partikeln vor. Dabei richten sich die Ladungen in der Partikel entsprechend des elektrischen Feldes aus, womit die Partikel auf einer Seite positiv, auf der anderen negativ geladen ist. Mit der über den Partikeldurchmesser abnehmenden Feldstärke des elektrischen Feldes, ergeben sich damit ungleiche Abstößungs- und Anziehungskräfte, was zu einer Bewegung der Partikel führt. Um den Effekt der Elektrostatik zu berechnen, ist der Ladungsparameter  $N_{el}$  zu nutzen.

$$N_{El} = \frac{F_{El}(r)}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot D_P \cdot v} \quad (2.6)$$

Mit: Ladungsparameter  $N_{El}$ ; Elektrostatische Kraft  $F_{El}$ ; Radius  $r$

Für die Betrachtung zweier Punktladungen kann die Coulomb-Kraft als elektrostatische Kraft fungieren [27], sofern die Induktionskräfte vernachlässigt werden.

$$\Phi = \frac{N_{Q,i} \cdot N_{Q,j} \cdot Q^2}{\epsilon_0 \cdot \Delta s} \quad (2.7)$$

Mit: Coulomb-Zahl  $\Phi$ ; Partikelladungsanzahlen  $N_{Q,i}$  und  $N_{Q,j}$ , Elektrische Ladung  $Q$ ; Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_0$ ; Abstand zwischen Partikeln  $\Delta s$

## Abscheidegrad

Der Einzelfaserabscheidegrad gibt an, welcher Anteil der Partikeln abgeschieden wird. Dieser ergibt sich aus einer Funktion der Einzelauftreffgrade sowie dem Haftanteil:

$$\eta = \varphi \cdot H \quad (2.8)$$

Mit: Einzelfaserabscheidegrad  $\eta$ ; Einzelauftreffgrad  $\varphi$ ; Haftanteil  $H$

Die Einzelauftreffgrade errechnen sich wie folgt:

**Trägheit** [28]:

$$\varphi_{Traegheit} = 1,03 + (0,5 \cdot Re - 1,5) \cdot 0,85^{(\psi+0,5)} \quad (2.9)$$

Mit: Einzelauftreffgrad  $\varphi$ ; Reynoldszahl  $Re$

Gültig für:  $1 < \psi < 10$ ;  $0,01 < Re < 1$ ;  $\varphi_{Traegheit} > 0,1$

Für die Berechnung von Sperreffekt und Diffusion wird der hydrodynamische Faktor nach Kuwabara [29] unter Verwendung der Porosität  $\epsilon$  gebildet:

$$K_{Kuw} = 0,5 \cdot \ln(1 - \epsilon) - 0,75 + (1 - \epsilon) - 0,25 \cdot (1 - \epsilon)^2 \quad (2.10)$$

**Sperreffekt** [30]:

$$\varphi_{Sperreffekt} = \left( \frac{\epsilon}{K_{Kuw}} \right) \cdot \left( \frac{R^2}{1 + R} \right) \quad (2.11)$$

**Diffusion** [30]:

$$\varphi_{Diffusion} = 1,6 \cdot \left( \frac{\epsilon}{K_{Kuw}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} + 0,6 \cdot \left( \frac{\epsilon}{K_{Kuw}} \right) \cdot \frac{R^2}{1 + R} \quad (2.12)$$

## Haftanteil

Auch wenn Partikeln auf die Faser prallen, hängt es vom Haftanteil ab, ob diese auch abgeschieden werden. Besitzt eine Partikel beispielsweise eine zu hohe Trägheit oder ist die Strömungsgeschwindigkeit zu hoch, kann dies dazu führen, dass die Partikel nicht anhaftet. Eine geringe Filterflächenbelastung begünstigt die Anhaftung. Nach [20] kann der Haftanteil wie folgt berechnet werden:

$$H = 1,368 \cdot \psi^{-1,09} \cdot Re^{-0,37} \quad (2.13)$$

Mit: Haftanteil  $H$

Gültig für:  $1 < \psi < 20$ ;  $0,01 < Re < 1$ ;  $H > 0,1$

## Einzelabscheidegrad als Funktion

Betrachtet man den Einzelabscheidegrad als Funktion über die Partikelgröße, ergibt sich für Oberflächenfilter ein typischer Verlauf (Abbildung 2.2). Im Bereich sehr feiner Partikeln wirkt überwiegend Diffusion, bei groben Partikeln hingegen Trägheit. Zwischen diesen beiden Fraktionen tritt ein Minimum auf, welches als Most Penetrating Particle Size (MPPS) bezeichnet wird. In diesem Bereich werden verhältnismäßig schlechte Abscheidegrade erzielt.

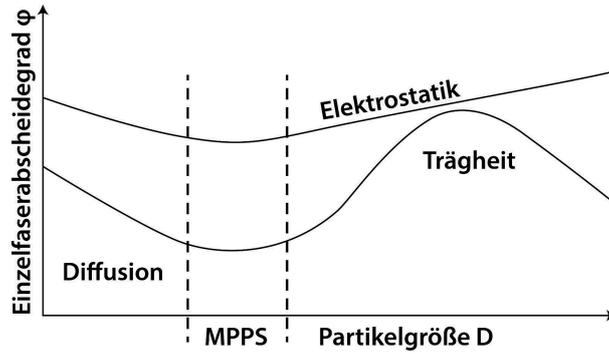


Abbildung 2.2: Abscheidegrade als Funktion der Partikelgröße (in Anlehnung an [31])

### 2.1.3 Druckverlust

Bei der Durchströmung des Filters wird ein Druckverlust erzeugt. Dieser ergibt sich nach *Darcy* aus der Summe des Druckverlusts des Filtermediums und des Druckverlusts des Staubkuchens.

$$\Delta p = \Delta p_{FM} + \Delta p_{SK} \quad (2.14)$$

$$\Delta p = K_{FM} \cdot \eta \cdot v + K_{SK} \cdot \eta \cdot E \cdot c_{Roh} \cdot v^2 \cdot t \quad (2.15)$$

Mit: Druckverlust  $\Delta p$ ; Filtermedien- und Staubkuchenkoeffizient  $K$ ; Gesamtabscheidegrad  $E$ ; Rohgaspartikelkonzentration  $c$ ; Zeit  $t$

Die Faktoren  $K_1$  und  $K_2$  können sowohl theoretisch, als auch experimentell ermittelt werden. Die Formeln für die theoretische Berechnung lauten:

$$K_{FM} = \frac{s}{B_{FM}} \quad K_{SK} = \frac{1}{B_{SK} \cdot \rho_P \cdot (1 - \epsilon)} \quad (2.16)$$

Mit: Dicke  $s$ ; Filtermedien- und Staubkuchendurchlässigkeit  $B$

Hierfür müssen allerdings die Durchlässigkeiten des Filtermediums  $B_{FM}$  und des Staubkuchens  $B_{SK}$  bekannt sein. Die des Filtermediums ist in der Regel im Datenblatt des Filters aufgeführt. Für die Ermittlung des Faktors  $K_{SK}$  ist eine experimentelle Herangehensweise zielführend. Die Porosität des Staubkuchens kann nach [32] und [33] mit 0,8 beziffert werden, solange der Staubkuchen nicht in einen komprimierten Zustand wechselt. Die Geschwindigkeit  $v$  ist im Kontext als Filterflächenbelastung zu verstehen. Eine erhöhte Filterflächenbelastung führt also zu erhöhtem Druckverlust, beim Druckverlust des Staubkuchens sogar in der zweiten Potenz. Die Zeit  $t$  ist nur für den Staubkuchen relevant. Entsprechend kann der Druckverlust des Filtermediums zur Zeit  $t = 0$  bestimmt werden. Der Anstieg der Druckverlustkurve spiegelt wiederum den Anteil des Staubkuchens wider.

In Abbildung 2.3 sind Druckverlustkurven für ideale Anlagen, kompressible Staubkuchen sowie für undichte Anlagen dargestellt.

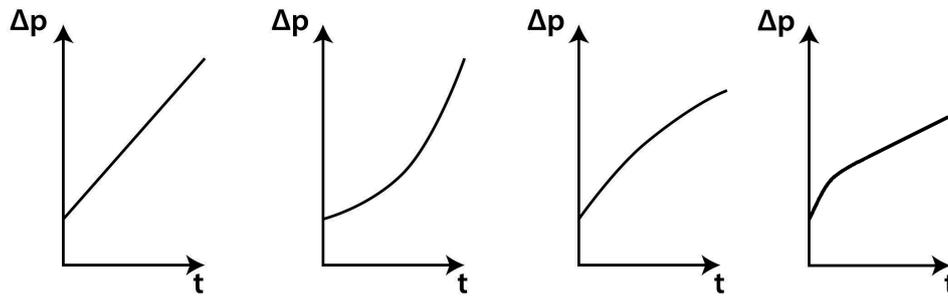


Abbildung 2.3: Druckverlustkurven für ideale Anlagen, kompressible Staubkuchen, undichte Anlagen und Patchy-Cleaning (v.l.n.r.)

Bei idealen Anlagen entspricht der Druckverlust einer linearen Funktion. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  entsteht der Druckverlust ausschließlich aus der Durchströmung des Filtermediums. Im Folgenden kommt lediglich die Varianz der Zeit  $t$  als sich ändernde Variable zum Tragen. Die restlichen Bedingungen bleiben konstant und erzeugen somit den linearen Verlauf. Bei einem kompressiblen Staubkuchen ist die Porosität eine Funktion der Zeit. Hierdurch weicht der Verlauf des Druckverlusts von der idealen linearen Form ab und steigt progressiv an. Bei undichten Anlagen führt ein wachsender Druckverlust dazu, dass aufgrund der entstehenden Druckdifferenz zur Umgebung, eine Strömung am Leck entsteht. Hierbei führt eine steigende Druckdifferenz zu einer höheren Leckströmungsgeschwindigkeit und somit zu einem teilweisen Druckausgleich zwischen Filterkammer und Umgebung. Dadurch wird die Druckverlustentwicklung in der Filterkammer abgeschwächt. Der Fall des Patchy-Cleaning, also der ungleichmäßigen Regenerierung des Filterschlauchs, wirkt sich ähnlich aus, wie eine Undichtigkeit. An Stellen, welche nicht vollständig regeneriert wurden, besteht ein erhöhter lokaler Druckverlust. Somit weicht die Strömung auf die übrigen Bereiche aus und führt dort zu einer Abscheidung von Partikeln. Somit tritt an den regenerierten Bereichen ein schnelleres Staubkuchenwachstum auf. Im Ergebnis steigt der Druckverlust zu Anfang stärker und geht anschließend in ein geringeres, lineares Wachstum über.

## 2.2 Grundlagen der numerischen Simulation

### 2.2.1 RANS-Gleichungen

Die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) sind eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen und werden häufig in aktueller Computational Fluid Dynamics (CFD) Software verwendet. Dabei werden Turbulenzen nicht direkt modelliert und gelöst, sondern mithilfe von Turbulenzmodellen approximiert. Das Gebiet der numerischen Strö-

mungssimulation umfasst viele Bereiche. Um die Arbeit nicht zu unfänglich zu gestalten, wird vor allem auf die notwendigen, spezifischen Details der numerischen Strömungssimulation eingegangen. Allgemeine Grundlagen zur numerischen Strömungssimulation können in den Werken [34], [35] und [36] nachgeschlagen werden.

## 2.2.2 Fluidmodellierung

Das Trägergas wird mithilfe des Euler-Ansatzes als Kontinuum modelliert. Hierbei müssen im wesentlichen drei Gleichungen gelöst werden:

**Kontinuitätsgleichung:**

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_F \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2.17)$$

**Impulsgleichung:**

$$\frac{\partial (\rho_F \cdot \vec{v})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_F \cdot \vec{v}^2) = -\vec{\nabla} \cdot \left[ \eta_F \left( (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + (\vec{\nabla} \cdot \vec{v})^T \right) \right] \quad (2.18)$$

Mit:  $T$  als transponierter Vektor

**Energiegleichung:**

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho_F \cdot c_P \cdot T - p + 0,5 \cdot \rho_F \cdot v^2)}{\partial t} + \\ & \vec{\nabla} \cdot [\vec{v} \cdot (\rho_F \cdot c_P \cdot T + 0,5 \cdot \rho_F \cdot v^2)] = \\ & \vec{\nabla} \cdot \left[ \lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot T + \eta \cdot \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{v})^T - \frac{2}{3} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \cdot \vec{E} \right) \cdot \vec{v} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Mit: Spezifische Wärmekapazität  $c$ ; Wärmeleitkoeffizient  $\lambda$ ; Einheitsmatrix  $E$

## 2.2.3 Modellierung der Partikelbewegung

Für die Modellierung der Partikeln existieren zwei verbreitete Modelle, das Euler-Lagrange- und das Euler-Euler-Verfahren. Beide werden im Folgenden beschrieben.

### Euler-Lagrange-Verfahren

Bei dem Euler-Lagrange-Verfahren wird die Fluidphase des Trägergases als Kontinuum betrachtet und die einzelnen Partikelbahnen anhand der an ihnen angreifenden Kräfte einzeln berechnet. Die auf die Partikeln wirkenden Kräfte sind [4]:

**Widerstandskraft:**

$$\vec{F}_W = c_W \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_P^2 \cdot |\vec{v}_{Rel}| \cdot \vec{v}_{Rel} \quad (2.20)$$

Mit: Kraft  $F$ ; Widerstandsbeiwert  $c$ ; Partikeldurchmesser  $D$

**Druckkraft:**

$$\vec{F}_{Druck} = -\frac{\pi}{6} \cdot D_P^3 \cdot \vec{\nabla} p \quad (2.21)$$

**Beschleunigungskraft für Fluid:**

$$\vec{F}_{Bes} = \frac{\pi}{12} \cdot D_P^3 \cdot \rho_F \left( \frac{d\vec{v}_F}{dt} - \frac{d\vec{v}_P}{dt} \right) \quad (2.22)$$

**Potentialkräfte:**

$$\vec{F}_{Pot} = \frac{\pi}{6} \cdot D_P^3 \cdot (\rho_P - \rho_F) \cdot \vec{g} \quad (2.23)$$

Mit: Erdbeschleunigung  $g$

**Lifkraft nach Saffmann:**

$$\vec{F}_{Saff} = 1,615 \cdot D_P^2 \cdot \sqrt{\rho_F \cdot \eta_F} \frac{1}{\sqrt{|\vec{\gamma}_F|}} \cdot (\vec{\gamma}_F \times (\vec{v}_F - \vec{v}_P)) \quad (2.24)$$

Mit: Scherrate  $\gamma$

Die Bewegungsgleichung der Partikeln lautet:

$$\rho_P \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_P^3 \cdot \left( \frac{d\vec{v}_P}{dt} \right)_{Abs} = \sum \vec{F}_P \quad (2.25)$$

Dabei sind  $\vec{F}_P$  die Kräfte aus den Gleichungen 2.20 bis 2.24. Die Bahngleichung der Partikel berechnet sich aus:

$$\left( \frac{d\vec{x}_P}{dt} \right)_{Abs} = (\vec{v}_P)_{Abs} \quad (2.26)$$

Mit: Partikelposition  $x$

Die Bewegungsgleichungen müssen für jede Partikel zu jedem Zeitschritt berechnet werden. Daraus resultiert, dass das Euler-Lagrange-Verfahren meist dort eingesetzt wird, wo eine geringe Anzahl von Partikeln zu berechnen ist. Für Fälle, in denen die Zahl der

Partikeln höher liegt, wird meist auf ein Euler-Euler-Verfahren zurückgegriffen, sofern die Randbedingungen des Modells dies zulassen.

## Euler-Euler-Verfahren

Im Gegensatz zum Euler-Lagrange-Verfahren werden beim Euler-Euler-Verfahren die Partikeln, ebenso wie das Trägerfluid, als Kontinuum betrachtet. Entsprechend werden keine einzelnen Partikeln berechnet, sondern eine Mehrphasenströmung mit kontinuierlichem und dispersem Anteil. Zwar können so nicht mehr einzelne Partikelbahnen verfolgt werden, doch bietet sich mithilfe des Euler-Euler-Verfahrens die Möglichkeit, sehr viele Partikeln im System zu modellieren und zu berechnen.

Gelöst werden folgende Gleichungen für alle Phasen:

### Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial(\phi_j \cdot \rho_j)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\phi_j \cdot \rho_j \cdot \vec{v}_j) = \sum_{i=1}^N (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ji}) \quad (2.27)$$

Mit: Volumenanteil  $\phi$ ; Anzahl der Phasen  $N$ ; Massenstrom  $\dot{m}$

Der Massenstrom zwischen den Phasen bezieht sich jeweils auf ein Volumenelement.

### Volumenanteilgleichung:

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\phi_j \cdot \vec{v}_j) = 0 \quad (2.28)$$

### Volumenanteilbilanzierung:

$$\sum_{j=1}^N \phi_j = 1 \quad (2.29)$$

### Impulsgleichung:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\phi_j \cdot \rho_j \cdot \vec{v}_j)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\phi_j \cdot \rho_j \cdot \vec{v}_j \cdot \vec{v}_j) = \\ & -\phi_j \cdot \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot \tau_j + \sum_{i=1}^N \left( \vec{F}_{ij} + \dot{m}_{ij} \cdot \vec{v}_{ij} - \dot{m}_{ji} \cdot \vec{v}_{ji} \right) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Mit: Spannungstensor  $\tau$ ; externe Kraft  $F_{ij}$

Gekoppelt werden die Phasen über Quellen- und Senkenterme, sowie den Druck. Die Kraft  $F_{ij}$  ist die Widerstandskraft aus Gleichung 2.20. Die aufsummierten Kräfte sind jeweils Volumenbezogen.

## 2.3 Grundlagen der Laserdistanzmessung

### 2.3.1 Aufbau und Wirkungsprinzip

Licht wird mit einem vereinheitlichten Teilchen- und Wellenmodell beschrieben. Aus diesem Grund verhält sich Licht in einigen Bereichen wie ein Teilchen, in anderen hingegen wie eine Welle. So kann mithilfe einer Lochblende kein scharf begrenzter Lichtstrahl erzeugt werden, da es an der Lochblende zu Lichtbeugung kommt, welche auf das Wellenverhalten zurückzuführen ist. In einem Laser wird dieses Phänomen umgangen. Ein für Laseremissionen geeignetes Material wird zwischen zwei Spiegeln positioniert. Bei den Materialien handelt es sich um Gase oder Festkörper. Einer der Spiegel ist vollreflektierend und einer teilreflektierend. Parallel wird das Lasermaterial durch eine Lichtquelle angeregt, sodass die einzelnen Atome des Lasermaterials Photonen in alle Richtungen emittieren. Aufgrund der Spiegel werden die Photonen, welche senkrecht zum Spiegel auftreffen, in gleicher Richtung reflektiert und durchlaufen das Lasermaterial erneut. Hierbei führen diese Photonen zu erneutem Emittieren, diesmal allerdings gerichtet. Dieser wechselseitige Durchlauf des Lasermaterials führt zu einer Verstärkung des gerichteten Photonenstroms. Über den teildurchlässigen Spiegel kann ein gewisser Anteil des Laserlichtes den Laser verlassen und tritt als gerichteter und hoch gebündelter Lichtstrahl aus. Dargestellt ist das Prinzip in Abbildung 2.4. Das Laserlicht ist hinsichtlich des Frequenzspektrums ausgesprochen scharf abgegrenzt [37].

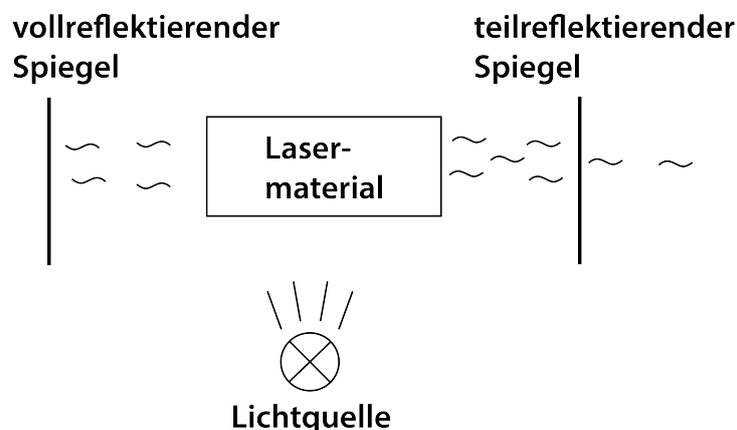


Abbildung 2.4: Aufbau eines Lasers: Das Lasermaterial wird durch eine Lichtquelle dazu angeregt Photonen zu emittieren, welche wechselseitig mithilfe der Spiegel reflektiert werden, wobei ein Teil der Photonen den teilreflektierenden Spiegel durchdringen kann

### 2.3.2 Lasertypen

Es existieren diverse Lasertypen, welche Licht in Wellenlängen von  $0,01 \mu\text{m}$  bis über  $1000 \mu\text{m}$  emittieren. Dies entspricht einem Bereich von weicher Röntgenstrahlung bis zur Infrarotstrahlung. Grob lassen sich Laser in die folgenden vier Arten einteilen:

- Festkörper-/Diodenlaser
- Flüssigkeitslaser
- Gaslaser
- Freie-Elektronen-Laser

In der vorliegenden Arbeit wird ein Festkörperlaser, genauer ein Diodenlaser, verwendet. Aus diesem Grund wird dieser genauer beschrieben.

## **Diodenlaser**

Der in dieser Arbeit verwendete Laser ist ein Diodenlaser, aus der Gruppe der Feststofflaser. Dieser unterscheidet sich im inneren Aufbau von dem zuvor dargestellten Aufbau eines Lasers. Die Peripherie mit den Spiegeln bleibt gleich. Beim inneren Aufbau wird keine Lichtquelle verwendet, welche die Atome des Lasermaterials anregt. Stattdessen werden die Eigenschaften des p-n-Übergangs eines Halbleiters genutzt. Hierbei kommt es beim Anlegen einer Spannung zu Rekombinationsprozessen im Halbleitermaterial, welche zu einer stehenden Lichtwelle führen. Befinden sich mehr Teilchen in einem höherenergetischen Zustand als in einem niederenergetischen (Besetzungsinversion), kann stimulierte Laserlicht emittiert werden. Ein Nachteil aufgrund der kleinen Bauform ist, dass das Laserlicht eine vergleichsweise geringe Lichtbündelung aufweist. Dies kann durch die Verwendung von Linsen kompensiert werden. Ebenso ergibt sich aufgrund der geringen Bauform ein Bedarf nach Kühlung, da der Laser ansonsten thermisch zu stark belastet wird. Zusätzlich zur Wärmeabfuhr kann auch die interne Wärmequelle minimiert werden, um den Wirkungsgrad zu maximieren und somit die entstehende Verlustleistung zu minimieren. Dies geschieht durch verschiedene Bauformen des Diodenlasers [37].

### **2.3.3 Anwendungen**

Laser werden in vielen Bereichen des alltäglichen Lebens verwendet. Ebenso sind sie elementarer Bestandteil moderner Wissenschaft und Technik. Im Folgenden sind ausgewählte Beispiele aufgeführt:

- Datenspeicherung (CD/DVD/Blu-Ray)
- medizinische Operationen (Augen-OP, Verschließen von Gefäßen)
- Schneiden von Blechen
- Laserdrucker
- Laserspektroskopie
- optische Pinzette

- Vermessung
- Beleuchtung (Eventbeleuchtung, KFZ)

### 2.3.4 Prinzip der Laserdistanzmessung

Zur Messung von Distanzen mithilfe von Lasern existieren zwei Verfahren, die Laufzeitmessung und die Lasertriangulation. Um eine geeignete Methode auszuwählen, werden beide Verfahren in diesem Abschnitt vorgestellt. Weiter Informationen zu der beschriebenen Sensortechnik sind in [38] zu finden.

#### Laufzeitmessung

Bei der Laufzeitmessung wird ein Laserstrahl vom Messgerät emittiert, an einem Messobjekt reflektiert und vom Messgerät wieder empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen Emission und Immission des Laserimpulses kann, unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit, die Distanz zwischen Sensor und Messobjekt berechnet werden (vgl. Abbildung 2.5). Zu beachten ist, dass der Laser die doppelte Messdistanz zurücklegt. Aus diesem Grund ist der Faktor 0,5 anzuwenden.

$$s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.31)$$

Mit: Messdistanz  $s$ ; Lichtgeschwindigkeit im jeweiligen Medium  $c$

Sensoren, welche nach dem Prinzip der Laufzeitmessung arbeiten, besitzen einen hohen Messbereich von mehreren hundert Metern bei eingeschränkter Genauigkeit im Millimeterbereich. Aus diesem Grund wird diese Art der Sensorik vornehmlich in Bereichen angewandt, in denen keine hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit im Mikrometerbereich gestellt sind.

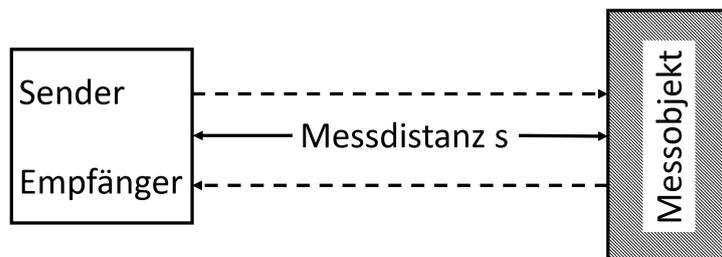


Abbildung 2.5: Prinzip der Laufzeitmessung: Der Sender erzeugt einen Laserimpuls welcher vom Messobjekt zum Empfänger reflektiert wird. Aus der Zeitdauer zwischen Senden und Empfangen ist die Messdistanz bestimmbar

## Lasertriangulationsmessung

Im Gegensatz zur Laufzeitmessung basiert die Lasertriangulationsmessung auf der Winkeländerung zwischen emittiertem und reflektiertem Laserimpuls. Trifft der Laserstrahl auf eine Oberfläche, kommt es zu einer direkten oder diffusen Reflexion. Bei der direkten Reflexion wird der Laserstrahl ausschließlich in eine Richtung reflektiert. Der Reflexionswinkel ist in diesem Fall gleich dem Eintrittswinkel. Weist die Oberfläche, auf die der Laserstrahl trifft, eine Rauigkeit auf, kommt es zu einer diffusen Reflexion. Diese ist daran zu erkennen, dass der Messpunkt des Lasers aus unterschiedlichen Perspektiven optisch wahrnehmbar ist. Bei der diffusen Reflexion wird der eintreffende Laserstrahl in verschiedene Richtungen reflektiert (vgl. Abbildung 2.6).

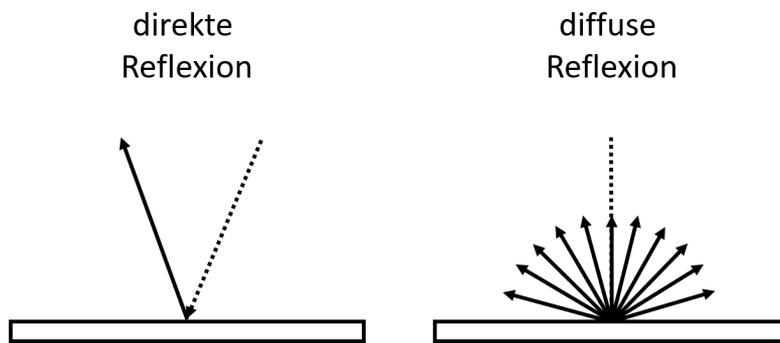


Abbildung 2.6: Unterschied zwischen direkter und diffuser Reflexion: Eintreffender Strahl (Punktlinie) wird in eine Richtung (direkt) oder mehrere Richtungen (diffus) reflektiert

Der prinzipielle Aufbau eines Lasertriangulationssensors beinhaltet einen Sender, welcher den Laserstrahl emittiert, eine Linse zur Bündelung des Laserstrahls, eine Linse zur Bündelung der reflektierten Diffusstrahlung, sowie einen Empfänger, welcher die gebündelten, reflektierten Laserstrahlen positionsgenau detektiert. Der Strahlengang des Messsystems ist in Abbildung 2.7 für zwei Messobjekte mit verschiedenen Entfernungen zum Sensor dargestellt. Zu sehen ist, dass eine Verschiebung des Messobjekts hin zum Sensor eine Verschiebung der Position des detektierten Signals auslöst. Damit ist jeder Position auf dem Empfänger ein Abstand zwischen Sensor und Messobjekt zugeordnet. Der Zusammenhang einer Änderung der Distanz zwischen Sensor und Messobjekt ( $z$ ) und der Verschiebung der Position auf dem Sensor ( $y$ ) ist über die folgende Gleichung definiert [39]:

$$y(z) = \tan(\alpha) \cdot f \cdot \sqrt{1 + \left( \tan(\alpha) - \frac{z_0}{f} \right)^2} \cdot \frac{\frac{z}{1 + \sqrt{\tan(\alpha)^2}}}{\left( \frac{z}{1 + \sqrt{\tan(\alpha)^2}} + \frac{z_0}{\tan(\alpha)} - f \right) \cdot \left( \tan(\alpha) - \frac{z_0}{f} \right)} \quad (2.32)$$

Einflussgrößen sind die Brennweite  $f$  der verwendeten Linse, sowie die in Abbildung 2.7 dargestellten Größen: Der Winkel  $\alpha$  und die Position des geometrischen Schnittpunkts von Laserstrahl, Linsen- und Empfängerebene  $z_0$ . Es zeigt sich, dass aus Gleichung 2.32, bei konstantem geometrischen Aufbau des Messsystems, eine nichtlineare Funktion entsteht. Sind die Einflussfaktoren der Funktion bekannt, lässt sich die Messdistanz aus der Position des detektierten Messsignals errechnen. Maßgebliche Einflussfaktoren sind [39]:

- Ausbreitung des Laserstrahls
- Eigenschaften der Oberfläche des Messobjekts
- Abbildungsfehler
- Empfänger und Signalauswertung
- Umgebungseinflüsse

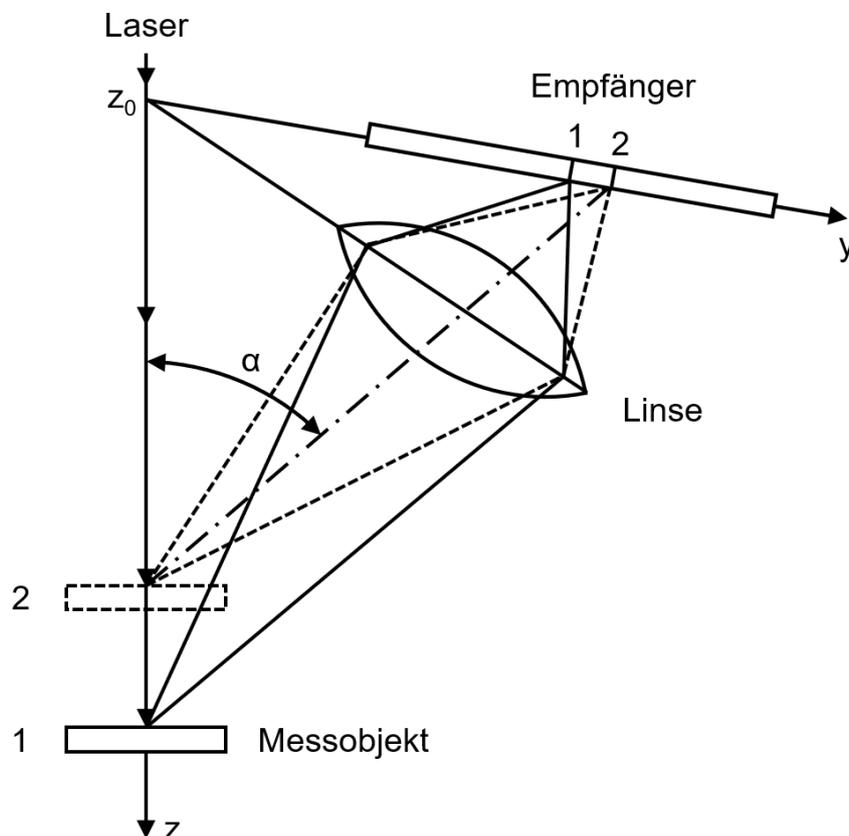


Abbildung 2.7: Messprinzip der Lasertriangulation. Der emittierte Laserstrahl trifft auf das Messobjekt, wird diffus reflektiert und über die Linse am Empfänger auf einen Punkt gebündelt. Eine Änderung der Messdistanz führt zu einer Verschiebung des Messsignals am Empfänger (in Anlehnung an [39])

### Ausbreitung des Laserstrahls

Laserstrahlen ändern ihren Durchmesser über die Messdistanz (vgl. Abbildung 2.8). Daraus lässt sich ableiten, dass es auch zu einer Veränderung der detektierten reflektierten

Diffusstrahlung kommt. Um diesen Effekt zu minimieren, wird die Bündelungsoptik des Lasers so ausgelegt, dass der Durchmesser des Laserstrahls im Messbereich des Sensors weitestgehend konstant ist.

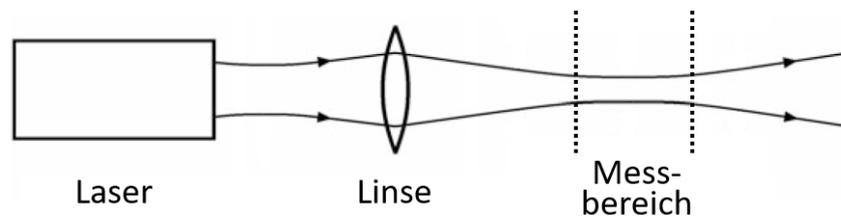


Abbildung 2.8: Änderung des Durchmessers des Laserstrahls nach der Bündelung mittels Linse (in Anlehnung an [39])

### Eigenschaften der Oberfläche des Messobjekts

Die Oberfläche des Messobjekts ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Anwendung der Lasertriangulation. Bei stark spiegelnden Oberflächen kommt es fast ausschließlich zu direkter Reflexion. Entsprechend des Funktionsprinzips des Lasertriangulationssensors kann bei fehlender Diffusstrahlung kein Messsignal gewonnen werden, da eine exakte Ausrichtung von Sensor und Messobjekt notwendig ist, damit die direkte Reflexion auf den Empfänger des Sensors trifft. Daher ist die Anwendung der Lasertriangulation bei sehr glatten Oberflächen nicht möglich. Raue Oberflächen hingegen erzeugen überwiegend diffuse Reflexionen und sind somit geeignet. Ungleichmäßige Oberflächen, beispielsweise mit inhomogener Farbverteilung, führen potentiell zu Messfehlern. Dies tritt auf, wenn die verschiedenen Farben verschiedene Reflexionseigenschaften aufweisen und der Laserstrahl auf einen Grenzbereich zwischen zwei Farben trifft. Die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften führen zu einer asymmetrischen Lichtverteilung auf dem Empfänger. Da der Empfänger die Position des Messsignals über eine Schwerpunktsbestimmung der empfangenen Lichtintensität ermittelt, führt eine asymmetrische Verteilung zu einem abweichenden Ergebnis. Geneigte Flächen mit einer homogenen Farbverteilung sind unproblematisch. Die Neigung führt zu einer Verbreiterung der empfangenen Lichtintensität. Der Schwerpunkt ändert sich dabei nicht. Weiterhin führen Effekte wie Streuung auf Oberflächen oder innerhalb transparenter Medien zu Messfehlern, da die Streuteile unter Umständen den Empfänger erreichen und so das Messergebnis verfälschen.

### Abbildungsfehler

Abbildungsfehler treten durch die verwendeten Linsen auf. Die hierbei wirkenden Effekte sind Koma, Astigmatismus, Verzeichnung und die sphärische Aberration. Diese Effekte bewirken, dass die Strahlengänge in der Empfängerlinse nicht den gewünschten, idealen Weg verfolgen. Aufgrund dieser Abweichungen kommt es zu einer Verschiebung der Position am Empfänger und somit zu einer Messabweichung. Den Effekten der Abbildungsfehler

kann konstruktiv entgegengewirkt werden, beispielsweise durch die Nutzung verschiedener Linsen. Gänzlich lassen sich die Effekte nicht vermeiden.

## Empfänger und Signalauswertung

Ein Beispiel für den Einfluss der Signalauswertung und des Empfängers ist die doppelte Streuung an unebenen Messobjekten. Wie in Abbildung 2.9 dargestellt, führt ein unebenes Messobjekt, unter Umständen, zu einer doppelten Streuung.

Dabei trifft der Laserstrahl zunächst auf das Messobjekt und wird, je nach Oberflächenbeschaffenheit, diffus gestreut sowie direkt reflektiert. Der direkte Anteil wird dem Einfallswinkel entsprechend reflektiert. Trifft der reflektierte Laserstrahl erneut auf eine Oberfläche, kommt es zu einer erneuten diffusen Streuung, welche über die Linse auf den Empfänger gebündelt wird. Somit erkennt der Sensor verschiedene Positionen, wodurch mittels eines Auswertungsalgorithmus sicherzustellen ist, dass nur die korrekte Messdistanz ausgegeben wird. Die Oberfläche an welcher die erneute Reflexion des Laserstrahls stattfindet ist nicht zwangsläufig dem Messobjekt zugehörig. Ebenso kann es sich dabei um weitere Bauteile in der Nähe des Messobjekts handeln.

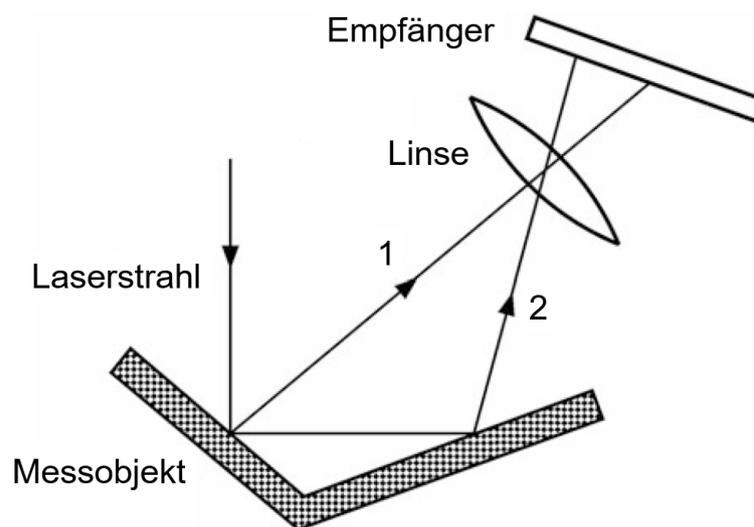


Abbildung 2.9: Doppelte Streuung des Laserstrahls infolge eines unebenen Messobjekts (in Anlehnung an [39])

## Umgebungseinflüsse

Umgebungseinflüsse wie Druck und Temperatur beeinflussen den Brechungsindex des Fluids im Strahlengang des Lasers. Dies führt dazu, dass der Laserstrahl minimale Ablenkungen erfährt, welche zu Messungenauigkeiten führen. Ein ähnlicher Effekt ist durch im Fluid befindliche Partikeln möglich, da auch diese eine Änderung des Brechungsindex bewirken können. Ein weiterer die Messung beeinflussender Parameter ist die Umgebungshelligkeit. Störlichtquellen können je nach Auslegung der Empfänger zu Störungen führen.

Dadurch kann einerseits eine Messabweichungen aber auch ein Messausfall entstehen.

### **Anwendung der Lasertriangulation**

Verwendet werden Lasertriangulationssensoren vorwiegend in Bereichen der Produktions- und Fertigungstechnik. Sie erlauben die Überwachung vorgegebener Toleranzen und sind dazu geeignet, Vibrationen an Geräten zu messen [40].



# Kapitel 3

## Lasertriangulationsteststand

### 3.1 Ziel der Versuche

Zur Untersuchung der einflussnehmenden Parameter hinsichtlich der Lasertriangulation wird ein eigenständiger Prüfstand entwickelt. Dieser ermöglicht es, die Lasertriangulation in Betriebszuständen zu untersuchen, welche in der Filterschlauchversuchsanlage zum Teil technisch nicht möglich sind. So werden verschiedene Messpositionen betrachtet, der Einfluss von Glas zwischen Sensor und Messobjekt, die Wahl eines geeigneten Messaufbaus sowie der Einfluss von Verschmutzungen. In diesem Kapitel werden die grundlegenden Parameter bestimmt, die notwendig sind, um in den darauffolgenden Kapiteln möglichst exakte und wiederholbare Messergebnisse zu erhalten.

### 3.2 Beschreibung des Versuchsstands

Verwendet wird eine Filterkammer, welche mit entsprechenden Anbauten für die Lasertriangulationsmessung ausgerüstet wird (siehe Abbildung 3.1). Mittig in der Filterkammer ist ein Filterschlauch mit innen liegendem Stützkorb angebracht. Dieser kann über einen Motor angetrieben werden, wodurch dieser um seine Längsachse rotiert. Der Filterschlauch wird über einen Lüfter von der Reingasseite her mit einem Unterdruck beaufschlagt. Dem Lüfter nachgeschaltet befindet sich ein Polzeifilter. Entlang der Achse des Filterschlauchs können die Lasertriangulationssensoren mithilfe eines Linearschlittens bewegt werden. Zusammen mit der Rotation des Filterschlauchs kann somit jede Position auf dessen Mantelfläche von den Lasertriangulationssensoren erfasst werden. Dies erlaubt es, ein dreidimensionales Modell des Filterschlauchs im Betrieb anzufertigen. Ebenso lassen sich aufgrund der Rotation und des Linearschlittens verschiedene Messpositionen auf der Filteroberfläche hinsichtlich ihrer Eignung untersuchen. Die Anordnung der Lasertriangulationssensoren ist in Abbildung 3.2 (rechts) dargestellt.

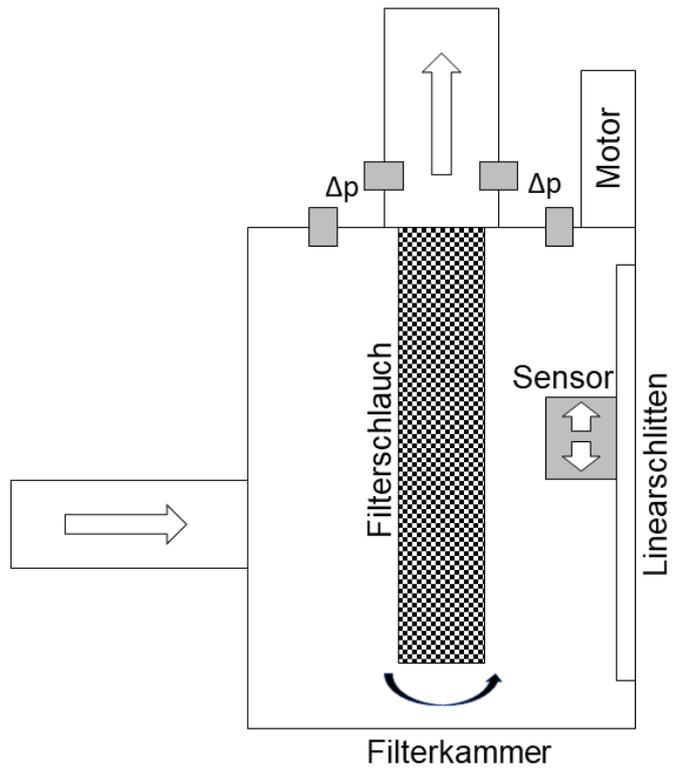
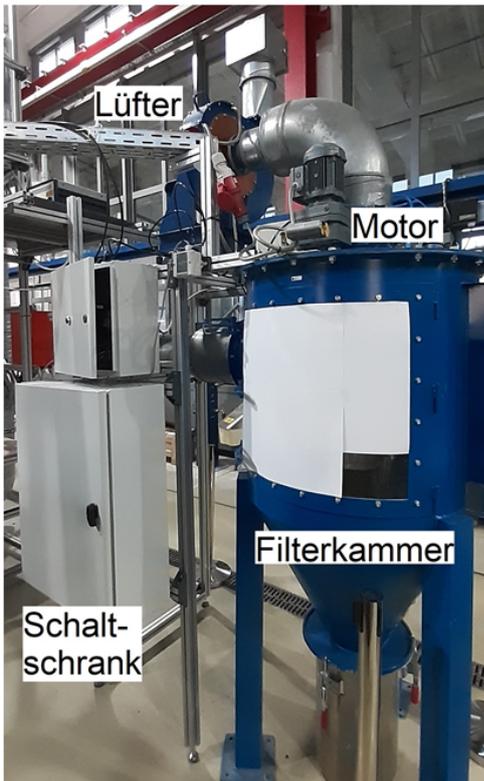


Abbildung 3.1: Triangulationsteststand (Höhe der Filterkammer ca. 2 m) und schematische Darstellung des Teststands.

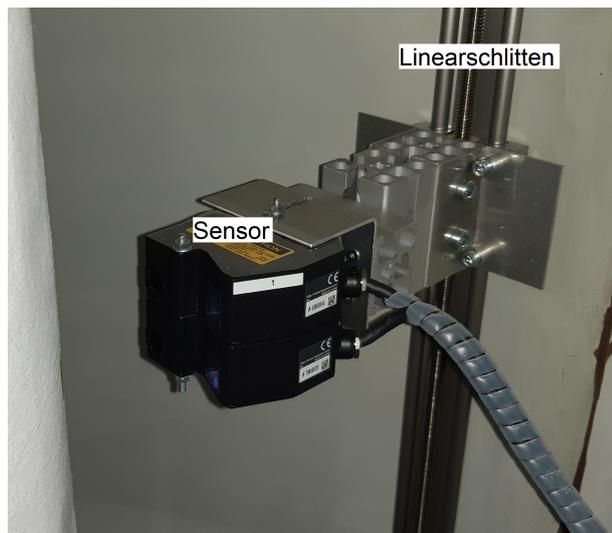


Abbildung 3.2: Anordnung der Sensoren und manuelle axiale Verstellung über Linearschlitten (Durchmesser der Drehspindel ca. 80 mm; Breite der Triangulationssensoren ca. 75 mm)

## Rotation und Linearschlitten

Die Rotation geschieht über einen Asynchronmotor, welcher über ein Getriebe die Halteplatte des Filters in Rotation versetzt. Der Asynchronmotor hat prinzipbedingt einen Schlupf, sodass das Anfahren einer spezifischen Position nicht mit hoher Wiederholgenauigkeit möglich ist. Zudem hat der Motor eine An- und Abfahrrampe, welche die Rotationsgeschwindigkeit mittels einer linearen Funktion ansteigen bzw. abfallen lässt. Die An- und Abfahrrampe führt bei der Vermessung des Filters dazu, dass zu Beginn und zum Ende der Messung die Messpunkte nicht gleichmäßig verteilt sind. Um eine stets gleiche Startposition und eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte über den gesamten Umfang zu erzielen, wird ein induktiver Näherungssensor des Typs *SCHNEIDER ELECTRIC XS612B1PAM12* verwendet. Dieser gibt beim Passieren einer definierten Position ein Signal an die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Um die Messung zu starten, muss die Solldrehzahl erreicht sein und der Näherungssensor muss einen Impuls geben. Ein weiterer Impuls beendet die Messung und die Drehung des Motors. Durch die Abfahrrampe, kommt die Apparatur einige Grad hinter dem Näherungssensor zum Stillstand. Der Linearschlitten wird über eine Kurbel manuell gesteuert. Zur Positionsbestimmung ist ein digitaler Messwertanzeiger verbaut, welcher eine Positionierungsgenauigkeit von 0,1 mm zulässt.

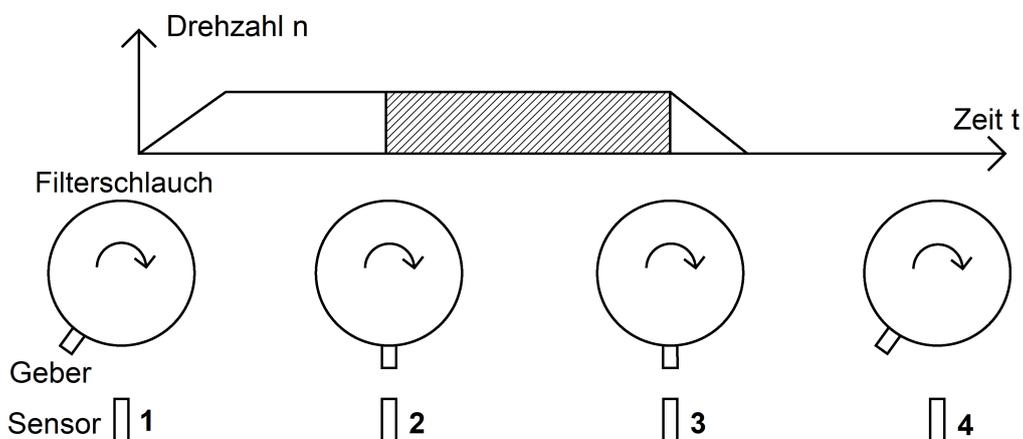


Abbildung 3.3: Ablauf eines Messzyklus unter Nutzung des induktiven Sensors (schraffierter Bereich kennzeichnet Messung). Kreise sind Querschnitte des Filterschlauchs. Drehantrieb über Motor (in Abbildung 3.1 dargestellt).

Abbildung 3.3 stellt den Ablauf eines Messzyklus dar. Die Phasen 1 bis 4 sind:

1. Motor startet die Anfahrrampe und erreicht die Solldrehzahl
2. Induktiver Sensor gibt ersten Impuls und startet die Messung
3. Induktiver Sensor gibt zweiten Impuls und beendet die Messung
4. Motor stoppt

## Filterschläuche und Stützkorb

Die verwendeten Filterschläuche bestehen aus einem Polyester-Nadelfilz mit ePTFE-Membrane. Detailliertere Materialparameter sind im Abschnitt 5.3.5 aufgeführt. Die Filterschläuche haben eine Länge von 600 mm und einen Durchmesser von 150 mm. Befestigt und abgedichtet werden die Schläuche mithilfe eines Doppelwulstschnappings an einer Halteplatte. Entlang der Schläuche befindet sich eine außenliegende Naht. Ebenso ist der Boden des Schlauchs mit einer außenliegenden Naht versehen. Der Stützkorb ist aus Edelstahl gefertigt. Er besteht aus vier Stützringen und acht Stützstäben. Der Boden ist ein geschlossenes Blech und am Eintritt befindet sich eine Venturidüse.

## 3.3 Messtechnik

### 3.3.1 Differenzdruckmessung

Zur Differenzdruckmessung wird ein HESCH HE 5409 (Abbildung 3.4) eingesetzt. Dieser Differenzdrucksensor besitzt einen Messbereich von 0...10 kPa. Über eine Membran, welche in Abhängigkeit des Differenzdrucks eine Auslenkung erfährt (vgl. Abbildung 3.5), wird der Differenzdruck gemessen. Um Fluktuationen des statischen Drucks in der Filterkammer und im Reingasrohr auszugleichen, wird eine Ringmessstelle (Abbildung 3.6) verwendet. Bei allen Anschlusschläuchen wird darauf geachtet, dass diese eine äquivalente Länge besitzen. Die Leitungslänge spielt hinsichtlich der Messung des statischen Drucks keine Rolle, jedoch kann es bei der Nutzung unterschiedlicher Schlauchlängen zu einer Phasenverschiebung der Druckfrequenz kommen, was im Extremfall eine Auslöschung oder Verstärkung eventueller Druckfrequenzen zur Folge hat (vgl. Abbildung 3.7).

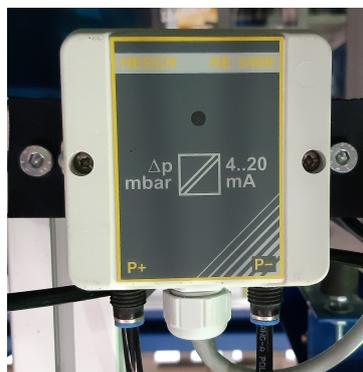


Abbildung 3.4: Differenzdrucksensor HESCH HE 5409

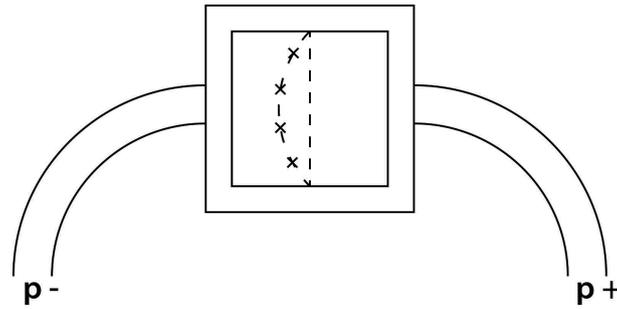


Abbildung 3.5: Prinzip der Differenzdruckmessung. Eine steigende Druckdifferenz führt zu einer größeren Auslenkung der Membran

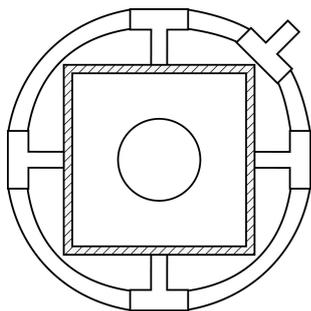


Abbildung 3.6: Ringmessstelle (Durchmesser des Lüftungsrohrs 250 mm)

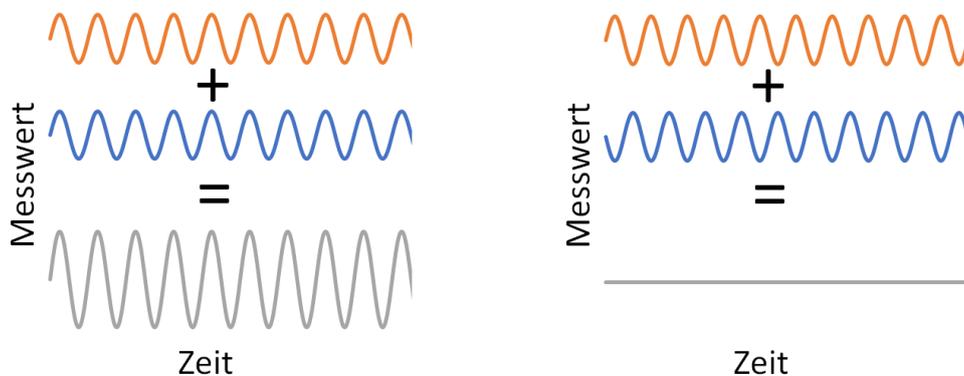


Abbildung 3.7: Frequenzverstärkung bzw. -auslöschung durch Überlagerung zweier Frequenzen ohne (links) und mit (rechts) Phasenverschiebung

### 3.3.2 Lasertriangulationsmessung

Die Messung der Staubkuchendicke wird mithilfe eines Lasertriangulationsverfahrens durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.3.4). Hierzu wird ein Messaufbau, bestehend aus Komponenten der Firma KEYENCE verwendet. Dieser Messaufbau beinhaltet die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Baugruppen. Die Eigenschaften der verwendeten Lasertriangulationssensoren sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Aufgrund der hohen Messgenauigkeit eignet sich der Sensor für die Vermessung der Partikelabscheidung an Filterschläuchen. Entsprechend der

Tabelle 3.1: Bestandteile des Messaufbaus zur Messung der Staubkuchendicke

Modell	Bezeichnung
LK-H087	1D Triangulationslaser-Sensorkopf
LK-G5001P	Steuerung CMOS Laserwegmesssystem
LK-H2	Konfigurationssoftware zu LK-G5001P

Tabelle 3.2: Daten des Lasertriangulationssensors KEYENCE LK-H087 [41]

Keyence LK-H087	
Einstellmodus	Diffuse Reflexion
Referenzabstand	80 mm
Messbereich	$\pm 18$ mm
Laser	Roter Halbleiterlaser Klasse 2
Wellenlänge	655 nm
Lichtpunktdurchmesser	$70 \mu\text{m} \times 2.500 \mu\text{m}$
Messgenauigkeit	$\pm 7,2 \mu\text{m}$
Wiederholbarkeit	$0,1 \mu\text{m}$
Messfrequenz	1..392 kHz
Umgebungslicht	$\leq 10.000$ Lux
Umgebungstemperatur	$0 \dots 50^\circ\text{C}$
Relative Luftfeuchtigkeit	35 ... 85 % RH (keine Kondensation)

Partikelgrößenverteilung (vgl. Abschnitt 5.3.4) sind die kleinsten Partikeln im Bereich von etwa  $0,5 \mu\text{m}$ . Ca. 85 % (volumenbezogen) der Partikeln sind größer als  $7,2 \mu\text{m}$ . Umgerechnet auf die anzahlbezogene Partikelgrößenverteilung zeigt sich jedoch, dass nur ca. 1 % der Partikeln größer als  $7,2 \mu\text{m}$  sind. Somit können einzelne Partikeln im Regelfall nicht messtechnisch erfasst werden.

## 3.4 Durchgeführte Versuchsreihen

### 3.4.1 Messverfahren

#### Variante 1 - Einfachmessung

Es wird untersucht, ob mit einem einzelnen Lasertriangulationssensor valide Messwerte zu erzielen sind. Dabei sind zwei gegenläufige Effekte, Aufbau des Staubkuchens und Verformung des Filtermediums, zu beachten.

Mithilfe der Lasertriangulationsmethode wird der Abstand eines Fixpunkts zu einer Oberfläche gemessen. Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Messobjekt die Oberfläche des Staubkuchens ist. Jedoch ist das Filtermedium, auf welchem sich der Staubkuchen bildet, nicht fixiert sondern in der Lage, sich zu bewegen. Der Stützkorb begrenzt diese Bewegung, schließt sie jedoch nicht aus. Bei wachsendem Staubkuchen, wächst auch der Differenzdruck zwischen beiden Seiten des Filtermediums (vgl. Gleichung 2.15). Dies führt

zu einer Kraft, welche das Filtermedium verformt (vgl. Abschnitt 3.4.2). Diese wirkt in entgegengesetzter Richtung zum Wachstum des Staubkuchens. Aus diesem Grund ist es notwendig, beide Effekte getrennt voneinander zu betrachten. Es wird ein Ansatz gewählt, bei dem die Verformung über einen Algorithmus ausgeglichen wird. Grundlage hierfür ist, dass eine Korrelation zwischen Verformung und Differenzdruck existiert. Zum Ausgleichen mittels Algorithmus ist eine Ausgleichsfunktion zu ermitteln. Folgendes Vorgehen wird dafür genutzt. Es wird ein Filterschlauch im Teststand installiert. Dieser kann verschiedene Beladungsgrade aufweisen (von unbeladen bis zu vollständig beladen). Es werden keine Partikeln in das System eingebracht, um ein Wachstum des Staubkuchens zu verhindern. Anschließend wird ein steigender Druckverlust über das Modulieren des Volumenstroms simuliert. Um die Bewegung des Filtermediums möglichst klein zu halten, werden zusätzliche Drähte am Stützkorb angebracht (vgl. Abbildung 3.8). Dies führt zu einer Verringerung der Verformung von ursprünglich etwa 20 mm auf etwa 2 bis 4 mm. Es werden die Verformung des Filtermediums, sowie der Differenzdruck gemessen und anschließend ausgewertet.



**Abbildung 3.8: Verfeinerung des Stützkorbs zur Minimierung der Verformung des Filtermediums (Durchmesser der Stützkorbdrähte 4 mm)**

Aus den gemessenen Daten wird eine Funktion der Verformung über den Druckverlust gebildet, welche in Abbildung 3.9 dargestellt ist. Die Funktion weist eine Hysterese bei ansteigendem bzw. absinkendem Druckverlust auf. Dies ist zu vernachlässigen, da im Filtrationsbetrieb ausschließlich ansteigender Druckverlust auftritt. Problematisch ist jedoch, dass der Grad der Beladung des Filtermediums einen Einfluss auf die Ausgleichsfunktion hat. Dies bedeutet eine doppelte Abhängigkeit, bei der die Ergebnisgröße gleichzeitig eine notwendige Eingangsgröße darstellt. Für geringe ( $< 200$  Pa) Druckverluste zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung der Kurven für beladene und unbeladene Filter. Bei einem Druckverlust von ca. 1250 Pa schneiden sich beide Kurven. Eine mögliche Erklärung hierfür ist eine beginnende Kompression des Staubkuchens infolge des hohen Differenzdrucks. Im Betriebsbereich unterhalb von 1000 Pa ist die Abweichung beider Kurven jedoch wesentlich. Ein weiterer Punkt, welcher gegen die Nutzung der Ausgleichsfunk-

tion spricht, sind die verschiedenen Skalen bei Verformung und Staubkuchenwachstum. Wie oben genannt, liegen die auftretenden Verformungen im Bereich weniger Millimeter, wohingegen das Staubkuchenwachstum im zweistelligen Mikrometerbereich pro Minute stattfindet. Daher ist zu erwarten, dass Fluktuationen der Verformung das Wachsen des Staubkuchens überlagern. Eine weitere Verfeinerung des Stützkorbs ist kontraproduktiv, da dies zu einer Anomalie des Filtrationsprozesses führt und damit keine repräsentative Messung gegeben ist.

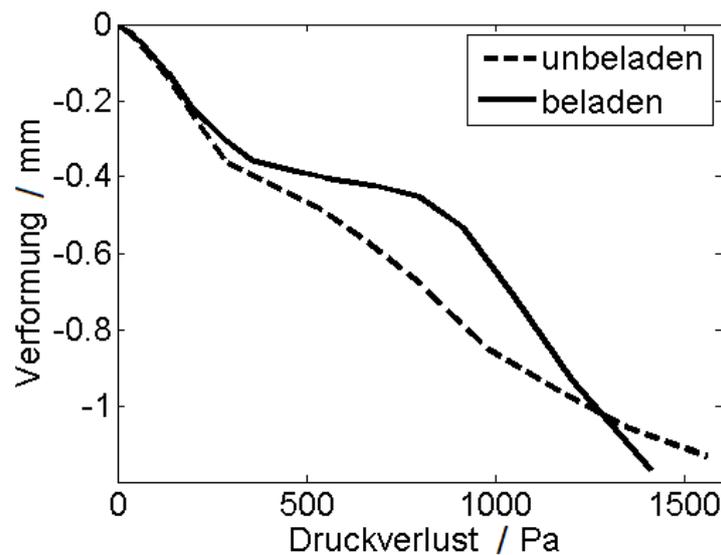


Abbildung 3.9: Ausgleichsfunktionen für beladene und unbeladene Filter [42]. Parameter des beladenen Filters: APYRAL16 (vgl. Abschnitt 5.3.4) mit einer Flächenmasse von  $6,5 \text{ g/cm}^2$ .

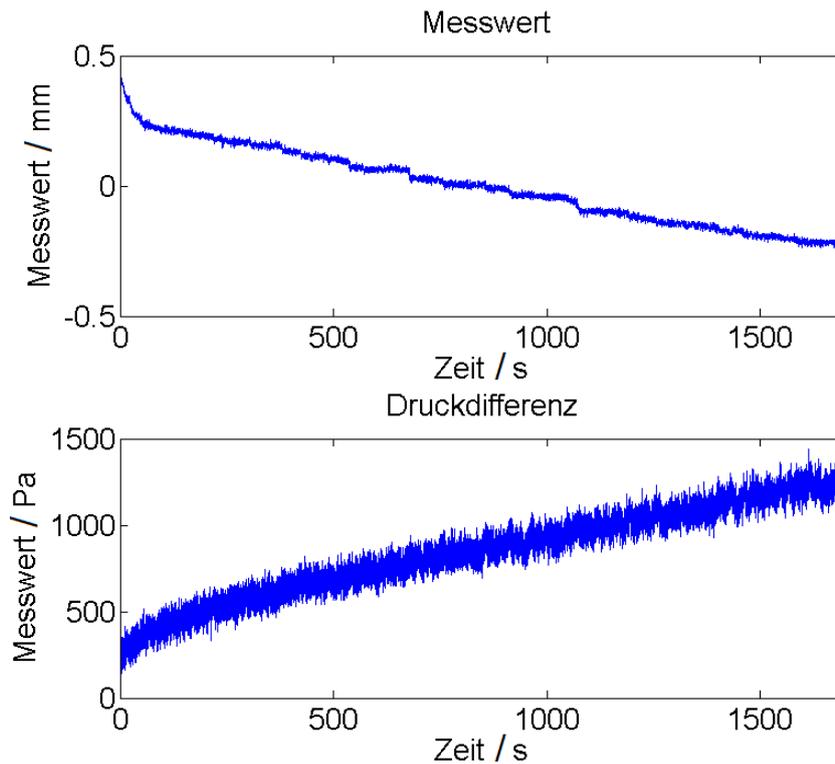


Abbildung 3.10: Mit einem Lasertriangulationssensor aufgenommene Messwerte für Distanz zur Filteroberfläche und Druckverlust ohne Anwendung einer Ausgleichsfunktion

Abbildung 3.10 stellt das Ergebnis einer Messung mit einem Lasertriangulationssensor dar. Es zeigt sich einen monoton fallenden Messwert bei gleichzeitig steigendem Druckverlust. Da nur ein Sensor verwendet wird, wird im Wesentlichen die Verformung des Filtermediums gemessen. Aus diesem Grund wird das Ergebnis mithilfe der gefundenen Ausgleichsfunktion ausgewertet. Die Auswertung ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Das ursprüngliche Messergebnis (oben) führt durch Anwendung der Ausgleichsfunktion zum mittleren Graphen. Die korrigierte Schichtdicke ist im unteren Feld dargestellt. Die Kurve fällt zunächst langsam und beginnt im zeitlichen Verlauf zu steigen. Zu erwarten ist an dieser Stelle eine streng monoton steigende Schichtdicke, unter der Voraussetzung, dass keine Kompression des Staubkuchens einsetzt. Eine Kompression würde sich wiederum im Verlauf des Druckverlusts zeigen. Somit ist das erhaltene Ergebnis, trotz der Anwendung der Ausgleichsfunktion, nicht plausibel. Aus diesen Gründen wird die Staubkuchenvermessung mit lediglich einem Sensor verworfen.

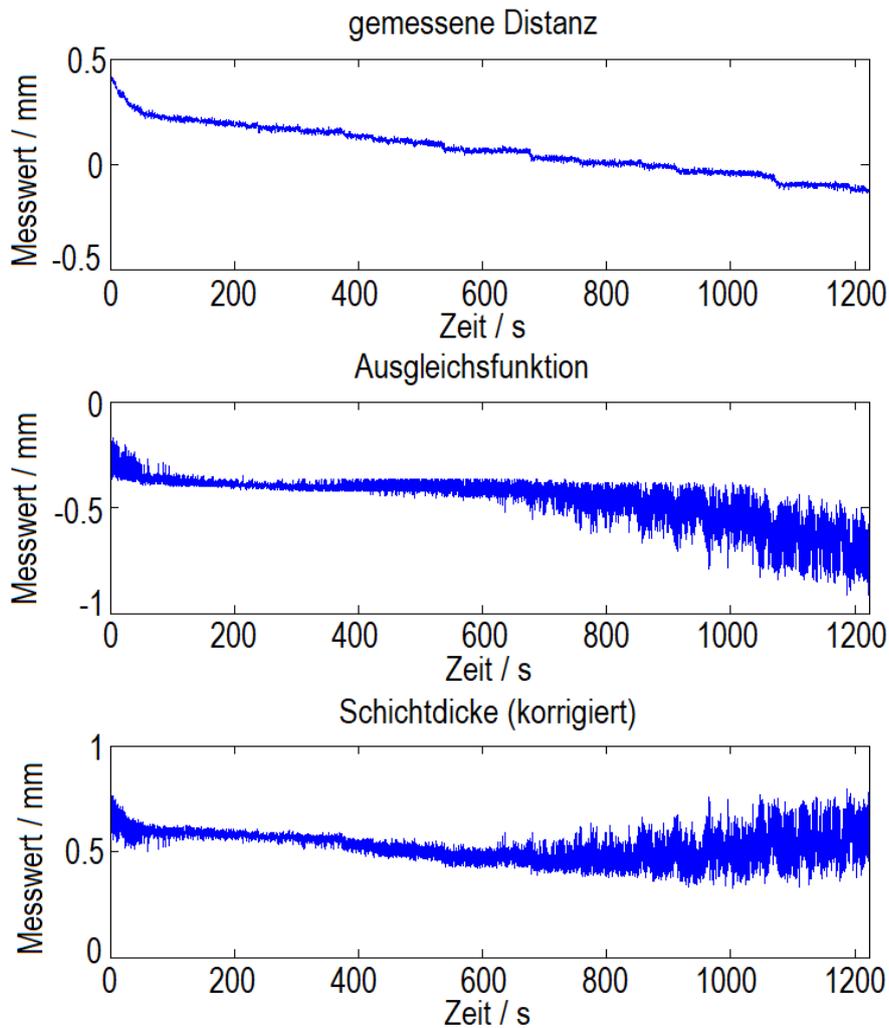


Abbildung 3.11: Verarbeitung der von einem Lasertriangulationssensor aufgenommenen Messwerte mithilfe einer Ausgleichsfunktion

## Variante 2 - Differenzmessung

Da die Einfachmessung nicht erfolversprechend ist, wird ein Differenzmessverfahren angewandt. Dieses bedingt zwei Lasertriangulationssensoren, welche simultan messen und eine Differenz zwischen beiden Messwerten bilden. Hierbei misst ein Lasertriangulationssensor gegen ein Referenzmessobjekt, welches einen definierten Abstand zur Filteroberfläche aufweist (siehe Abbildung 3.12). Der zweite Sensor misst direkt auf der Filteroberfläche bzw. direkt auf dem Staubkuchen. Bei einer Verschiebung des Filtermediums infolge des Differenzdrucks zwischen Roh- und Reingasseite, verschiebt sich das Referenzmessobjekt zusammen mit dem Filtermedium. Eine zunehmende Differenz zwischen beiden Sensoren bedeutet also, dass Partikeln an der Messposition des Lasers 2 abgeschieden werden.

### Dicke des Staubkuchens:

$$\Delta s = x_{L1} - x_{L2} \quad (3.1)$$

Mit: Messwert Laser 1  $x_{L1}$ ; Messwert Laser 2  $x_{L2}$

Damit kann das Wachstum der Staubkuchendicke an einer Position ermittelt werden. Eine Absolutmessung der Dicke des Staubkuchens ist nicht möglich. Es kann lediglich die Dickenänderung im Messzeitraum erfasst werden.

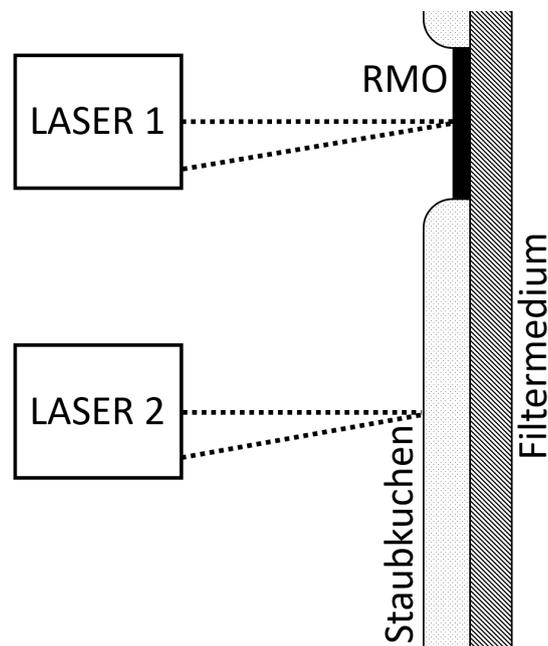
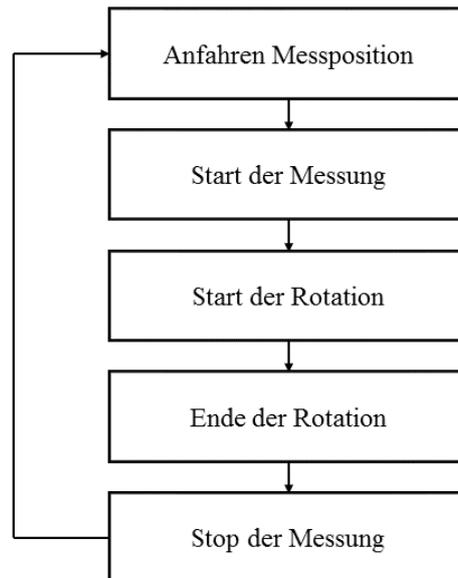


Abbildung 3.12: Aufbau der Differenzmessung. Laser 1 misst die Distanz zum Referenzmessobjekt (RMO), Laser 2 die Distanz zum Staubkuchen. Die Differenz der Messwerte ergibt Änderung der Staubkuchendicke

### 3.4.2 Vermessung des Filterschlauchs

Aufgrund der Freiheitsgrade der Lasertriangulationssensoren ergibt sich die Möglichkeit, jeden Punkt auf der Mantelfläche des Filterschlauchs zu vermessen. So kann die Oberfläche des Filterschlauchs vermessen werden. Durch Erzeugen eines Unterdrucks auf der Reingasseite des Filterschlauchs kann eine Verformung des Filters erzeugt werden, welche der Verformung während des regulären Filtrationsbetriebs entspricht. Der Ablauf geschieht wie folgt:



Hierbei wird das Messraster über das Modulieren von Rotationsgeschwindigkeit und Abstand der axialen Messpositionen angepasst. Die tangentielle Rasterung errechnet sich dabei wie folgt:

**Tangentiales Messraster:**

$$\Delta x_{\text{tangential}} = \frac{u_{FS}}{T_{FS} \cdot f_{Mess}} \quad (3.2)$$

Mit: Umfang des Filterschlauchs  $u$ ; Umlaufdauer  $T$ ; Messfrequenz  $f$

Hierbei fließen der Umfang  $u_{FS}$ , die Zeitdauer für eine komplette Umdrehung des Filterschlauchs  $T_{FS}$  und die Messfrequenz  $f_{Mess}$  in die Berechnung ein.

Die Messfrequenz wird durch die verwendete SPS limitiert und beträgt konstant 10 Hz. Die Rotationsdauer kann zwischen 569,61 s und 18,06 s moduliert werden. Entsprechend ergibt sich ein minimales bzw. maximales tangentes Messraster von:

$$\Delta x_{\text{tangential},\min} = 82,73 \mu\text{m} \quad (3.3)$$

$$\Delta x_{\text{tangential},\max} = 2,61 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Es werden somit mindestens 180 Messpunkte und maximal 5696 Messpunkte über den Umfang erfasst. Die verwendete SPS beschränkt die maximalen Messpunkte auf 2000. Dadurch erhöht sich das minimale tangentes Messraster auf  $\Delta x_{\text{tangential},\min} \approx 240 \mu\text{m}$ .

## Berechnungsalgorithmen

Die aufgenommenen Messwerte müssen zur weiteren Nutzung zunächst mithilfe von Algorithmen radial angeordnet werden. Es besteht eine Orbitalbewegung, wenn der Stützkorb nicht exakt entlang der Rotationsachse ausgerichtet ist. Es kommt somit zu einer Überlagerung aus der Rotationsbewegung des Filters und der Kreisbahn, welche aus einer inexakten Ausrichtung resultiert. Um diese Ungenauigkeit zu minimieren, wird die Achse des Stützkorbs lasergestützt eingestellt.

## Ergebnisse

Der Filterschlauch legt sich wie erwartet bei steigender Druckdifferenz stärker an den Filterkorb an und die Verformung zwischen den Stützkorbdrähten erhöht sich. Es kommt zu starken Unregelmäßigkeiten bei der sich einstellenden Oberfläche. Es existiert keine ausgeprägte Symmetrie. Dies liegt zum einen an der Naht, welche sich axial entlang der Filteroberfläche zieht. Zudem ist das Filtermaterial mit  $550 \text{ g/m}^2$  sehr steif und wirft zum Teil deutliche Falten, statt sich in der erwarteten Form an den Stützkorb anzulegen.

Abbildung 3.13 zeigt die Ergebnisse einer Vermessung. Die obere Abbildung zeigt den Zustand des Filters bei einer Einstellung des Lüfters von 60 %, die untere Abbildung bei 100 %. Die farbliche Markierung zeigt den Radius an (blau - geringer Radius; rot - hoher Radius). Der dargestellte Filterabschnitt hat eine axiale Länge von 200 mm und einen Durchmesser von ca. 150 mm. Die Werte sind zusätzlich in Tabelle 3.3 als Zahlenwerte im Vergleich angegeben. Auffallend ist, dass der Maximalradius bei höherer Lüftereinstellung ebenfalls erhöht ist. Zu erwarten ist tendenziell ein geringerer Radius. Der Grund für diese Anomalie liegt darin begründet, dass der Filterschlauch bei hohem Druckverlust eine erhöhte Faltenbildung aufweist und daher größere Verformungen auftreten. Die Ergebnisse zeigen einen Unterschied von  $929 \mu\text{m}$  in der maximalen Verformung zwischen geringer und hoher Lüfterdrehzahl. Bezogen auf den Filtrationsprozess in der Schlauchfilteranlage bedeutet dies, dass ähnliche Unterschiede in der Verformung zwischen Beginn und Ende der Filtrationsphase zu erwarten sind.

Tabelle 3.3: Ergebnisse der Vermessung des Filterschlauchs bei unterschiedlichen Lüftereinstellungen

Lüftereinstellung	60 %	100 %
Druckverlust	506 Pa	1237 Pa
Minimaler Radius	60,843 mm	60,905 mm
Mittlerer Radius	75,800 mm	76,288 mm
Maximaler Radius	81,943 mm	82,935 mm
Maximale Verformung	21,100 mm	22,029 mm

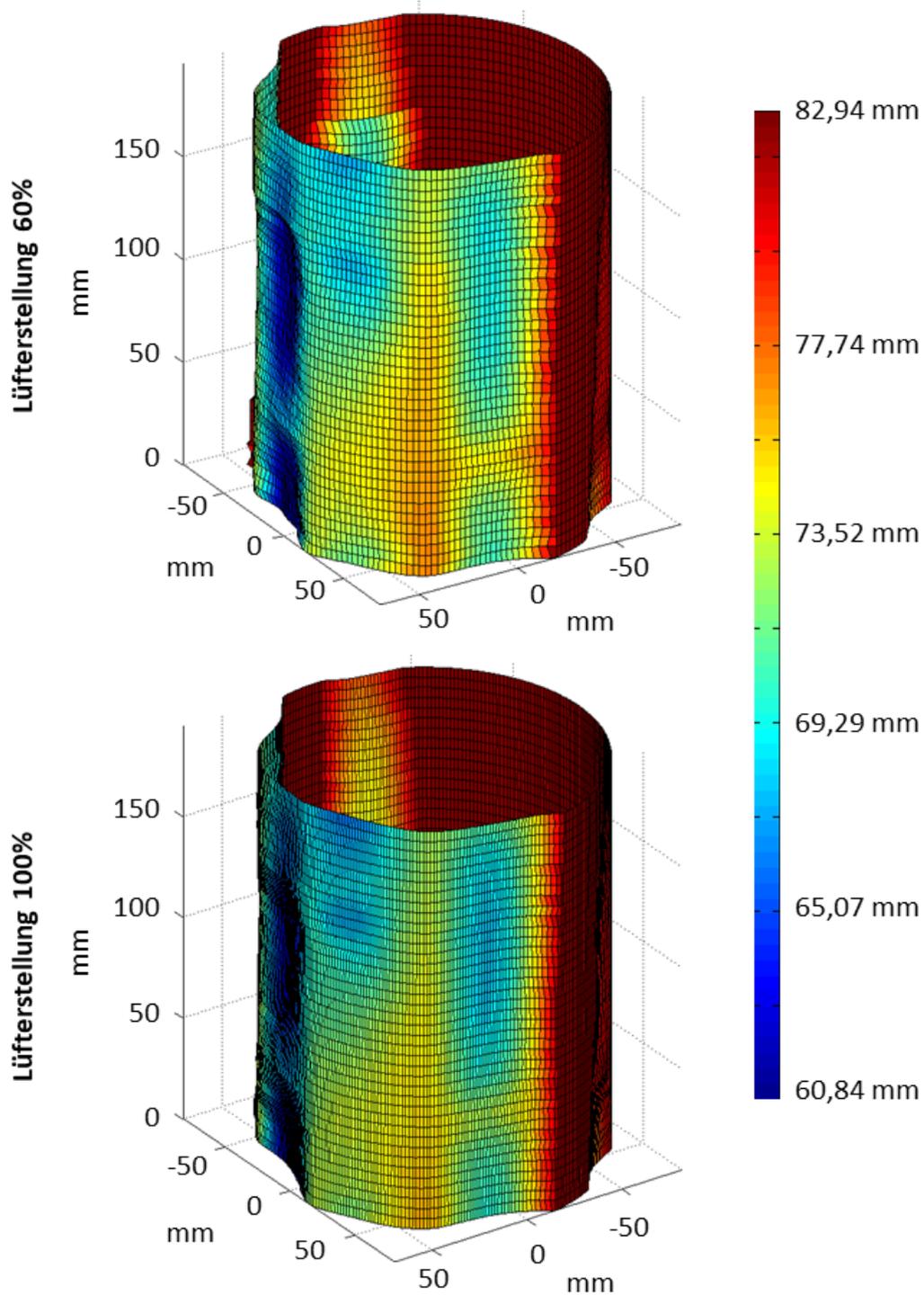


Abbildung 3.13: Ergebnisse aus der Filterschlauchvermessung für Lüfterstellungen von 60 % und 100 %

### 3.4.3 Einfluss der Messposition

#### Messposition bezogen auf Filteroberfläche

Zu erwarten ist, dass die Position der Messung in axialer und tangentialer Richtung einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Ebenso spielt es eine Rolle, in welcher Position sich die Lasertriangulationssensoren zueinander befinden. Aufgrund der Verformung des Filtermediums im Betrieb, müssen die Messpunkte beider Sensoren möglichst nah beieinander liegen. Andernfalls kann es zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Zu erwarten ist, dass für eine ideale Messung beide Messpunkte möglichst nah beieinander liegen und eine Messposition mittig zwischen den Stützkorbstäben gewählt wird (siehe Abbildung 3.14).

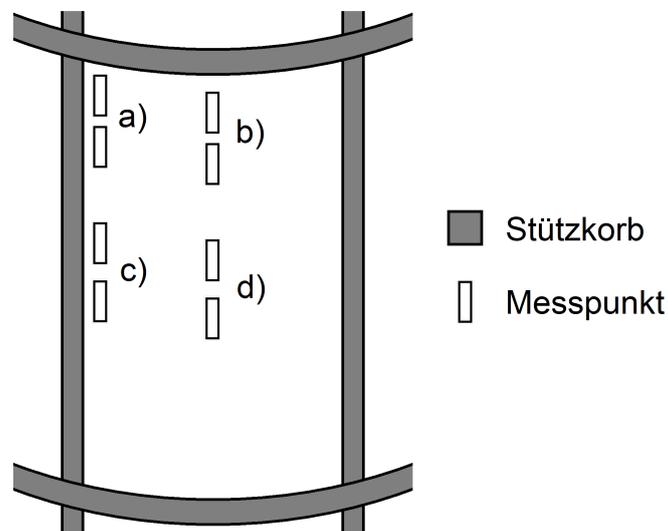


Abbildung 3.14: Lage der Messpositionen in Relation zum Stützkorb

Überprüft wird dies experimentell. Hierzu werden die Messpositionen a) bis d) angefahren und ohne Staubdispergierung gemessen. Die Verformung infolge des Differenzdrucks wird über den Volumenstrom moduliert, sodass Differenzdrücke bis ca. 1.000 Pa erreicht werden. An einer idealen Messposition ändert sich die Differenz zwischen den zwei Lasertriangulationssensoren nicht. Das Ergebnis ist in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Ergebnisse der verschiedenen Messpositionen (vgl. Abbildung 3.14)

Position	Schwankungsbreite
a)	1,216 mm
b)	4,461 mm
c)	0,927 mm
d)	12,650 mm

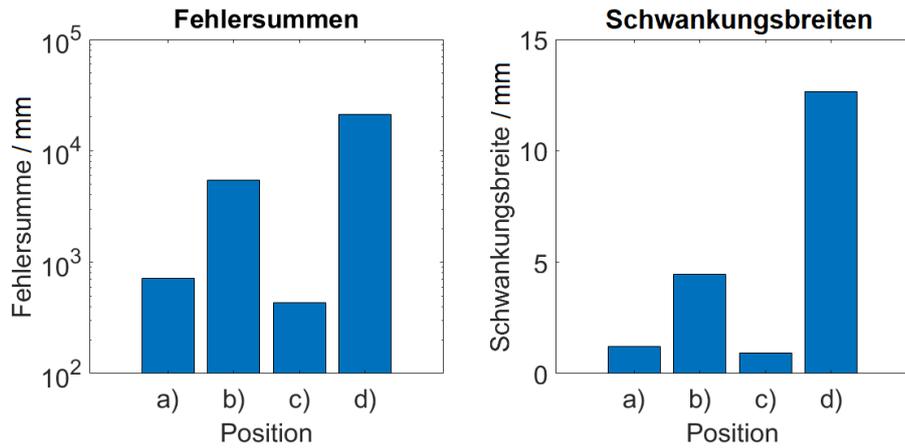


Abbildung 3.15: Fehlersummen und Schwankungsbreiten der Messwerte an den vier Messpositionen a) bis d). Als ideale Messposition stellt sich Position c) heraus.

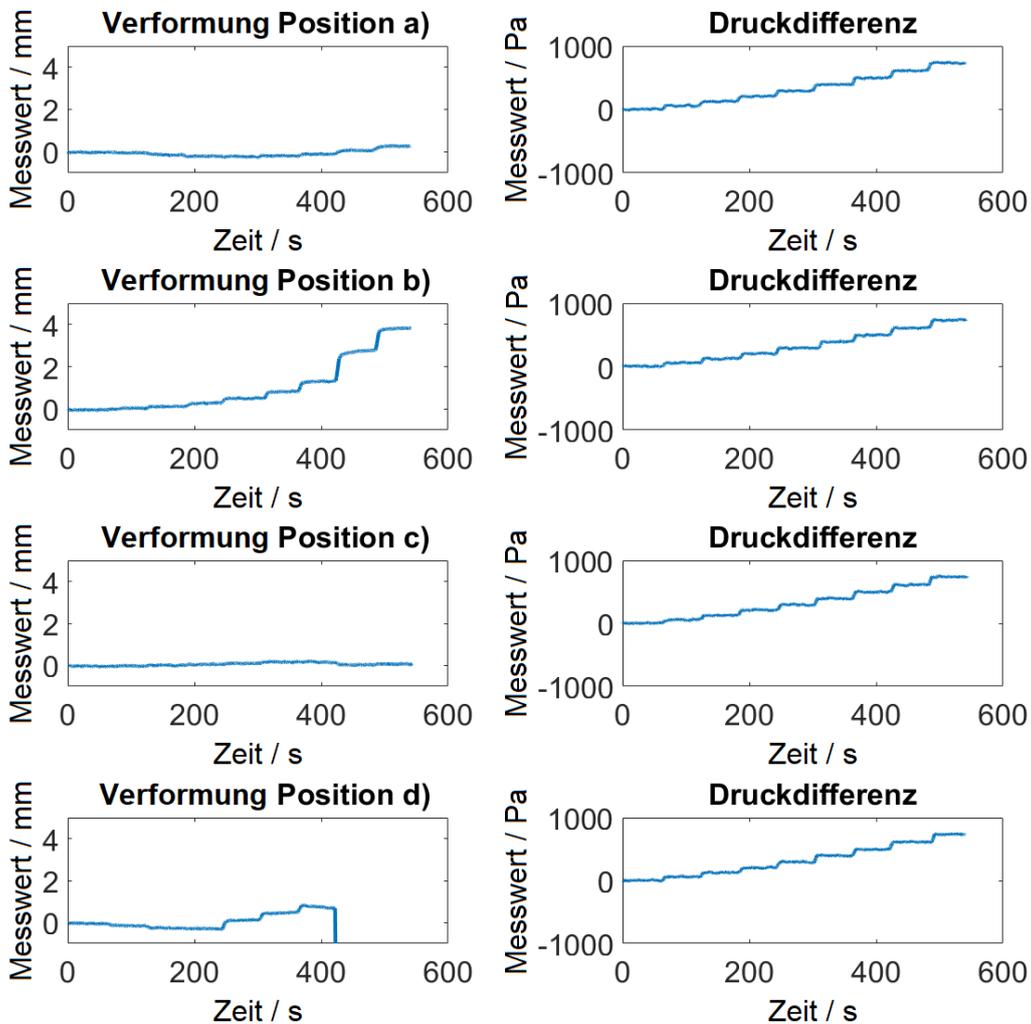


Abbildung 3.16: Ergebnisse der Messwerte an den vier Messpositionen. Eine Korrelation von Druckverlust und Messwerte deutet darauf hin, dass die Messposition ungeeignet ist. Als ideale Messposition erweist sich Position c), welche die geringste Abhängigkeit zum Druckverlust aufweist.

Die Messungen werden mit Gewebeklebeband als Referenzmessobjekt durchgeführt. Dieses erweist sich als optimales Referenzmessobjekt (vgl. Abschnitt 3.4.7). Eine Auswertung der Fehlersummen und der Schwankungsbreiten ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Messposition c) weist sowohl hinsichtlich der Fehlersumme als auch der Schwankungsbreite teils deutlich niedrigere Werte als die restlichen Positionen auf. Damit ist Messposition c) von den vier untersuchten Positionen am geeignetsten für die Anwendung des Messsystems. Zusätzlich sind die Messverläufe an den vier Positionen in Abbildung 3.16 dargestellt. Hierbei wird die Verschiebung der jeweiligen zwei Messpunkte gegeneinander, respektive die lokale Verformung des Filtermediums gemessen. Auffällig sind vor allem die Messergebnisse an Position d). Der rapide Abfall bei ca. 400s ist dadurch zu erklären, dass der Messbereich des Lasertriangulationssensors verlassen wird. Das Messgerät gibt dann einen fiktiven Negativwert außerhalb des eigentlichen Wertebereichs aus. Vor dem Abbruch der Messung ist jedoch eine ausgeprägte Abhängigkeit der Differenzmessung zur Druckdifferenz zu beobachten, sodass die Messposition als ungeeignet einzustufen ist. Ebenso ist bei den Messpositionen a) und b) ein Treppeneffekt und damit eine Abhängigkeit zur Druckdifferenz zu beobachten. Messposition c) zeigt die geringste Abhängigkeit von Verformung zu Druckverlust und stellt damit die ideale Messposition der vier untersuchten Positionen dar.

### Horizontale oder vertikale Ausrichtung

Die horizontale/vertikale Ausrichtung der Lasertriangulationssensoren ist deshalb relevant, da diese ein rechteckiges Messfeld erfassen. Dieses Messfeld ist bezüglich einer Biegung der zu messenden Oberfläche richtungsabhängig (siehe Abbildung 3.17). Die Lasertriangulationssensoren mitteln das Messergebnis über das zu vermessende Rechteck.

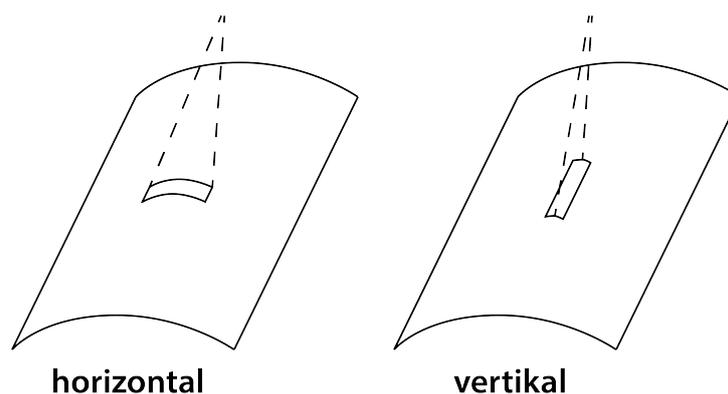


Abbildung 3.17: Horizontale und vertikale Ausrichtung der Lasertriangulationssensoren

Um den Einfluss der Biegung jedoch zu minimieren, ist eine vertikale Anordnung vorteilhaft. Durch die Abmessungen der Lasertriangulationssensoren ergibt sich bei vertikaler Ausrichtung ein Mindestabstand zwischen den Messpunkten zweier benachbarter Senso-

ren von 33,5 mm. Bei horizontaler Ausrichtung beträgt der Minimalabstand 18,4 mm. Ein geringerer Messabstand zwischen beiden Messpunkten wirkt sich erwartungsgemäß positiv aus, da Verformungen des Filters durch Faltenbildung über den kleineren Messabstand zu geringeren absoluten Abweichungen führen.

### 3.4.4 Einfluss der transparenten Schutzmaterialien

Dieser Versuchsteil untersucht den Einfluss verschiedener transparenter Schutzmaterialien auf das Messsystem. Werden die Sensoren außerhalb der Filterkammer angebracht, müssen die Laserstrahlen auf ihrem Weg zweifach eine transparente Scheibe durchdringen. Aufgrund der Brechung kommt es beim Durchdringen der Scheibe zu keiner Winkeländerung, aber zu einer Parallelverschiebung des reflektierten Strahls (Abbildung 3.18).

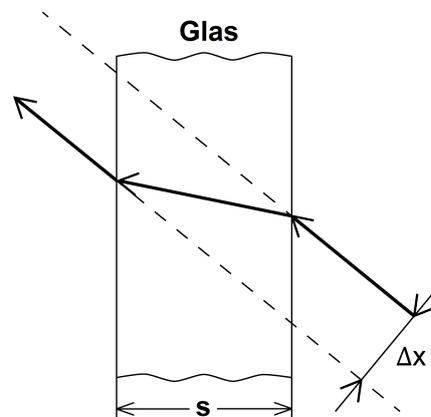


Abbildung 3.18: Strahlengang durch eine Glasscheibe und die resultierende Parallelverschiebung des Laserstrahls (Proportionen übertrieben dargestellt)

Laut Datenblatt hat der Lasertriangulationssensor *KEYENCE LK-H087* einen Reflexionswinkel von  $24^\circ$ . Der Brechungsindex von Luft sei mit  $n_{Luft} = 1,0$  und der Brechungsindex von Glas mit  $n_{Glas} = 1,5$  angenommen [43]. Es ergibt sich folgender mathematischer Zusammenhang:

$$\beta_2 = \sin^{-1} \left( \sin(\beta_1) \cdot \frac{n_{Luft}}{n_{Glas}} \right) \quad (3.5)$$

$$\Delta x = s_{Glas} \cdot \frac{\sin(\beta_1 - \beta_2)}{\cos(\beta_2)} \quad (3.6)$$

Mit: Ein- und Austrittswinkel  $\beta$ ; Brechungsindex  $n$ ; Glasdicke  $s$ ; Verschiebung des Laserstrahls  $\Delta x$

Daraus ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Glasdicke und Parallelverschiebung des Laserstrahls:

$$\Delta x = s_{Glas} \cdot \sin(\beta_2) \cdot \left( \frac{n_{Glas}}{n_{Luft}} - \frac{\cos(\beta_1)}{\cos(\beta_2)} \right) \quad (3.7)$$

Mit:  $\beta_2 \neq \frac{\pi}{2} + k \cdot \pi \wedge n_{Luft} \neq 0; k \in \mathbb{Z}$

Der Winkel des Laserstrahls ändert sich beim Glasdurchgang laut des Snelliusschen Gesetzes nicht, wenn das Medium vor und hinter dem Glas den gleichen Brechungsindex aufweist:

$$\sin(\beta_1) \cdot n_{Luft} = \sin(\beta_2) \cdot n_{Glas} = \sin(\beta_3) \cdot n_{Luft} \quad (3.8)$$

$$\sin(\beta_1) = \sin(\beta_3) \quad (3.9)$$

$$\beta_1 = \beta_3 \quad (3.10)$$

Somit kann Gleichung 3.7 auf folgenden linearen Ausdruck vereinfacht werden:

$$\Delta x = 0,1494 \cdot s_{Glas} \quad (3.11)$$

Bei einer Glasdicke von 4 mm verschiebt sich der Laserstrahl um 0,6 mm.

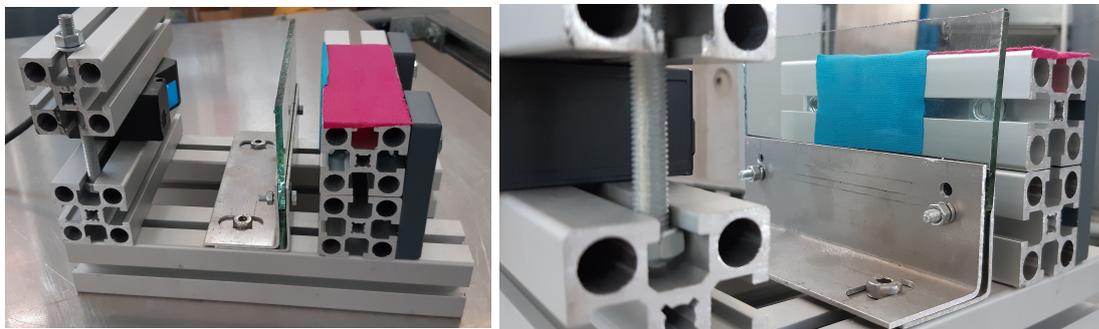


Abbildung 3.19: Teststand zur Bestimmung der Strahlenverschiebung bei Transmission und des Einflusses unterschiedlicher Materialien und Farben des Referenzmessobjekts (Verwendete Profilschienen 45 mm x 45 mm)

Einen Einfluss auf den Brechungsindex der Luft können allerdings auch die Staubpartikeln des Rohgases haben. Um dies, zusammen mit anderen Einflussfaktoren des Glases wie Streuung, Reflexion und Transmissionsgrad, zu untersuchen, wird ein Testaufbau verwendet, wie er in Abbildung 3.19 gezeigt wird. Dadurch kann ermittelt werden, inwiefern sich der Messwert verändert, sobald der Probekörper in den Messstrahl eingebracht wird. Hierbei ist wichtig, dass das Einbringen des Probekörpers keine starke Bewegung des Aufbaus zur Folge hat, welche ansonsten eine Positionsänderung des Sensors zum Messobjekt hervorrufen kann.

Die Untersuchung wird mit vier verschiedenen Probekörpern durchgeführt:

1. Glas 2 mm
2. Glas 4 mm
3. Polyacrylglas (PAG) 2 mm
4. Polyacrylglas (PAG) 4 mm

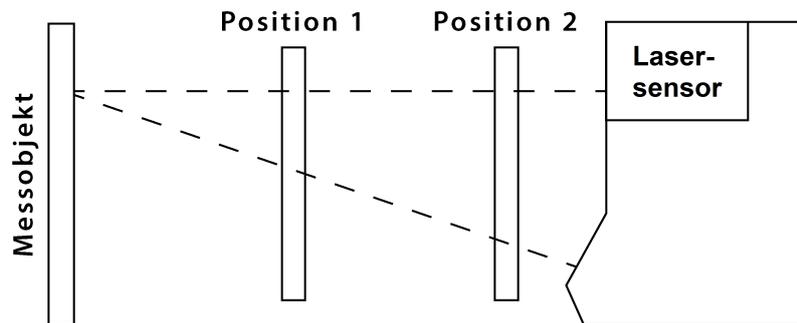


Abbildung 3.20: Messpositionen der Glasprobekörper: Position 1 hat einen Abstand zum Sensor von 60 mm, Position 2 von 15 mm

Jeder Probekörper wird an zwei unterschiedlichen Positionen untersucht (Abbildung 3.20). Das Ergebnis der Untersuchung ist in den Tabellen 3.5 und 3.6 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Gläser bei 0° Ausrichtung

Glasart	Abweichung Position 1	Abweichung Position 2	Lichtschwächung
Glas 2 mm	0,769 mm	0,772 mm	0 %
Glas 4 mm	1,439 mm	1,447 mm	0 %
PAG 2 mm	0,765 mm	0,795 mm	0 %
PAG 4 mm	1,396 mm	1,410 mm	0 %

Tabelle 3.6: Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Gläser bei 10° Ausrichtung

Glasart	Abweichung Position 1	Abweichung Position 2	Lichtschwächung
Glas 2 mm	0,788 mm	0,888 mm	0 %
Glas 4 mm	1,429 mm	1,538 mm	0 %
PAG 2 mm	0,786 mm	0,945 mm	0 %
PAG 4 mm	1,369 mm	1,456 mm	0 %

## Resultat

Es zeigt sich, dass die beim Glasdurchgang entstehende Parallelverschiebung des Laserstrahls zu einer signifikanten Abweichung des Messwerts führt. Dies ist dahingehend relevant, dass der Abstand zwischen Messsensor und Messobjekt angepasst werden muss, um zu verhindern, dass der eng definierte Messbereich über- oder unterschritten wird. Die Lichtintensität wird durch gereinigtes Glas nicht messbar geschwächt.

In Abbildung 3.21 wird deutlich, dass bei einem Winkel von  $90^\circ$  zwischen Laser und Glas, die Position des Glases keine Rolle spielt. Wird der Sensor nicht orthogonal zum Messobjekt ausgerichtet, stellt sich eine deutliche Differenz des Messwerts zwischen beiden Positionen ein. Erklärt werden kann dies durch die doppelte Brechung im Glas infolge eines Eintrittswinkels beim Erstdurchgang von  $\neq 0^\circ$ . Dadurch kommt es sowohl beim Erst- als auch beim Zweitdurchgang zu einer Brechung und damit zu einer Parallelverschiebung des Laserstrahls. Um diesen Effekt zu umgehen, ist eine orthogonale Ausrichtung des Lasertriangulationssensors herzustellen.

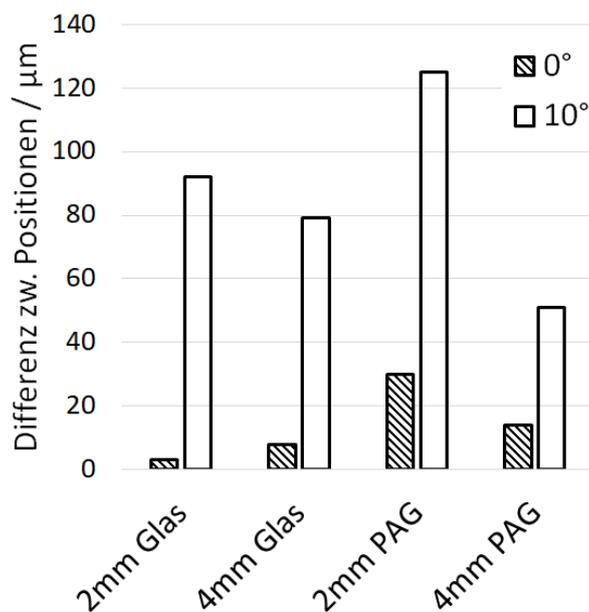


Abbildung 3.21: Einfluss des Messwinkels im Glasdurchgang. Dargestellt sind die jeweiligen Differenzen zwischen den Messwerten von Position 1 und 2. Niedrige Werte bedeuten eine geringe Abhängigkeit der Messdistanz zum Winkel

### 3.4.5 Einfluss von Verschmutzung

#### Verschmutzung der Optik

Da es sich bei der Lasertriangulation um ein optisches Messverfahren handelt, können Verschmutzungen im Strahlengang problematisch sein. Dies wird experimentell untersucht. Hierzu werden die Sensoren im Realbetrieb getestet. So wird ermittelt, nach wie vielen

Zyklen keine sichere Messung mehr durchgeführt werden kann und eine Reinigung durchzuführen ist. Es zeigt sich, dass eine Reinigung des Fensters der Filterkammer nach jedem zehnten Zyklus aus Filtration und Regenerierung durchzuführen ist. Wird diese Reinigung nicht regelmäßig manuell oder automatisiert durchgeführt, steigt die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen des Messsystems. Die Ausfälle äußern sich darin, dass das Messsystem einen konstanten Fehlerwert ausgibt. Zu Beginn des Ausfalls sind zum Teil nicht realistische Messwerte zwischen den Fehlmessungen vorhanden. Steigt der Verschmutzungsgrad weiter, generiert das Messsystem keinerlei Werte mehr, da die empfangene Lichtintensität am Empfänger des Lasertriangulationssensors zu gering ist.

### **Verschmutzung des Referenzmessobjekts**

Kommt es zu einer Verschmutzung des Referenzmessobjekts während des Filtrationsvorgangs, verringert sich die Messgenauigkeit des Messsystems, da sich der Referenzpunkt verschiebt und somit die Position der Filteroberfläche unbestimmt ist. Tritt eine Verschmutzung des Referenzmessobjekts während der Regenerierung auf, ist dies für die Messung der Staubkuchendicke nicht relevant, da diese immer nur den Zuwachs nach der Regenerierung misst. Eine Verschmutzung des Referenzmessobjekts kann im Wesentlichen durch die folgenden Faktoren auftreten:

- Luftdurchlässigkeit des Referenzmessobjekts
- Abscheidung von Partikeln infolge hoher Trägheit
- Elektrostatische Anziehung von Partikeln

Auf die einzelnen Punkte wird im Folgenden detailliert eingegangen.

### **Luftdurchlässigkeit des Referenzmessobjekts**

Eine Durchströmung des Referenzobjekts führt dazu, dass die mit der Strömung transportierten Partikeln am Referenzobjekt bzw. am darunterliegenden Filtermedium abgeschieden werden. So kommt es bei der Nutzung des Tapes zunächst zu einer Einlagerung von Partikeln im grobmaschigen Tape. Im Verlauf bildet sich ein ausgeprägter Staubkuchen auf dem Tape, welcher durch die grobe Struktur die Regenerierung nahezu schadlos übersteht. Es zeigt sich, dass die Messergebnisse mit einem frischen Tape den Erwartungen entsprechen, diese aber mit zunehmender Versuchszeit von den erwarteten Werten abweichen. Dies zeugt von der Degradation des verwendeten Referenzmessobjekts. Bei der Nutzung von Gewebeklebeband zeigt sich keine derartige Degradation. Die Messergebnisse sind auf einem konstanten Niveau (vgl. Abbildung 5.11 und 5.12 in Abschnitt 5.8.4).

## Abscheidung von Partikeln infolge hoher Trägheit

Die Trägheit der Partikeln bestimmt, wie schnell diese auf Richtungsänderungen der Strömung des Transportfluids folgen.

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3.12)$$

Eine hohe Trägheit besitzen damit vor allem große Partikeln. Bei diesen kann es somit vorkommen, dass sie nicht der Hauptströmungsrichtung um das Referenzmessobjekt herum folgen, sondern auf dieses auftreffen und dort abgeschieden werden. Zur genaueren Untersuchung der Verschmutzungsneigung des Referenzmessobjekts wird ein mathematisches Modell erstellt. Dieses wird im Abschnitt 3.5 ausführlich beschrieben.

## Elektrostatische Anziehung von Partikeln

Eine weitere mögliche Ursache für die Abscheidung von Partikeln am Referenzmessobjekt ist die elektrostatische Anziehung. Tritt eine Partikel in ein elektrisches Feld ein, kommt es aufgrund der Ladung der Partikel zu einer Anziehung/Abstoßung. Auch Partikeln ohne Ladung werden aufgrund der Eigenpolarisation von einem elektrischen Feld abgelenkt. Besitzen Referenzmessobjekt und Partikel gegensätzliche Ladung, wird die Partikel vom Referenzmessobjekt angezogen und kann dort abgeschieden werden. Da auch über einen mehrstündigen Versuchszeitraum keine Abscheidung von Partikeln am Referenzmessobjekt beobachtet werden kann, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt nicht signifikant auftritt. Werden allerdings geladene Partikeln verwendet oder ist das Filtermedium geladen, muss gegebenenfalls für einen Ladungsausgleich zwischen Filtermedium und Referenzmessobjekt gesorgt werden.

## Auswertung mithilfe von Mikroskopie

Die Nutzung eines leistungsstarken Digitalmikroskops ermöglicht es, den Grad der Verschmutzung auf dem Referenzmessobjekt zu erfassen. Abbildung 3.22 zeigt die Mikroskopaufnahme eines im Versuch genutzten Filters. Der schwarze Bereich ist das Referenzmessobjekt, auf welchem sich wenige Partikeln befinden. Im linken Bereich der Abbildung ist das Filtermedium inklusive des darauf befindlichen Staubkuchens dargestellt. Am Übergang zwischen beiden Bereichen ist eine Verdickung des Staubkuchens zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Partikeln, welche nicht im Bereich des Referenzmessobjekts abgeschieden werden, dieses umströmen und somit zu einer erhöhten Partikelabscheidung im Grenzgebiet zwischen freier Filteroberfläche und Referenzmessobjekt führen. Ähnliches Verhalten beschreibt Bach [44] bei der Untersuchung von Partikelströmungen durch Lecks in Filtern.

Die auf der Oberfläche des Referenzmessobjekts abgeschiedenen Partikeln sind in sehr geringer Konzentration vorhanden. Zum Teil stammen diese auch von der Demontage des Filters nach der Versuchsdurchführung. Ebenso führt die staubige Atmosphäre um den Teststand zu einer allgemeinen Kontaminierung mit Partikeln. Vergleichend sind in Abbildung 3.23 zwei Proben mit geringem und hohem Verschmutzungsgrad dargestellt. Die Verschmutzungsgrade werden als Flächenverhältnis von Partikeln zur Oberfläche definiert. So beträgt der geringe Verschmutzungsgrad in Abbildung 3.23 (links) 3,09 % und der hohe Verschmutzungsgrad (rechts) beträgt 43,02 %.

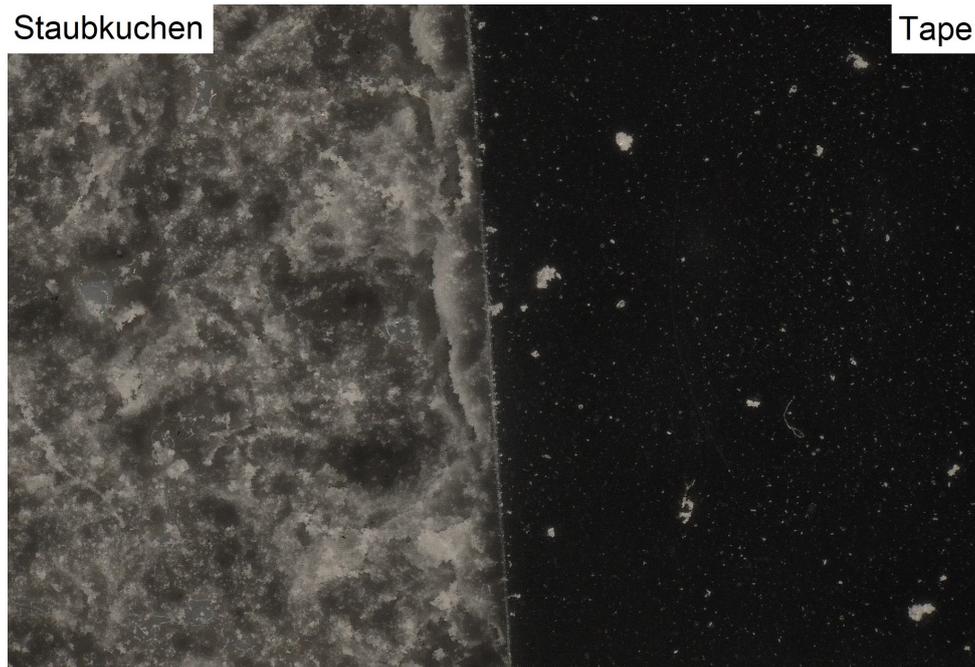


Abbildung 3.22: Mikroskopieaufnahme eines im Versuch genutzten Filters mit Tape als Referenzmessobjekt unter 50-facher Vergrößerung (Ausschnitt von  $6,5 \times 5 \text{ mm}^2$ )

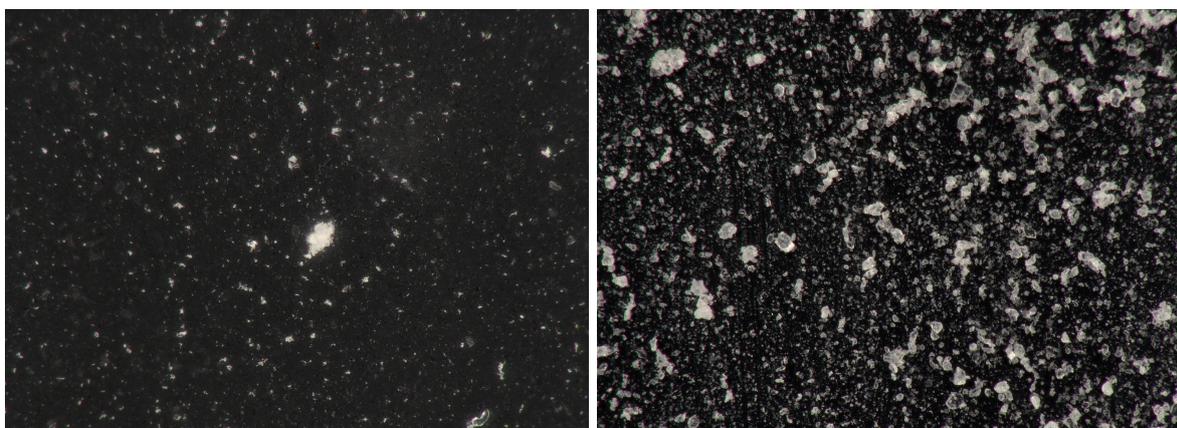


Abbildung 3.23: Verschiedene Verschmutzungsgrade des Referenzmessobjekts von 3,09 % (links) und 43,02 % (rechts) (Ausschnitt von jeweils  $1,65 \times 1,25 \text{ mm}^2$ )

### 3.4.6 Einfluss von Farbe und Material des Messobjekts

Es ist zu erwarten, dass die Messung von der Farbe und dem Material des Messobjekts beeinflusst wird, da die Messung unter anderem davon abhängig ist, mit welcher Lichtintensität der Laser empfangen wird. Zudem spielt die Oberflächenrauigkeit und damit einhergehende Reflexion bzw. Streuung eine Rolle. Hierfür wird in einer abgedunkelten Umgebung der Lasertriangulationssensor mit verschiedenen Materialien und Farben getestet. Über die Steuerungseinheit des Lasertriangulationssystems wird die empfangene Lichtintensität ermittelt.

Tabelle 3.7: Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Materialien und Farben von Messobjekten

Material	Farbe	Lichtintensität
Tape	Blau	71 %
Tape	Magenta	100 %
Tape	Beige	100 %
Gewebeklebeband	Schwarz	95 %
Gewebeklebeband	Silber	100 %
Aluminium	Silber (matt)	100 %
Filter	weiß (unbeladen)	100 %
Filter	weiß (beladen)	100 %

Es zeigt sich, dass dunkle, raue Oberflächen viel Licht absorbieren bzw. streuen (vgl. Tabelle 3.7). Dies führt zu einer verminderten Lichtintensität am Empfänger des Lasertriangulationssensors. Bei zu geringer empfangener Lichtintensität schlägt die Messung mittels Lasertriangulation fehl. Insbesondere das blaue Tape ist in diesem Fall als Referenzmessobjekt ungeeignet. Dunkle Stäube können entsprechend auch zu Fehlmessungen führen. Der verwendete APYRAL-Staub hingegen weist sehr gute Eigenschaften für die Lasertriangulationsmessung auf. Auffällig ist, dass sich bei rauen Oberflächen das Spektrum des empfangenen Lichts aufweitet. Dies beeinträchtigt die Messung allerdings nicht.

### 3.4.7 Referenzmessobjekt

Wie im späteren Abschnitt 5.6.4 beschrieben, reicht eine Einfachmessung mit einem Lasertriangulationssensor nicht aus, um ein ausreichend genaues Messergebnis zu erzielen. Aus diesem Grund wird ein Differenzmessverfahren, bestehend aus zwei Lasertriangulationssensoren verwendet. Dabei misst einer der Sensoren den Abstand zur Oberfläche des Filtermediums, respektive des Staubkuchens. Der andere Sensor misst den Abstand zu einem Referenzmessobjekt, dessen Oberfläche einen gleichbleibenden Abstand zur Ober-

fläche des Filtermediums besitzt. Die Aufgabe des Referenzmessobjekts ist dabei, eine Oberfläche zu bieten, auf welcher der Laser sicher einen definierten Abstand zum Filtermedium messen kann. Zudem darf es keine zusätzliche Verformung des Filtermediums hervorrufen sowie die Anströmung und Filtration an der benachbarten Messstelle nicht beeinflussen. Hierzu werden drei verschiedene Ansätze untersucht. Ob ein Referenzmessobjekt geeignet ist, wird maßgeblich von dessen Messgenauigkeit bestimmt. Diese wird dahingehend überprüft, dass im staublosen Betrieb durch Modulieren des Volumenstroms eine schrittweise Erhöhung des Differenzdrucks erzeugt wird. In der theoretischen Betrachtung bleibt der Abstand zwischen Filtermedium und Referenzmessobjekt gleich und die Differenzmessung gibt einen Wert von konstant null aus. Die Beeinflussung der Filtration und Anströmung der benachbarten Messposition, sowie die induzierte Verformung werden durch theoretische Überlegungen betrachtet.

### Ansatz 1: 3D-Druckteil

Dieses Referenzmessobjekt ist der erste Ansatz. Es wird in axialer Richtung an zwei Punkten am Filtermedium angebracht und besitzt eine Messfläche am unteren Ende (Abbildung 3.24).

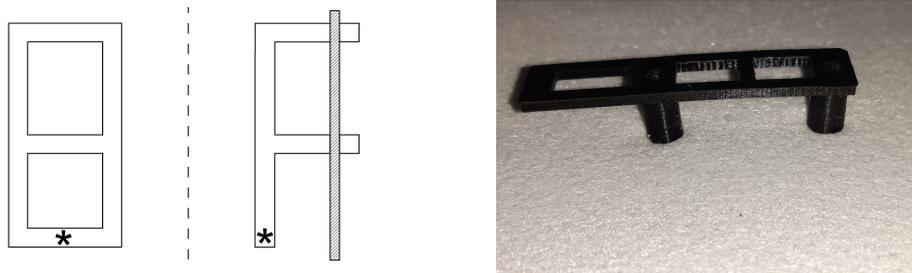


Abbildung 3.24: Ansatz 1) 3D-gedruckte Struktur, welche an zwei Punkten am Filtermedium befestigt ist (\* - Messpunkt; Länge des Referenzmessobjekts beträgt 4 cm)

Wegen des Aufbaus wird die Strömung an der eigentlichen Messstelle kaum beeinträchtigt, da in unmittelbarer Entfernung lediglich der Messsteg des Referenzmessobjekts in die Strömung ragt. Aufgrund der Fertigung mittels 3D-Druck aus Polylactide (PLA), kann dieses Bauteil größtenteils hohl gefertigt und damit sehr leicht ausgeführt werden. Dies verringert die Verformung des Filtermediums. Aufgrund der Verschraubung an zwei Stellen ist die Verformung des Filtermediums trotzdem problematisch, da eine Kontraktion des Filtermediums beim Beaufschlagen mit einem Differenzdruck zu einer Verformung des Referenzmessobjekts führen kann. Ein weiterer Punkt ist, dass durch regelmäßige Kontraktion und Expansion des Filtermediums, Kräfte durch die feste Verschraubung des Referenzmessobjekts induziert werden, welche zu einer Schwächung des Filtermediums bis hin zur lokalen Zerstörung führen können. Bezüglich der Messgenauigkeit hat die

experimentelle Untersuchung ergeben, dass es zu erhöhten Messabweichungen kommt. Erklärt werden kann dies durch eine Verformung des Referenzmessobjekts bei zunehmendem Differenzdruck und damit einer Verschiebung des Referenzmesspunkts (siehe Abbildung 3.25).

Hinsichtlich der Beeinflussung von Anströmung und Filtration ist dieser Ansatz als geeignet zu bewerten, wird jedoch aufgrund der hohen Messgenauigkeit verworfen. Zudem ist die Montage sehr aufwendig und das Filtermedium muss lokal beschädigt werden.

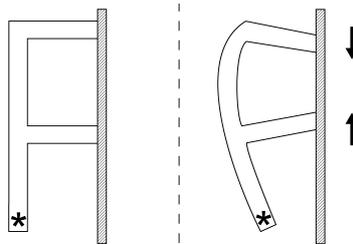


Abbildung 3.25: Verbiegung des Referenzmessobjekts und dadurch entstehende Verschiebung des Referenzpunkts (\* - Messpunkt)

## Ansatz 2: Zylinder

Bei diesem Entwurf wird ein Zylinder verwendet, welcher in der Mitte geteilt ist. An der Teilung befindet sich das Filtermedium (Abbildung 3.26). Beide Teile des Zylinders besitzen die gleichen Abmessungen um zu verhindern, dass über einen aus der Mitte verlagerten Schwerpunkt ein Drehmoment auf das Filtermedium wirkt, welches zu einer Verformung des Filtermediums führt. Der Probezylinder ist aus Aluminium gefertigt - gegebenenfalls ist auch eine Fertigung mittels 3D-Drucks und damit weitere Gewichtsreduzierung möglich. Eine Beeinflussung der lokalen Strömungsverhältnisse ist als gering zu bewerten. Jedoch besteht hinsichtlich der Messgenauigkeit die gleiche Problematik wie bei Ansatz 1. Aufgrund von Verformungen des Filtermediums entsteht eine potenzielle Verschiebung des Referenzpunkts. Zudem ist die Montage, wie auch bei Ansatz 1, sehr aufwendig und das Filtermedium muss lokal beschädigt werden.

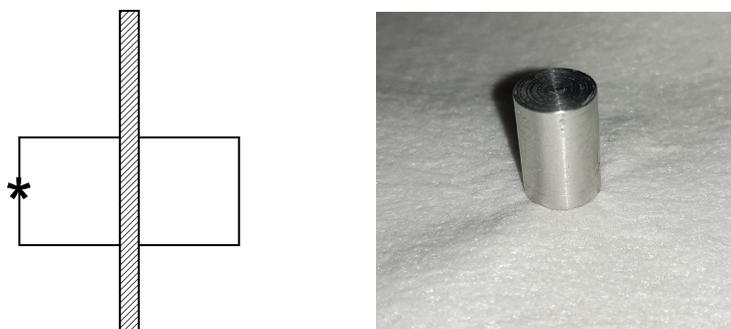


Abbildung 3.26: Ansatz 2) Zylinderhälften innerhalb und außerhalb des Filtermediums (\* - Messpunkt) und am Filtermedium angebrachtes Referenzmessobjekt (Zylinderdurchmesser 10 mm)

### Ansatz 3: Tape

Als dritter Ansatz wird das Aufbringen eines dünn-schichtigen Körpers (Tape) auf das Filtermedium untersucht (Abbildung 3.27). Der Ansatz des Tapes basiert darauf, dass dieses nicht durchströmt wird und sich aufgrund dessen kein Staub an dessen Oberfläche abscheidet. Zudem beeinflusst das Tape die Filtration und Strömung in der Umgebung nur marginal und ist flexibel, sodass es zu keiner Beeinträchtigung der Verformung kommt und keine zusätzliche Verformung induziert wird. Das Tape kann zudem einen tangential großen Bereich umfassen, was die benötigte Exaktheit der Ausrichtung von Filter und Messsensoren verringert. So ist dieses System weniger anfällig gegen die üblicherweise vorkommenden Bewegungen des Filterschlauchs im Betrieb. Die Ergebnisse der beladungslosen Messung zeigen, dass die Differenzmessung einen konstanten Wert ausgibt. Als Tape zeigen sich Gewebeklebeband sowie eingefärbte Kunststoffolie als geeignet. Untersuchungen zur Nutzung von Kinesiologie-Tapes zeigen, dass diese aufgrund ihrer hohen Luftdurchlässigkeit ungeeignet sind. Während die ersten Messungen nach Montage des Kinesiologie-Tapes sehr gute Ergebnisse liefern, werden diese mit der Zeit deutlich schlechter, da es zu massiven Staubabscheidungen am Tape kommt. Abbildung 3.28 zeigt einen Filter mit Tape als Referenzmessobjekt.

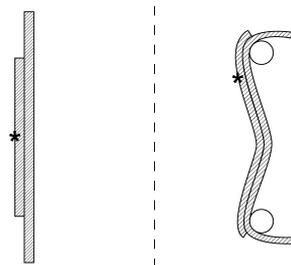


Abbildung 3.27: Ansatz 3) Tape, welches rohgasseitig auf das Filtermedium aufgeklebt wird (\* - Messpunkt)

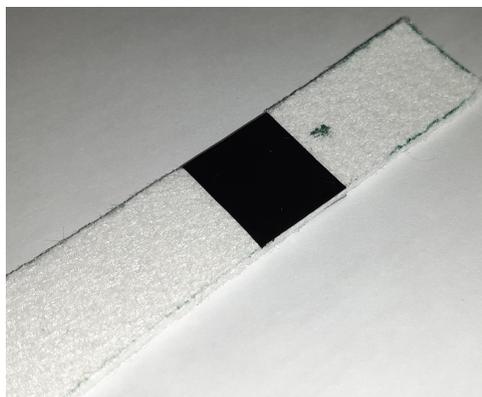


Abbildung 3.28: Filterstreifen mit Tape als Referenzmessobjekt (Breite des Filterstreifens 20 mm)

## Vergleich und Bewertung

Von den drei untersuchten Referenzmessobjekten sticht vor allem das Tape positiv hervor. Sowohl der Zylinder, als auch das 3D-Druckteil können nicht in der Nähe der Stützkorbstäbe eingesetzt werden, da durch die dort entstehende Verformung des Filtermediums eine Veränderung des Abstands zwischen Referenzmessobjekt und der Oberfläche des Filtermediums einhergeht (Abbildung 3.29). Da die Untersuchung der Messposition allerdings für eben jene Position c), nahe der axialen Stützkorbdrähte, die besten Ergebnisse ergeben hat, scheiden beide Referenzmessobjekte aus. Ebenso besitzen beide den Nachteil der aufwendigen Montage. Das Tape wiederum kann bei der Fertigung einfach auf den Filter an beliebiger Stelle aufgebracht werden und birgt nicht die Gefahr der lokalen Zerstörung des Filtermediums.

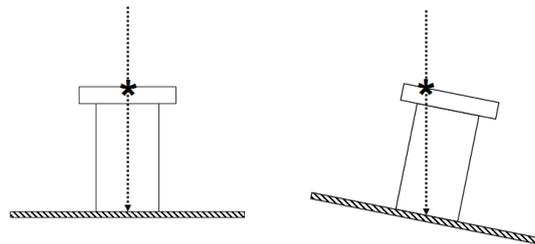


Abbildung 3.29: Abstandsveränderung infolge der Verformung des Filtermediums (\* - Messpunkt)

## 3.5 Modell zur Verschmutzungsabschätzung

### 3.5.1 Ziel der Modellierung

Wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben, führt eine Verschmutzung des Referenzmessobjekts zu einem Messfehler. Um den Grad der Verschmutzung abzuschätzen und ideale Abmessungen für das Referenzmessobjekt zu bestimmen, wird eine Modellrechnung durchgeführt. Ähnliche Berechnungen finden üblicherweise bei der Untersuchung von Impaktoren Anwendung. Entsprechend finden sich zahlreiche Literaturquellen zu diesem Themengebiet, hier seien stellvertretend [45], [46], [47] und [48] genannt.

Das Modell beinhaltet im Wesentlichen die Strömungsberechnung sowie die Partikelbewegung.

### 3.5.2 Strömungsfeld

Die Strömung wird üblicherweise numerisch durch Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen berechnet (vgl. Abschnitt 2.2.2). Hier wird hingegen ein Ansatz verwendet, welcher auf der Potentialtheorie basiert und eine analytische Lösung des Strömungsfelds ermöglicht.

Geeignet dafür ist der Ansatz nach [49], welcher die Gleichungen des Strömungsfelds für eine Staupunktströmung liefert. Die Stromlinien der Staupunktströmung, bei der die Strömung senkrecht auf eine Wand trifft, sind in Abbildung 3.30 dargestellt.

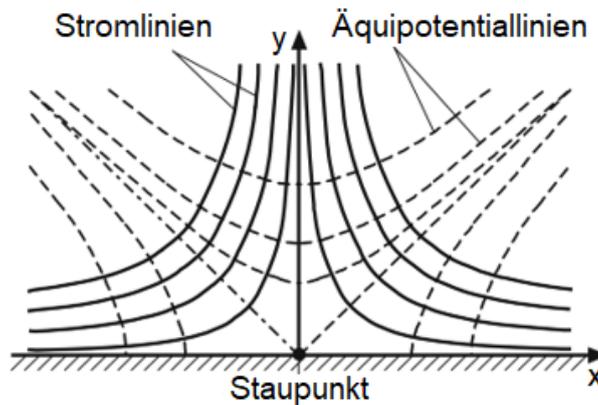


Abbildung 3.30: Strom- und Äquipotentiallinien einer ebenen Staupunktströmung [49]

Es gelten die folgenden Gleichungen:

$$v_x = 2 \cdot a \cdot x \quad (3.13)$$

$$v_y = -2 \cdot a \cdot y \quad (3.14)$$

Mit: Koeffizient  $a$

Der Druck ist über einen Bernoulli-Ansatz zu bestimmen:

$$p = p_\infty - 2 \cdot \rho_F \cdot a^2 \cdot (x^2 + y^2) \quad (3.15)$$

Um den Koeffizienten  $a$  zu bestimmen ist eine Randbedingung notwendig. Hierfür existieren verschiedene Möglichkeiten. Für den beschriebenen Fall wird als Randbedingung die Filterflächenbelastung in einer Entfernung von einem Meter verwendet. Bei der Geschwindigkeit von  $2 \text{ m}/\text{min}$  entspricht dies der Geschwindigkeit im Unendlichen. Somit ist der Koeffizient  $a$  bestimmt.

$$a = -\frac{v_y}{2 \cdot y} = -\frac{-2 \text{ m}/\text{min}}{2 \cdot 1 \text{ m}} = 0,0167 \text{ s}^{-1} \quad (3.16)$$

### 3.5.3 Partikelbahn

Die Bewegung der Partikeln in der Strömung wird über einen Lagrange-Ansatz modelliert. Hierbei werden die auf eine Partikel wirkenden Kräfte bilanziert und daraus eine Bewegungsänderung zeitdiskret berechnet.

Das Modell beinhaltet die folgenden Effekte:

- Trägheitskraft
- Kraft aufgrund von Druckgradienten
- Widerstandskraft
- Liftkraft nach Saffmann

### **Trägheitskraft**

Die Trägheit der Partikeln gehorcht dem ersten Newton'schen Axiom, welches besagt [50]:

„Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.“

„Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, sofern er nicht durch einwirkende Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.“

Entsprechend verfolgt eine Partikel eine geradlinige Bahn, solange die Summe der auf die Partikel wirkenden Kräfte Null ergibt. Es gilt die Formel:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \tag{3.17}$$

Mit: Beschleunigung  $a$

Die in der Berechnung auftretenden Trägheitskräfte bewegen sich in der Größenordnung  $10^{-9}$  N (für einen Partikeldurchmesser von  $100 \mu\text{m}$ ).

### **Kraft aufgrund von Druckgradienten**

Bei einer inhomogenen Druckverteilung, welche bei der Staupunktströmung vorherrscht, kommt es zu Druckgradienten, welche eine Kraft auf die Partikel bewirken. Beschrieben wird der Effekt durch:

$$\vec{F}_{Druck} = -\frac{\pi}{6} \cdot D_P^3 \cdot \vec{\nabla} p \tag{3.18}$$

Die in der Berechnung auftretenden Druckkräfte bewegen sich in der Größenordnung  $10^{-18}$  N (für einen Partikeldurchmesser von  $100 \mu\text{m}$ ).

## Widerstandskraft

Die Widerstandskraft ergibt sich aus der Relativbewegung zwischen Partikel und Fluid. Beschrieben wird die Kraft durch:

$$\vec{F}_W = c_W \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_P^2 \cdot |\vec{v}_{Rel}| \cdot \vec{v}_{Rel} \quad (3.19)$$

Eine maßgebliche Größe ist dabei der Widerstandsbeiwert  $c_W$ . Dieser ist sowohl von der Form der Partikel, als auch von der vorherrschenden Reynoldszahl abhängig.

Für kugelförmige Partikeln gilt bei geringen Reynoldszahlen [51]:

$$c_W = \frac{24}{Re} \quad (3.20)$$

Die in der Berechnung auftretenden Widerstandskräfte bewegen sich in der Größenordnung  $10^{-12}$  N (für einen Partikeldurchmesser von  $100 \mu\text{m}$ ).

## Liftkraft nach Saffmann

Befindet sich eine Partikel in einer Scherströmung, erfährt sie nach Saffmann eine Auftriebskraft senkrecht zu ihrer Geschwindigkeit [52]. Die Formel zur Berechnung der Liftkraft nach Saffmann lautet:

$$\vec{F}_{Saff} = 1,615 \cdot D_P^2 \cdot \sqrt{\rho_F \cdot \eta_F} \frac{1}{\sqrt{|\vec{\gamma}_F|}} \cdot (\vec{\gamma}_F \times (\vec{v}_F - \vec{v}_P)) \quad (3.21)$$

Die in der Berechnung auftretenden Liftkräfte bewegen sich in der Größenordnung  $10^{-18}$  N (für einen Partikeldurchmesser von  $100 \mu\text{m}$ ).

Zusätzlich existieren noch Kräfte, welche aufgrund der Randbedingungen zu vernachlässigen sind:

- Basset-History-Kraft
- Kraft durch virtuelle Masse
- Magnuskraft
- Schwerkraft

## Basset-History-Kraft

Nach Basset [53] existiert eine Kraft, welche auf eine Partikel wirkt, wenn sich der Strömungswiderstand infolge einer Beschleunigung ändert. Sie ist vernachlässigbar, wenn sich die Werte der Dichte der Partikeln und des Fluids deutlich unterscheiden [54]. Dies ist bei der untersuchten Gas-Feststoff-Strömung zutreffend. Somit wird die Basset-History-Kraft nicht in das Modell aufgenommen.

## Kraft durch virtuelle Masse

Erfährt eine Partikel eine Beschleunigung, wird ein Teil des die Partikel umgebenden Fluids mitbeschleunigt. Dies bewirkt eine Krafteinwirkung auf die Partikel. Ebenso wie die Basset-History-Kraft, kann die Kraft durch virtuelle Masse im Fall der Gas-Feststoff-Strömung vernachlässigt werden [54].

## Magnuskraft

Der Magnuseffekt beschreibt eine Querkraft, welche auf einen rotierenden, umströmten Körper wirkt [55]. Im vorgestellten Modell werden keine rotatorischen Freiheitsgrade der Partikeln zugelassen. Entsprechend bleibt der Magnuseffekt unberücksichtigt.

## Schwerkraft

Ist eine Partikel der Erdgravitation ausgesetzt, erfährt sie eine Kraft in Richtung der Erdbeschleunigung. Entscheidend für den Einfluss der Gravitation ist ihre Richtung in Bezug auf die Bewegung der Partikel. Da die Lage der Staupunktströmung unbestimmt ist und das Strömungsfeld unter Vernachlässigung der Schwerkraft bestimmt ist, bleibt die Schwerkraft im Modell unberücksichtigt. Die Schwerkraft ist über die Gleichung 3.22 zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Materialparameter der verwendeten Partikeln ergibt sich ein Einfluss in der Größenordnung  $10^{-8}$  N (für einen Partikeldurchmesser von  $100 \mu\text{m}$ ).

$$\vec{F}_S = m_P \cdot \vec{g} \quad (3.22)$$

### 3.5.4 Implementierung

Zur Berechnung der Gleichung wird das Programm MATLAB verwendet. Hier werden die Formeln hinterlegt und zeitdiskret berechnet. Die Partikelinjektionen werden an verschiedenen Positionen variiert um herauszufinden, an welchen Startpositionen Partikeln im Verlauf der Strömung abgeschieden werden. Der Programmablauf ist in Abbildung 3.31 in Form eines Programmablaufplans dargestellt.

### 3.5.5 Randbedingungen

Die für die Lösung der Gleichungen notwendigen Randbedingungen sind die Partikelgröße, die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Parameter der Partikelinjektion.

#### Partikelgröße

Mit steigender Partikelgröße steigt vor allem der Einfluss der Trägheit. Große Partikeln sind dabei besonders kritisch, da ihre hohe Trägheit zu einer hohen Verschmutzungsnei-

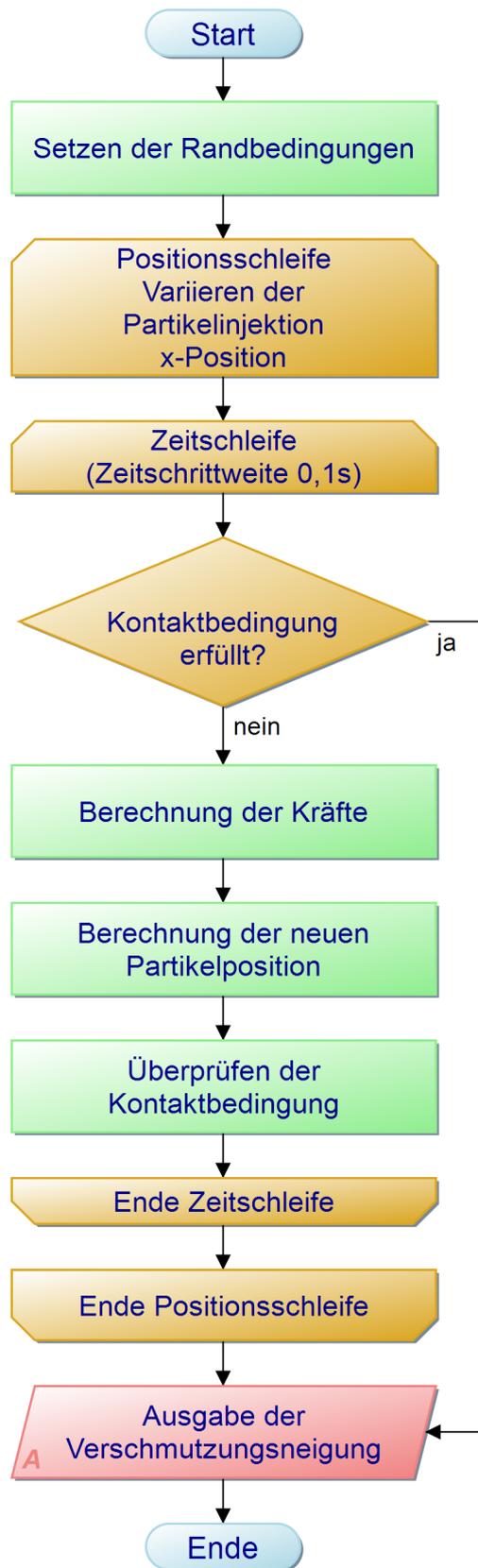


Abbildung 3.31: Programmablaufplan des erstellten Modells

gung führt. Daher ist die Analyse besonders großer Partikeln indiziert und es werden die maximalen Partikeldurchmesser des verwendeten Staubs untersucht. Die größten Partikeln besitzen einen Durchmesser von ca.  $100\ \mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 5.2). Zudem wird die Berechnung für zwei weitere Partikelgrößen durchgeführt. Hierfür werden weitere Partikeldurchmesser von  $10\ \mu\text{m}$  bis  $100\ \mu\text{m}$  gewählt, wobei die Schrittweite bei  $10\ \mu\text{m}$  liegt.

### **Strömungsgeschwindigkeit**

Die Strömungsgeschwindigkeit ist für die Berechnung der Stromlinien relevant. Außerdem wird der Widerstandsbeiwert der Partikel mithilfe der Reynoldszahl berechnet, welche eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit ist. Es wird die Filterflächenbelastung des Prüfstands mit  $2\ \text{m}^3/\text{min}$  gewählt und in einem Abstand von einem Meter zur Filteroberfläche als Randbedingung definiert. Die Entfernung liegt, bezogen auf die sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeit, im Unendlichen. Um dies zu überprüfen, wird die Entfernung zwischen Randbedingung und Filtermedium variiert. Es zeigen sich sehr niedrige Residuen der Partikelbahn von unter  $0,1\ \mu\text{m}$ .

### **Breite des Referenzmessobjekts**

Die Breite des Referenzmessobjekts ist gleichzeitig Untersuchungsgegenstand und Randbedingung. Aufgrund von praktischen Erwägungen, wird eine Breite des Referenzmessobjekts von mindestens  $10\ \text{mm}$  gewählt. Durch die Bewegung des Filterschlauchs im Betrieb der Anlage verschiebt sich das Referenzmessobjekt ebenfalls. Somit besteht die Möglichkeit, dass der Messpunkt nicht mehr auf dem Referenzmessobjekt liegt und damit Messfehler entstehen. Eine zu große Breite des Referenzmessobjekts führt zu einem erhöhten Druckverlust der Anlage, vor allem wenn an mehreren Stellen Referenzmessobjekte installiert werden. Der Einfluss der Breite ist für das Modell vor allem hinsichtlich der Abbruchbedingung relevant. Befindet sich eine Partikel außerhalb des Referenzmessobjekts, ist eine Abscheidung irrelevant und die Berechnung wird abgebrochen. Die Tapebreite wird in einem Bereich von  $10\ \text{mm}$  bis  $50\ \text{mm}$  variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.33 dargestellt.

### **Initiale Partikelgeschwindigkeit**

Die Partikeln werden in einem Abstand von einem Meter zur Filteroberfläche injiziert. Ihre Geschwindigkeit gleicht in Richtung und Betrag der des Transportgases. Diese Annahme wird getroffen, da im Modell die Partikeln, mithilfe einer homogenen Strömung, aus dem Unendlichen zum Filter strömen.

## Position der Partikelinjektion

Die Partikeln werden, wie zuvor beschrieben, in einem Abstand zur Filteroberfläche von 1 m in die Strömung eingebracht. Der Abstand zur Mittelebene des Referenzmessobjekts wird als Parameter variiert, da über diesen Wert geprüft wird, welcher Anteil der Gesamtanströmung auf das Referenzmessobjekt an diesem abgeschieden wird. Der maximale Wert ist die halbe Breite des Referenzmessobjekts, der minimale Wert ist Null (Injektion auf der Mittelebene). Der Parameter wird variiert, bis der maximale Abstand zur Mittelebene gefunden ist, an dem es noch zu einer Abscheidung auf dem Referenzmessobjekt kommt. Dabei wird bis zu einer Genauigkeit von  $2\ \mu\text{m}$  iteriert. Dies entspricht einem Residuum der Verschmutzungsneigung von 0,01 ppm bei der Breite des Referenzmessobjekts von 10 mm.

## Materialwerte

Hinsichtlich der Materialwerte sind die in Tabelle 3.8 angegebenen Größen für die Berechnung relevant.

Tabelle 3.8: Relevante Materialwerte zur Modellierung der Verschmutzungsneigung des Referenzmessobjekts

Größe	Wert
Partikeldichte	$2.400\ \text{kg}/\text{m}^3$
Luftdichte [49]	$1,2\ \text{kg}/\text{m}^3$
dynamische Viskosität der Luft [49]	$18,2\ \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$

## Partikelabscheidung

Damit eine Partikel am Tape abgeschieden wird, sind zwei Bedingungen zu erfüllen, Kontaktbedingung und Haftbedingung. Zwar kann eine Partikel mit der Oberfläche des Tapes in Kontakt kommen, jedoch wird diese dabei nicht zwangsläufig abgeschieden, sondern kann abprallen und die Bewegung fortsetzen.

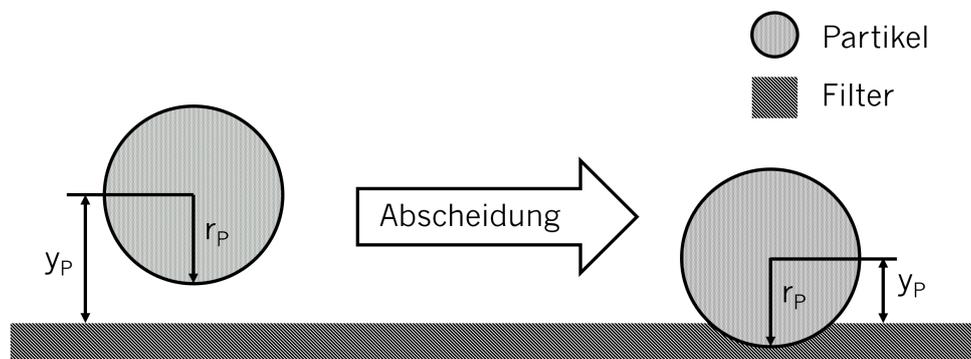


Abbildung 3.32: Modellierung der Abscheidung einer Partikel am Tape

Ziel des Modells ist es, den Worst Case der Verschmutzung des Tapes zu untersuchen. Aus diesem Grund gilt die Haftbedingung immer als erfüllt. Kommt es zu einem Kontakt zwischen Partikel und Tape, gilt die Partikel als abgeschieden. Die Bedingung lautet  $y_P < r_P$  (vgl. Abbildung 3.32). Gleiche Ansätze werden beispielsweise in [4] genutzt.

### 3.5.6 Ergebnisse

Es zeigt sich, dass aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit im Nahbereich des Filters nur sehr wenige Partikeln abgeschieden werden. Partikeln auf einer Startposition genau mittig des Referenzmessobjekts müssen, zumindest in dem hier vorgestellten Modell, zwangsläufig abgeschieden werden, da deren Stromlinie eine Gerade ist, welche exakt orthogonal zum Referenzmessobjekt verläuft. Somit wirken keine Kraftkomponenten auf die Partikeln, welche sie von der geradlinigen Bahn zwingen. Zur Auswertung der Anfälligkeit einer Geometrie gegenüber Partikelabscheidung wird die Verschmutzungsneigung definiert. Es werden zwei Längen zueinander ins Verhältnis gesetzt, der Bereich, in dem ankommende Partikeln im Verlauf abgeschieden werden ( $s_{ab}$ ) und die Gesamtbreite des Referenzmessobjekts ( $s_{ges}$ ). Da die Berechnung des Staupunkts auf einem ebenen Ansatz basiert, ist die Verschmutzungsneigung basierend auf Kreisflächen zu berechnen. Damit werden die im Modell berechneten Abstände  $s_{ab}$  und  $s_{ges}$  quadriert.

$$VN = \frac{s_{ab}^2}{s_{ges}^2} \quad (3.23)$$

Mit: Verschmutzungsneigung  $VN$

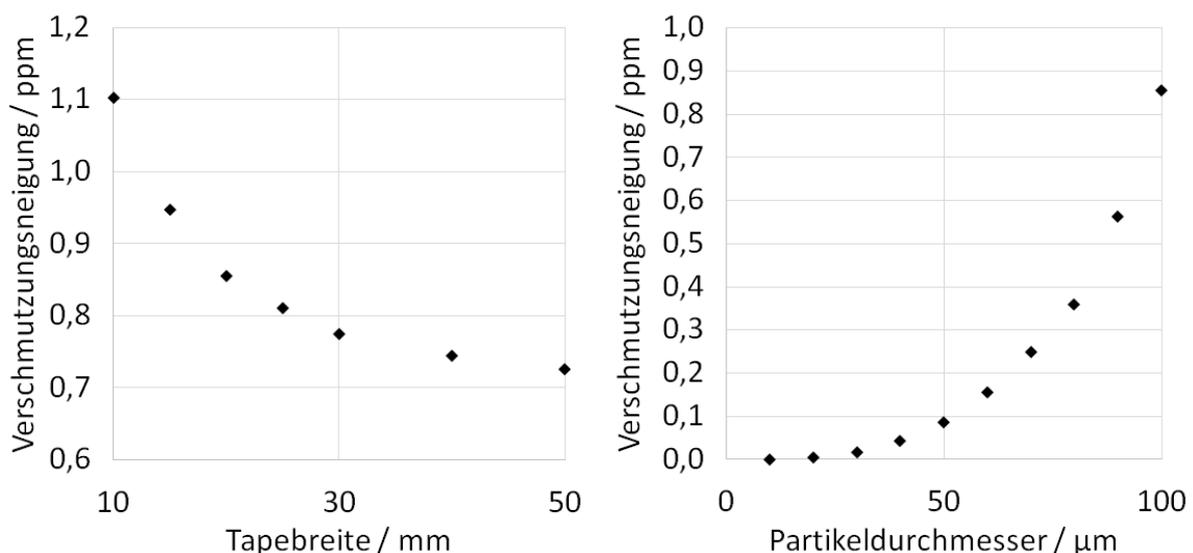


Abbildung 3.33: Funktionen der Verschmutzungsneigung in Abhängigkeit von Tapebreite und Partikeldurchmesser

Über die Variation der Parameter kann die Verschmutzungsneigung als Funktion von Partikeldurchmesser und Tapebreite dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.33). Eine höhere Tapebreite führt zu einer verringerten Verschmutzungsneigung, verringert jedoch auch die effektive Filteroberfläche. Wie bereits zuvor beschrieben, ist der maßgebliche Abscheidemechanismus am Tape die Trägheit. Diese These wird durch Abbildung 3.33 (rechts) gestützt, da die Verschmutzungsneigung mit zunehmendem Partikeldurchmesser ebenfalls zunimmt. Kleinere Partikeln folgen der Strömung um das Referenzmessobjekt herum während größere Partikeln aufgrund ihrer Trägheit abgeschieden werden.

Über die Verschmutzungsneigung lässt sich mithilfe des Rohgasvolumenstroms  $\dot{V}_{Roh}$  und der Partikelkonzentration  $c_{Roh}$  eine Aussage darüber treffen, welcher Partikelmassenstrom auf dem Referenzmessobjekt abgeschieden wird:

$$\dot{m}_P = \dot{V}_{Roh} \cdot c_{Roh} \cdot VN \quad (3.24)$$

### 3.6 Einflussnehmende Parameter

Nach den vorgestellten und durchgeführten Versuchsreihen lässt sich zusammenfassend aussagen, dass diverse Einflussfaktoren für die Lasertriangulationsmessung relevant sind. So ist beispielsweise die Messposition ein ausgesprochen wichtiger Parameter. Wird diese falsch gewählt, kommt es zu signifikanten Messfehlern aufgrund der unterschiedlichen Verformung der zwei Messpunkte des Differenzmessverfahrens. Zudem kann, wenn eine Messposition direkt auf einem Draht des Stützkorbs gewählt wird, die Messung verfälscht werden, da diese Stellen infolge der Verdeckung und daraus resultierender Nicht-Durchströmung nur eine sehr geringe Staubabscheidung aufweisen.

Ob die Messung durch eine zusätzliche Glasscheibe geschieht, ist in zweierlei Hinsicht relevant. So muss die durch die Brechung erzeugte Messabweichung beim Einstellen des Referenzmessbereichs berücksichtigt werden. Ebenso kann das Glas infolge von Staubablagerungen, wie sie vor allem bei der Regenerierung des Filters auftreten, verschmutzen. Die Verschmutzungen verhindern ab einem gewissen Grad die Messung, da die Lichtintensität des empfangenen Laserstrahls zu stark abgeschwächt wird. Die Verschmutzung des Referenzmessobjekts tritt bei der Wahl des richtigen Materials kaum auf. Eine sehr langsame Verschmutzung infolge der Exposition in staubiger Umgebung beeinflusst die Messungen kaum, da nach jeder Regenerierung die Messdifferenz auf null kalibriert wird. Die Wahl des passenden Referenzmessobjekts ist essentiell. Als geeignet stellt sich das Tape heraus. Die Oberfläche und Farbe des Messobjekts ist ebenfalls von großer Relevanz. Dunkle und raue Oberflächen absorbieren/streuen das Licht des Laserstrahls zu sehr und verhindern somit die Messung. Bei dunklen Stäuben ist daher eine vorherige Untersuchung der empfangenen Lichtintensität angeraten.

Bezüglich der Ausrichtung der Lasertriangulationssensoren ist festzuhalten, dass beide

Ausrichtungen Vor- und Nachteile haben. Die vertikale Ausrichtung wird weniger durch die Biegung des Filtermediums beeinflusst, während sich die horizontale Ausrichtung mit einem geringeren Abstand der beiden Messpunkte zueinander auszeichnet. Ein direkter Vorteil zu Gunsten einer der beiden Ausrichtungen lässt sich nicht ableiten.

### **3.7 Umsetzungskonzept für Filterteststände**

Basierend auf den vom Lasertriangulationsteststand gewonnenen Erkenntnissen wird ein Messkonzept zur Messung der Staubkuchendicke an einem weiteren Versuchsstand erstellt. Da es sich um einen Laborbetrieb der Anlage handelt, wird auf Automatisierung zu großen Teilen verzichtet. In der Anlage sind an verschiedenen Stellen der Filterkammer Fenster vorhanden. Diese Fenster werden genutzt, um die Lasertriangulationssensoren außerhalb der Filterkammer, und somit der staubigen Atmosphäre im Inneren, zu installieren. Die Fenster bestehen aus 4 mm dickem Polyacrylglas, welches eine Verschiebung des Messbereichs um ca. 1,4 mm erzeugt. Um Messfehler infolge von Verschmutzungen zu verhindern, wird in regelmäßigen Abständen eine Reinigung der Fenster vorgenommen.

Als Referenzmessobjekt hat sich das Gewebeklebeband bewährt. Dieses ermöglicht eine freie Verformung des Filtermediums, reflektiert den Laserstrahl ausreichend stark, ist luftundurchlässig und aufgrund des Farbkontrastes lassen sich eventuelle Staubabscheidungen gut erkennen. Da die Lasersensoren nicht positionsveränderlich montiert sind, muss vor der Montage des Referenzmessobjekts überprüft werden, an welcher Stelle dieses anzubringen ist. Als Messposition wird die Position c) (siehe Abbildung 3.14) gewählt. Die Ausrichtung wird vertikal gewählt.



# Kapitel 4

## Filterstreifenteststand

### 4.1 Ziel der Versuche

Dieses Kapitel behandelt die durchgeführten Untersuchungen an einem Filterstreifenteststand, welcher nach VDI 3926 [56] konstruiert und gebaut, sowie zur Anwendung der Lasertriangulationsmessung an einem Filterstreifen modifiziert ist. An diesem Teststand wird die Lasertriangulationsmessung unter vereinfachten Randbedingungen untersucht. Da die effektive Filterfläche aus einem schmalen Streifen besteht, sind nur sehr geringe Verformungen zu erwarten. Gleichzeitig sind diese weniger komplex als die an einem Filterschlauch, da das Filtermedium vollumfänglich durch den Probenhalter in Position gehalten wird. Die Lasertriangulation wird, im Gegensatz zu den Untersuchungen im vorherigen Kapitel, in staubbelasteter Umgebung eingesetzt und erste reale Abscheidevorgänge sowie die Bildung eines Staubkuchens untersucht. Ziel ist die Messung an zuvor unbenutzten Filterproben. Auf diese Weise wird untersucht, wie sich der initiale Staubkuchen auf einem Filtermedium ausbildet. Ebenso wird dadurch der Effekt einer Oberflächenbeschichtung, in diesem Fall einer ePTFE-Membrane, nachgewiesen.

### 4.2 Beschreibung des Versuchsstands

Der für die Messung verwendete Prüfstand entspricht den Vorgaben der VDI 3926 [56], wobei für die Anwendung der Lasertriangulationsmessung geringfügige Modifikationen notwendig sind, um die Messtechnik unter Beachtung des Messbereichs zu installieren. Der grundsätzliche Aufbau ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die in der Abbildung dargestellten Nummern entsprechen den in Tabelle 4.1 aufgeführten Komponenten.

Wie in Schlauchfilteranlagen, ist der Teststand in die zwei Bereiche Rohgasraum und Reingasraum geteilt. Getrennt sind diese durch das Filtermedium. Im Rohgasraum befindet sich eine hohe Partikelkonzentration des Prüfstaubs. Im Reingasraum befinden sich lediglich die Partikeln, welche den Filter durchdringen.

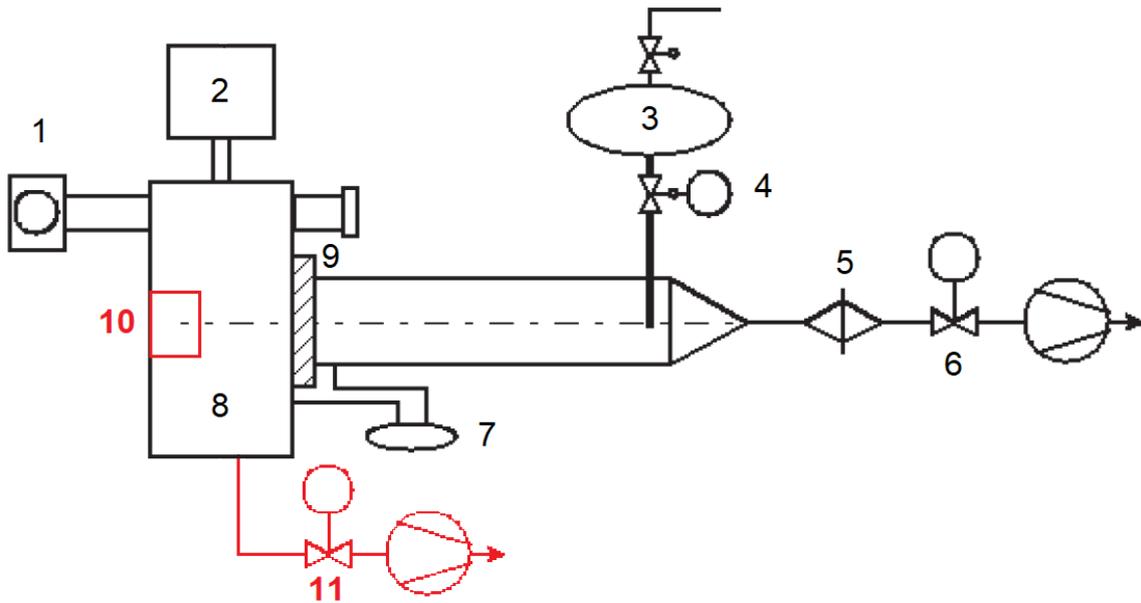


Abbildung 4.1: Aufbau des Teststands nach VDI 3926 mit in rot dargestellten Modifikationen (Abbildung in Anlehnung an [56])

Tabelle 4.1: Komponenten des Filterstreifenteststands (vgl. Abbildung 4.1)

- 1: photometrische Konzentrationsüberwachung
- 2: Staubdosierer
- 3: Drucklufttank
- 4: schnelles Membranventil
- 5: Absolutfilter zur gravimetrischen Reingasmessung
- 6: Durchflussmessung und -regelung (Reingas)
- 7: Differenzdruckaufnehmer
- 8: Rohgasraum
- 9: Prüffilterhalter mit Prüffilter
- 10: Lasertriangulationssensoren
- 11: Durchflussmessung und -regelung (Rohgas)

Die Partikeln werden durch einen Bürstendispergierer in das System eingebracht. Über eine Vakuumpumpe wird im Reingasraum ein Unterdruck erzeugt, welcher dazu führt, dass das Rohgas durch das Filtermedium strömt und die Partikeln des Rohgases am Filtermedium abgeschieden werden. Das Filtermedium besteht aus einem schmalen Streifen von  $20 \times 130 \text{ mm}^2$  und wird zwischen zwei Metallplatten gehalten. Durch einen Spalt von  $10 \times 120 \text{ mm}^2$  kann das Rohgas das Filtermedium durchströmen und Partikeln am oder im Filtermedium abgeschieden werden. Die Volumenströme im Roh- und Reingas werden über zwei Durchflussregler des Typs Aalborg GFC 571 (Rohgas) bzw. Aalborg GFC 371 (Reingas) gesteuert. Die Druckdifferenz wird über den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Differenzdrucksensor HENSCH HE 5409 gemessen.



Abbildung 4.2: Einbauten zur Montage der Lasertriangulationssensoren unter Berücksichtigung des zulässigen Messbereichs der Sensoren. Die Höhe der beiden Lasertriangulationssensoren (linke Abbildung) beträgt zusammen 70 mm, die Höhe der in die Filterkammer ragenden Box (rechte Abbildung) beträgt ca. 80 mm.

Für die Messung der Schichtdicke kommt ein System aus zwei Lasertriangulationssensoren KEYENCE LK-H087 zum Einsatz. Diese sind vertikal übereinander angeordnet. Einer der Sensoren vermisst direkt die Oberfläche des Filtermediums respektive des Staubkuchens. Der zweite Sensor misst auf einem Referenzpunkt, an welchem keine Partikeln abgeschieden werden. Somit entspricht die Differenz beider Sensoren der Dicke des Staubkuchens (vgl. Abbildung 3.12). Um den Messbereich der Lasertriangulationssensoren nicht zu überschreiten, sind Umbaumaßnahmen am Teststand notwendig. Dafür muss ein Teil der Querschnittsfläche des Rohgasraums gegenüber dem Prüffilter verkleinert werden. Die entsprechenden Einbauten sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Da der Prüffilter sehr schmal ist, ist eine genaue Ausrichtung der Sensoren erforderlich, um korrekte Messwerte zu generieren. Abbildung 4.3 zeigt die Messpunkte.

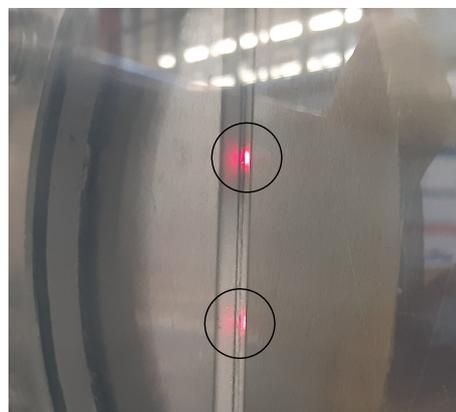


Abbildung 4.3: Messpositionen am Filterstreifenteststand (Abstand der Lasermesspunkte zueinander: 34 mm)

## 4.3 Betriebsparameter

### 4.3.1 Filtermedien

Das verwendete Filtermedium ist in Abschnitt 5.3.5 beschrieben. Abbildung 4.4 zeigt die Mikroskopieaufnahme der beiden Oberflächen des Filtermaterials. Die Außenseite ist mit einer ePTFE-Membrane beschichtet. Diese ist auf der Abbildung deutlich zu erkennen. Auf der Innenseite fehlt diese Beschichtung. Entsprechend sind die einzelnen Fasern des Nadelfilzes gut zu erkennen.

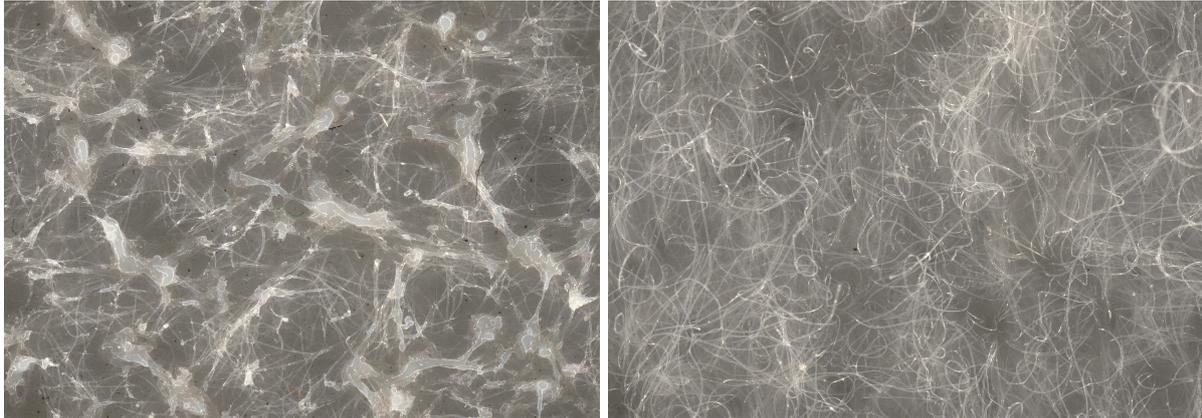


Abbildung 4.4: Filteroberfläche mit (links) und ohne (rechts) ePTFE-Membrane. Aufgenommen mit einem Digitallichtmikroskop mit einer 50-fachen Vergrößerung (Ausschnitt von jeweils  $6,5 \times 5 \text{ mm}^2$ )

### 4.3.2 Volumenströme

Nach VDI wird der Teststand mit zwei Vakuumpumpen betrieben. Eine der Pumpen ist für die Absaugung des Reingases und die andere für das Rohgas zuständig. Die Volumenströme während der Messreihen werden fest auf die in Tabelle 4.2 angegebenen Werte geregelt. Daraus ergibt sich, unter Berücksichtigung der effektiven Filteroberfläche von  $1.000 \text{ mm}^2$ , eine Filterflächenbelastung von  $3,08 \text{ m}^3/\text{min}$ . Ohne den durch das Referenzmessobjekt verdeckten Anteil liegt die Filterflächenbelastung bei  $3,70 \text{ m}^3/\text{min}$ .

Tabelle 4.2: Volumenströme am Filterstreifenteststand

Größe	Wert
$\dot{V}_{Roh}$	$120 \text{ l}/\text{min}$
$\dot{V}_{Rein}$	$3,7 \text{ l}/\text{min}$

### 4.3.3 Staubdispergierung und -dosierung

Um das Rohgas zu konditionieren, wird der Bürstendispergierer *PALAS BEG 1000* (Abbildung 4.5) verwendet. In diesem wird der Staub in den Vorratsbehälter eingegeben und kontinuierlich gerührt, um Agglomerate zu verhindern. Ein Transportband nimmt stetig einen Teil des Staubs auf und transportiert diesen in Richtung einer rotierenden Bürste. Diese wiederum bewegt sich durch den Staub und nimmt diesen mit den Bürsten auf. An der gegenüberliegenden Stelle wird der Staub mithilfe von Druckluft aus der Bürste abgeblasen, woraus ein Aerosol entsteht. Dieses wird zusammen mit Druckluft zur Dispergierdüse geleitet und dort in das Trägergas eingebracht. Die Dosierung erfolgt gravimetrisch [57].



Abbildung 4.5: PALAS BEG 1000

Abbildung 4.6 beschreibt den Aufbau des verwendeten Bürstendispergierers. Die nummerierten Komponenten sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

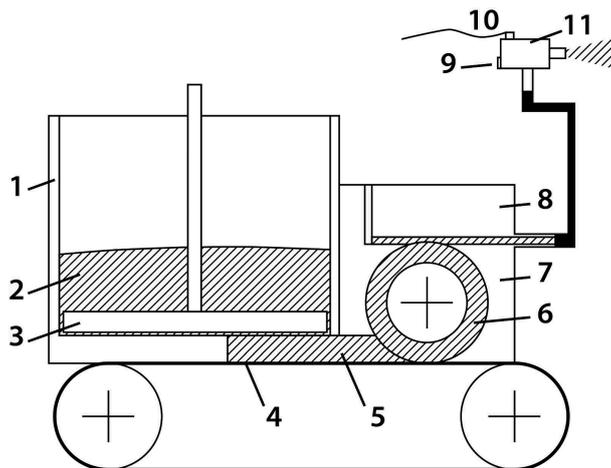


Abbildung 4.6: Aufbau eines Bürstendispergierers (vgl. Tabelle 4.3)

Tabelle 4.3: Komponenten des Bürstendispergierers (vgl. Abbildung 4.6)

1: Staubreservoir	7. Bürstenhaus
2: Staub	8. Dispergierkopf
3: Rührer	9. Druckluftanschluss
4: Förderband	10. Erdungskabel
5: Massenstromregler (Abstreifer)	11. Dispergierdüse
6: Bürste	

## 4.4 Messtechnik

### 4.4.1 Volumenstromsensoren

Die Volumenströme im Roh- und Reingas werden über eine kombinierte Mess- und Regeleinheit eingestellt. Die dafür eingesetzten Geräte Aalborg GFC 571 (Rohgas) bzw. Aalborg GFC 371 (Reingas) regeln die Volumenströme auf die in Tabelle 4.2 dargestellten Werte. Das Messprinzip der Sensoren beruht auf der Temperaturmessung. Der Volumenstrom wird in zwei Teilströme durch eine primäre Durchflussleitung und ein kapillares Sensorrohr paritätisch aufgeteilt. Die Temperatur in den Sensorrohren wird über je zwei Heizdrahtspulen gemessen. Verändern sich die Temperaturwerte über ein Sensorrohr, bedeutet dies einen Durchfluss des Fluids. Ein elektromagnetisches Dosierventil dient der Regelung des Volumenstroms auf den gewünschten Wert [58]. Das für die Rohgasregelung genutzte GFC 571 besitzt einen Mess- und Regelbereich von  $4 \dots 200 \text{ l/h}$ , das GFC 371 von  $0,4 \dots 20 \text{ l/h}$ . Somit sind beide Geräte geeignet, innerhalb der gegebenen Betriebsbedingungen eingesetzt zu werden.

### 4.4.2 Partikelkonzentration

Während der Versuchsdurchführung wird die Partikelkonzentration nicht permanent gemessen. Stattdessen wird die Partikelkonzentration stichprobenhaft außerhalb der Versuche gemessen und die Parameter des Bürstendispersierers nicht verändert. Zur Messung der Partikelkonzentration wird ein TOPAS LAP 322 Aerosolspektrometer verwendet. Dieses detektiert einzelne Partikeln mithilfe des Prinzips der Streulichtintensität. Hierbei werden Laserstrahlen auf das partikelbeladene Rohgas gelenkt. Die Partikeln erzeugen in Abhängigkeit ihrer Größe eine charakteristische Streuung, welche erfasst wird. Anhand dieser gemessenen Streulichtintensitäten wird die Partikelkonzentration des Rohgases berechnet [59]. Das Gerät besitzt einen Messbereich von  $0,2 \dots 40 \mu\text{m}$  und kann für Partikelkonzentrationen von bis zu  $10^4 \text{ Partikeln/cm}^3$  eingesetzt werden. Eine Partikelkonzentration von  $10^4 \text{ Partikeln/cm}^3$  entspricht bei einem Partikeldurchmesser von  $40 \mu\text{m}$  und den verwendeten Partikeln mit einer Materialdichte von  $2.400 \text{ kg/m}^3$  einer Partikelkonzentration von ca.  $800 \text{ g/m}^3$ . Somit ist der Messbereich der Partikelkonzentration ausreichend. Der Messbereich hinsichtlich der Partikelgröße ist mit maximal  $40 \mu\text{m}$  etwas zu gering für den verwendeten Staub. Entsprechend ist hier mit erhöhten Messabweichungen zu rechnen, da etwa 10 % der Partikeln (volumenbezogen) einen höheren Durchmesser aufweisen (vgl. Verteilungssumme in Abbildung 5.3).

## 4.5 Messergebnisse

### 4.5.1 Effekt der ePTFE-Membrane

Entsprechend der Versuchsdurchführung mit beschichtetem und unbeschichtetem Filtermedium sind unterschiedliche Messergebnisse zu erwarten. Abbildung 4.7 stellt die Ergebnisse beider Versuche dar. Dabei werden die gemessene Schichtdicke und der entsprechende Druckverlust vergleichend dargestellt.

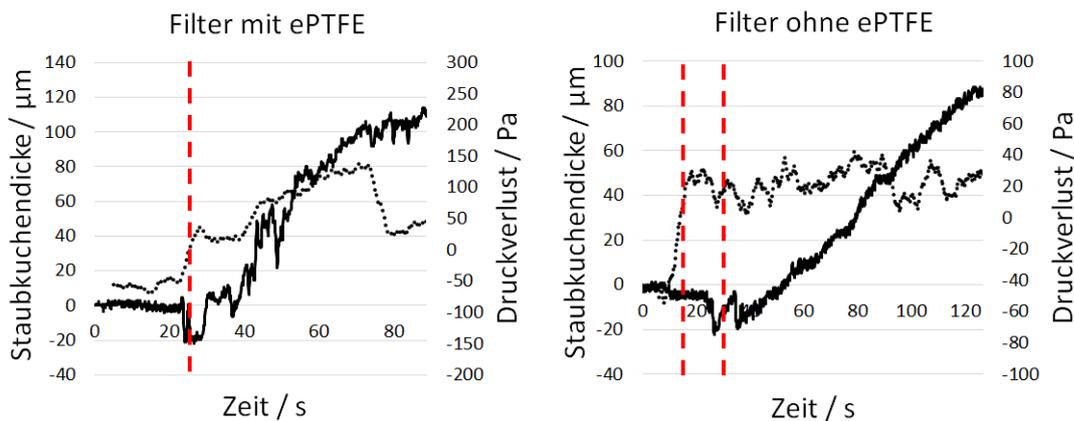


Abbildung 4.7: Messergebnisse für Filtermedien mit und ohne ePTFE-Membrane (Druckverlust - Punktlinie; Beginn des Anstiegs der Kurven - Strichlinie)

Es zeigt sich, dass bei den Messungen mit ePTFE-Membrane Druckverlust und Schichtdicke zur gleichen Zeit reagieren. Bei den Messungen ohne ePTFE-Membrane zeigt sich hingegen eine deutliche Verzögerung von ca. 15 s zwischen Anstieg des Druckverlusts und Anstieg der gemessenen Schichtdicke. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Partikel ohne die ePTFE-Membrane in das Filtermedium eindringen und eine Tiefenfiltration stattfindet. Die im Filtermedium abgeschiedenen Partikel induzieren somit eine Erhöhung des Druckverlusts, werden jedoch mithilfe der Lasertriangulationsmessung nicht erfasst, da diese nur Dickenveränderungen auf der Filteroberfläche messen. Aus den aufgezeichneten Messergebnissen lassen sich weitere Werte wie das Staubkuchenwachstum und die Partikelkonzentration ableiten. Der verwendete Differenzdrucksensor wird in diesem Fall am unteren Ende des Messbereichs betrieben. Die Messungenauigkeit ist somit ausgesprochen hoch. Zur Bewertung des Verlaufs des Druckverlusts sind die Messwerte somit ungeeignet. Jedoch zeigt sich, dass der Druckverlust im staubarmen Betrieb ausgesprochen stabil ist. Somit kann der Sprung infolge des Beginns der Partikelabscheidung zuverlässig detektiert werden. Eine exaktere Druckverlustmessung würde eine starke Korrelation zwischen Druckverlust- und Staubkuchenentwicklung zeigen.

## 4.5.2 Staubkuchenwachstum

Das Staubkuchenwachstum  $W$  wird mittels linearer Regression aus den Messergebnissen gewonnen. Hierzu wird jeweils ein Bereich von 40 s nach Beginn des Anstiegs der Staubkuchendicke gewählt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4: Staubkuchenwachstum mit und ohne ePTFE-Membrane

Wachstum ohne ePTFE	1,25 $\mu\text{m}/\text{s}$
Wachstum mit ePTFE	3,12 $\mu\text{m}/\text{s}$

Es zeigt sich, dass sich die Werte stark unterscheiden, obwohl während der Versuche die gleichen Betriebsbedingungen vorherrschen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Partikeln bei dem unbeschichteten Filtermedium in das Material eindringen können. Über einen längeren Zeitraum, nachdem eine Sättigung des Filtermediums mit Partikeln eintritt, ist ein ähnlicher Wert des Staubkuchenwachstums wie bei dem beschichteten Filtermedium zu erwarten.

## 4.5.3 Druckverlust

Der aufgezeichnete Druckverlust dient in den durchgeführten Versuchen lediglich der Bestimmung des Beginns der Abscheidung. Anhand der Verschiebung zwischen den Zeitpunkten des Anstiegs des Druckverlusts und der Schichtdicke wird das Abscheideverhalten der verschiedenen Prüffilter ersichtlich. Die Verläufe des Druckverlusts sind hingegen nicht repräsentativ. Da ein frischer, unconditionierter Filter verwendet wird, ist der Bereich des gemessenen Druckverlusts mit maximal 150 Pa sehr niedrig. Der Sensor besitzt jedoch eine Messgenauigkeit von 100 Pa. Somit wird der Druckverlustsprung infolge der Abscheidung ersichtlich, die aufgezeichneten Verläufe sind jedoch kritisch zu betrachten.

## 4.5.4 Partikelkonzentration

Mithilfe des Staubkuchenwachstums ist über die Partikeldichte, die Porosität und die Filterflächenbelastung eine Abschätzung der Partikelkonzentration im Rohgas möglich:

$$c_{Roh} = \frac{\dot{m}_P}{\dot{V}} = \frac{W \cdot A_{Eff} \cdot \rho_P \cdot (1 - \epsilon)}{A_{Eff} \cdot FFB} = \frac{W \cdot \rho_P \cdot (1 - \epsilon)}{FFB} \quad (4.1)$$

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, ist die Messmethode beim unbeschichteten Filtermedium nicht geeignet. Aus diesem Grund werden keine weiteren Berechnungen auf Grundlage dieser Werte durchgeführt. Für das mit einer ePTFE-Membrane beschichtete Filtermedium ergibt sich eine Partikelkonzentration im Rohgas von 29,14  $\text{g}/\text{m}^3$ . Die Filterflächenbelastung beträgt 3,08  $\text{m}/\text{min}$ . Als Porosität wird, wie zuvor beschrieben, ein

Wert von 0,8 angenommen. Mithilfe des TOPAS LAP 322 Aerosolspektrometers wird im Rohgas eine Partikelkonzentration von  $24,7 \text{ g/m}^3$  gemessen. Es zeigt sich eine Abweichung von  $4,4 \text{ g/m}^3$  respektive  $-15 \%$ . Wie in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, ist aufgrund der Beschränkung des Messbereichs des verwendeten Partikelkonzentrationsmessgeräts eine Abweichung des Messwerts von ca.  $-10 \%$  zu erwarten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen.

#### 4.5.5 Gravimetrische Vergleichsmessung

Zur Validierung der gemessenen Werte der Staubkuchendicke werden gravimetrische Vergleichsmessungen durchgeführt. Dazu wird der verwendete Filterstreifen vor und nach der Versuchsdurchführung auf einer Präzisionswaage gewogen. Aus der Differenz der Messungen lässt sich die Masse des Staubkuchens  $\Delta m$  bestimmen und aus der gemessenen Staubkuchendicke  $\Delta s_{SK}$  lässt sich ebenfalls die Masse des Staubkuchens ableiten:

$$\Delta m_{SK} = A_{Eff} \cdot \Delta s_{SK} \cdot \rho_P \cdot (1 - \epsilon) \quad (4.2)$$

Damit ergeben sich die in Tabelle 4.5 dargestellten Ergebnisse für drei durchgeführte Versuche am Filterstreifenteststand. Die Versuche sind unter identischen Randbedingungen entstanden, sodass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Es zeigen sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Lasertriangulationsmessung und der gravimetrischen Massenbestimmung.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der gravimetrischen Vergleichsmessung

	Probe 1	Probe 2	Probe 3
$m_{vor}$	16,614 g	17,231 g	16,842 g
$m_{nach}$	16,667 g	17,291 g	16,899 g
$\Delta m$	52 mg	60 mg	57 mg
$\Delta s_{SK}$	109 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	119 $\mu\text{m}$
$\Delta m_{SK}$	51,5 mg	59,8 mg	57,7 mg
<b>Abweichung</b>	$-1,57 \%$	$-0,33 \%$	$+1,02 \%$



# Kapitel 5

## Filterschlauchteststand

### 5.1 Ziel der Versuche

Zur Überprüfung der Eignung des Lasertriangulationsverfahrens zur Online-Bestimmung der Staubkuchendicke ist ein Teststand erforderlich. Ziel ist es nicht, einen optimal betriebenen Schlauchfilter für die praktische Anwendung zu entwickeln, sondern auf die speziellen Bedürfnisse der Lasertriangulationsmessung einzugehen. Benötigt werden Sichtfenster, welche es den Lasersensoren ermöglichen, Messungen am Staubkuchen durchzuführen, ohne der partikelbeladenen Atmosphäre der Filterkammer ausgesetzt zu sein. Ebenso sind Partikelkonzentration, Volumenstrom und der Druckverlust der Anlage kontinuierlich zu überwachen. Es werden Prozesse abgebildet, welche so auch in Schlauchfilteranlagen ablaufen. Entsprechend können Aussagen über die Praxistauglichkeit des Messsystems getroffen werden. Mithilfe der Ergebnisse aus diesem Kapitel wird anschließend eine numerische Untersuchung zur Validierung der Werte durchgeführt, um so Aussagen bezüglich der aufgestellten Thesen zu liefern. Die Auslegung des Teststands geschieht in Anlehnung an Schmidt [32] und Löffler [20].

### 5.2 Beschreibung des Versuchsstands

#### Anzahl der Schläuche

Der Prüfstand (Abbildung 5.1) wird mit nur einem Filterschlauch betrieben, wohingegen moderne, in der Praxis eingesetzte Anlagen mit einigen hundert Schläuchen projektiert werden. Dies dient der Vereinfachung der Strömung in der Filterkammer, der Vereinfachung und Verkleinerung des Simulationsraums, sowie der fehlenden gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Filterschläuche aufgrund derer Umströmung.



Abbildung 5.1: Filterschlauchteststand (Gesamthöhe des Teststands ca. 4 m)

### **Messausrüstung**

Im Gegensatz zu industriell eingesetzten Schlauchfilteranlagen wird der Versuchsaufbau mit umfangreicher Messausrüstung versehen werden. Reicht es bei Anlagen in der Praxis aus, Volumenströme und Druckverlust zu überwachen sowie die Partikelkonzentration im Reingas zu messen, müssen zur Validierung der Simulation weitere Messgrößen ermittelt werden. So wird die Partikelkonzentration im Rohgas ermittelt um diese anschließend als Basis für die Injizierung der Partikeln in der Simulation zu verwenden. Die Messung des Druckverlusts der Anlage wird benötigt, um dessen zeitlichen Verlauf aufzuzeichnen, welches eine der Validierungsgrößen darstellt. Die Volumenströme werden ebenfalls als Randbedingung für die numerischen Simulationen genutzt. Als weitere Validierungsgröße wird die Schichtdicke des Staubkuchens auf dem Filtermedium aufgezeichnet. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Schichtdicke sind ebenfalls Rückschlüsse auf die Korrektheit der numerischen Simulationen möglich.

Weitere Informationen zur Messausrüstung können dem Abschnitt 5.5 entnommen werden.

### **Geringer Automatisierungsgrad**

Viele Abläufe, besonders in Hinblick auf die Regenerierung des Filters, sind manuell durchzuführen. Insbesondere die Reinigung des Prüfstands und die Entfernung des bei der Regenerierung anfallenden Staubs erfolgt vollständig manuell, ebenso wie das stetige Nachfüllen des Staubs in die Dispergiereinrichtung.

## 5.3 Betriebsparameter

### 5.3.1 Volumenströme

Für die Bestimmung der Volumenströme ist die Filterflächenbelastung des Filtermediums zu beachten. Diese kann im Bereich zwischen  $0,5 \dots 2,5 \text{ m}^3/\text{min}$  liegen, wobei für den verwendeten Staub ein Bereich von  $1,8 \dots 2,2 \text{ m}^3/\text{min}$  empfohlen wird [20].

$$A_{eff} = \pi \cdot D_{FS} \cdot L_{FS} = \pi \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 3,00 \text{ m} = 1,41 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

Mit: Filterschlauchdurchmesser  $D$ ; Filterschlauchlänge  $L$

Entsprechend der Filteroberfläche ergibt sich ein zulässiger Bereich für den Volumenstrom der Anlage von  $154 \dots 189 \text{ m}^3/\text{h}$ . Um eine möglichst homogene Staubdispergierung zu erreichen und den Messbereich der Volumenstromsensoren optimal zu nutzen, wird ein minimal über der Empfehlung liegender Volumenstrom von ca.  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  eingestellt. Die Reynoldszahlen in den Rohren des Roh- bzw. Reingasbereichs berechnen sich für eine Umgebungstemperatur von  $22^\circ\text{C}$  und einen Druck von  $1,014 \text{ bar}$  wie folgt.

$$Re_{Roh} = \frac{v_{m,Roh} \cdot D_{Roh}}{\nu} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D_{Roh} \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 200 \text{ m}^3/\text{h}}{\pi \cdot 0,20 \text{ m} \cdot 15,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 23.101 \quad (5.2)$$

Mit: Rohrdurchmesser  $D$ ; kinematische Viskosität  $\nu$

$$Re_{Rein} = \frac{v_{m,Roh} \cdot D_{Roh}}{\nu} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D_{Rein} \cdot \nu} = \frac{4 \cdot 200 \text{ m}^3/\text{h}}{\pi \cdot 0,25 \text{ m} \cdot 15,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 18.481 \quad (5.3)$$

Damit liegen die Reynoldszahlen eindeutig im turbulenten Strömungsbereich. Vor allem bei der Dispergierung ist dies als Vorteil zu werten, da so eine Homogenisierung des dispergierten Staubs im Rohr erzielt wird. Für eine tiefergehende Betrachtung des Partikeltransports in Rohrströmungen sei [60] empfohlen.

Die Luftzuführung wird rohgasseitig über einen Rohreinbaufilter mit der Filterklasse G3 geführt. Zudem kommt noch an zwei Stellen Fremdluft in das System. Durch die Dispergierdüse werden die Partikeln mithilfe von Druckluft in das System eingebracht. Weiterhin wird Spülluft zur Reinigung der Optik des Partikelkonzentrationsmessgeräts SICK Dusthunter T50 eingesetzt. Diese wird über einen Verdichter aus der Umgebungsluft zugeführt.

Die Stellgröße der Volumenstromregelung ist die Lüfterdrehzahl. An den Volumenstromsensoren ist eine Regelung über eine Klappe integriert, jedoch reagiert diese zu träge um den Volumenstrom ausreichend schnell anzupassen. Daher wird über die SPS die Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit der Regeldifferenz moduliert. Dies geschieht in Zeitintervallen von  $10 \text{ s}$ , um einen Resonanzeffekt infolge der Totzeit der Regelstrecke zu vermeiden.

### 5.3.2 Partikelkonzentration

Nach eingehenden Versuchen bezüglich der optimalen Partikelkonzentration, wird diese auf  $3 \text{ g/m}^3$  festgelegt. Bei niedrigeren Partikelkonzentrationen ist das Wachstum des Staubkuchens sehr langsam, was hinsichtlich der numerischen Simulationen zu einer erhöhten Anzahl zu berechnender Zeitschritte führt. Bei Partikelkonzentrationen oberhalb von  $3 \text{ g/m}^3$  kann der Staub nicht mehr homogen dispergiert werden. Zudem bilden sich bei hohen Partikelkonzentrationen umfangreichere Staubablagerungen an den Rohrwänden und den Wänden der Filterkammer, wodurch eine häufigere umfangreiche Wartung der Anlage notwendig ist.

### 5.3.3 Druckverluste

Der Druckverlust eines frischen, unbenutzten Schlauchfilters beträgt  $58 \text{ Pa}$  bei einer Filterflächenbelastung von  $2,36 \text{ m}^3/\text{min}$ . Die Anlage ist so programmiert, dass der Filter beim Erreichen eines Differenzdrucks zwischen Roh- und Reingas von  $1.000 \text{ Pa}$  mithilfe eines Druckluftstoßes regeneriert wird.

### 5.3.4 Verwendete Stäube

Zur Versuchsdurchführung wird ein Staub von Nabaltec namens APYRAL<sup>®</sup> 16 genutzt. Dieser besteht zu  $99,7\%$  aus  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Aluminiumhydroxid). Die Materialparameter des Staubs wie Dichte, Schüttdichte und Partikelgrößenverteilung werden vom Hersteller zur Verfügung gestellt [61]. Die vom Hersteller gelieferten Daten werden im Labor des Instituts für Partikeltechnologie der Bergischen Universität Wuppertal überprüft. Hierzu wird eine repräsentative Probe von  $800 \text{ g}$  mithilfe einer Probenahmelanze entnommen, der Behälter luftdicht verschlossen und in das Labor nach Wuppertal gebracht.

#### Probenteilung

Um aus der genommenen Gesamtprobe repräsentative Teilproben zu erhalten, wird ein Rotationsprobenteiler verwendet. Bei diesem wird der Staub in einen Trichter gegeben und mittels eines Rüttelkanals zum eigentlichen Probenteiler transportiert. Dort angekommen wird über eine gleichmäßige Rotation die Probe in acht verschiedene Teilproben aufgeteilt. Der Prozess ist nicht staubdicht, sodass hier kleine Mengen der Gesamtprobe verlorengehen können.

#### Schüttdichte

Die Schüttdichte wurde nach dem in der DIN ISO 697 [62] beschriebenen Verfahren ermittelt. Laut dem Verfahren wird der Staub durch einen Trichter aus einer Höhe von  $50 \text{ mm}$  in einen Messzylinder mit einem Durchmesser von  $86,1 \text{ mm}$  geschüttet bis ein definiertes

Volumen erreicht ist. So wird die Massendifferenz zwischen leerem und gefülltem Zylinder ermittelt und somit die Schüttdichte des Stoffs bestimmt. Hierbei ist anzumerken, dass kein Messzylinder mit einem Durchmesser von 86,1 mm zur Verfügung steht. Stattdessen wird ein Messzylinder mit einem Durchmesser von 20 mm verwendet. Der übrige Aufbau entspricht der Empfehlung der DIN ISO 697. Durch den geringeren Durchmesser ergibt sich bei gleichbleibendem Volumen automatisch eine größere Höhe der Staubsäule. Somit setzt eher eine Eigenverdichtung ein, als dies bei einem Gefäß mit größerem Durchmesser der Fall wäre. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Messung (vgl. Tabelle 5.1) wieder.

**Tabelle 5.1: Ergebnisse der durchgeführten Messreihen zur Bestimmung der Schüttdichte (Mittelwert der acht Messungen:  $807 \text{ kg/m}^3$ )**

Messung	Tara	Gesamtmasse	Schüttdichte
1	91,197 g	173,384 g	$822 \text{ kg/m}^3$
2	91,198 g	172,298 g	$811 \text{ kg/m}^3$
3	91,205 g	175,505 g	$843 \text{ kg/m}^3$
4	91,198 g	171,096 g	$799 \text{ kg/m}^3$
5	91,199 g	171,071 g	$799 \text{ kg/m}^3$
6	91,197 g	171,092 g	$799 \text{ kg/m}^3$
7	91,198 g	169,909 g	$787 \text{ kg/m}^3$
8	91,200 g	170,954 g	$798 \text{ kg/m}^3$

Die ermittelte Schüttdichte liegt mit  $807 \text{ kg/m}^3$  etwa 8 % über dem vom Hersteller angegebenen Wert von  $750 \text{ kg/m}^3$ . Der Grund für die Abweichung ist der verwendete Messzylinder mit einem von der Norm abweichenden Durchmesser. Dadurch kommt es zu einer erhöhten Eigenverdichtung des Materials und damit zu einer höheren Schüttdichte.

## Materialdichte

Zur Ermittlung der Materialdichte des verwendeten Staubs wird ein Pyknometer mit einem Volumen von  $25,202 \text{ cm}^3$  in vier Schritten verschieden befüllt und ausgewogen:

1. Leeres Gefäß ( $m_1$ )
2. Gefäß mit Staubprobe ( $m_2$ )
3. Gefäß mit Staubprobe und Wasser ( $m_3$ )
4. Gefäß mit Wasser ( $m_4$ )

Die Materialdichte des Staubs wird mithilfe der folgenden Formel bestimmt:

$$\rho_P = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_{Wasser} \quad (5.4)$$

Mit: Masse  $m$

Die Dichte des Wasser beträgt bei den Bedingungen im Labor zum Messzeitpunkt  $997 \text{ kg/m}^3$ . Die so ermittelten Messergebnisse sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Der arithmetische Mittelwert der drei Messungen entspricht auf eine Nachkommastelle gerundet exakt dem vom Hersteller angegebenen Wert von  $2,4 \text{ g/cm}^3$ . Im Folgendem wird deshalb der Wert von  $2,4 \text{ g/cm}^3$  verwendet.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der durchgeführten Messreihen zur Bestimmung der Materialdichte

Messwert	Messung 1 in g	Messung 2 in g	Messung 3 in g
$m_1$	23,987	23,987	23,989
$m_2$	26,638	27,765	27,589
$m_3$	50,677	51,287	51,180
$m_4$	49,111	49,111	49,130
Dichte in $\text{g/cm}^3$	2,436	2,351	2,315

## Partikelgrößenverteilung

Zur Analyse der Partikelgrößenverteilung wird ein *HORIBA LA950* verwendet. Die Bestimmung der Partikeln erfolgt über die Streulichtmessung am Kollektiv. Kleine Partikeln weisen höhere Streuwinkel auf als große Partikeln. Über diese Charakteristika werden die Partikeln erfasst und darüber deren Durchmesser bestimmt. Die Abbildungen 5.2 und 5.3 stellen die Volumenverteilungsdichte (Abbildung 5.2) und die Volumenverteilungssumme (Abbildung 5.3) dar. Es werden insgesamt 52 repräsentative Proben des Staubs mit verschiedenen Messparametern analysiert (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Durchgeführte Messreihen zur Partikelgrößenverteilung

Messreihe	Anzahl Proben	Art der Messung / Parameter
1	10	Trocken mit $p_{Disp} = 0,3 \text{ MPa}$
2	10	Trocken mit $p_{Disp} = 0,2 \text{ MPa}$
3	10	Trocken mit $p_{Disp} = 0,1 \text{ MPa}$
4	10	Trocken ohne Druckluft
5	6	Nass ohne Ultraschall
6	6	Nass mit Ultraschall

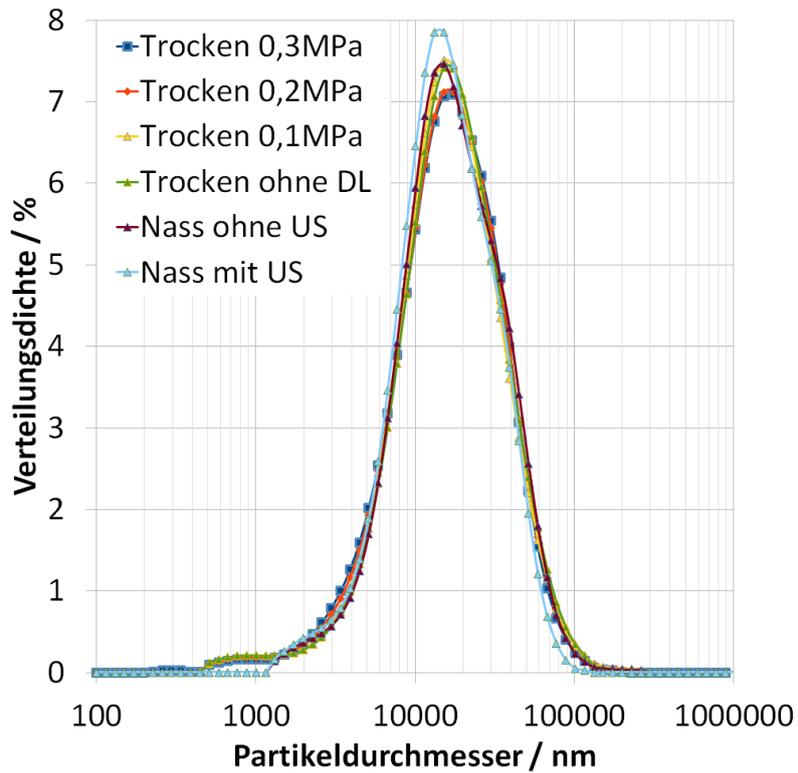


Abbildung 5.2: Volumeverteilungsdichte der untersuchten Staubproben, gerätespezifisch normiert (Messreihen nach Tabelle 5.3)

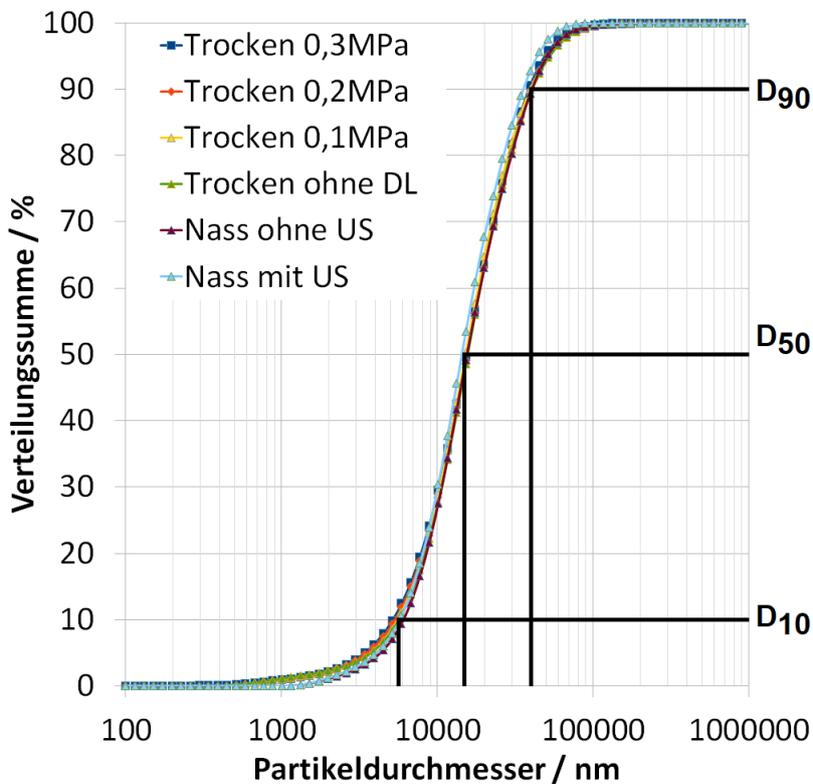


Abbildung 5.3: Verteilungssumme der untersuchten Staubproben (Messreihen nach Tabelle 5.3)

Die Mittelwerte der sechs Messreihen liegen sehr nah beieinander. Stäube mit hoher Neigung zu Agglomeration zeigen einen deutlichen Einfluss der Dispergierparameter, da die Verwendung von Druckluft oder Ultraschall zu einem Aufbrechen von Agglomeraten führt. Der verwendete Staub zeigt kein solches Verhalten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass dieser kaum zu Agglomeration neigt. Tabelle 5.4 zeigt die Ergebnisse für  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  und  $D_{90}$ . Auch diese Werte zeigen eine sehr geringe Streuung, da sie aus der Verteilungssumme abgeleitet sind.

**Tabelle 5.4: Ergebnisse der Messreihen zur Partikelgrößenverteilung (volumenbezogen)**

Messreihe	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
1	5,2 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$
2	5,3 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
3	5,5 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$
4	5,6 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
5	6,0 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$
6	5,7 $\mu\text{m}$	14 $\mu\text{m}$	36 $\mu\text{m}$

Vom Hersteller vorgegeben sind die Werte  $D_{10} = 1,9 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 16 \mu\text{m}$  und  $D_{90} = 44 \mu\text{m}$  [61]. Zusätzlich ist der Siebrückstand bei einer Maschenweite von  $> 45 \mu\text{m}$  mit 3% angegeben. Die Werte stimmen im Wesentlichen mit den Herstellerangaben überein. Auffällig ist, dass die sehr feinen Partikelfractionen durchweg unterrepräsentiert sind. Eine mögliche Erklärung hierfür ist zum einen eine Agglomeration der feinen Bestandteile durch die Lagerung des Staubs. Zudem verflüchtigen sich die Feinstbestandteile beim Umfüllen der Proben, was durch feine Staubwolken sichtbar ist. Da beide Effekte auch im Anlagenbetrieb auftreten, werden die experimentellen Messwerte den Herstellerangaben vorgezogen.

### 5.3.5 Verwendetes Filtermedium

Als Material für den Schlauchfilter wird ein einfaches Polyester-Nadelfilz mit ePTFE-Beschichtung und einer Flächenmasse von  $550 \text{ g/m}^2$  verwendet. Das Datenblatt des Filtermediums ist Abbildung 5.4 zu entnehmen.

### 5.3.6 Konditionierung des Filters

Die Konditionierung wird nach DIN ISO 11057 [63] durchgeführt. In Tabelle 5.5 ist der Ablauf beschrieben.

**PRODUKT DATENBLATT**

<b>Produkt Typ</b>	Filtrationsschlauch	
<b>Material Typ</b>	Nadelfilz	
<b>Faserauflage</b>	POLYESTER	
<b>Gewebe</b>	POLYESTER	
<b>Gewicht</b>	g/m <sup>2</sup>	550
<b>Ausrüstung</b>	▪ Mikroporöse PTFE Membrane	
<b>Zertifikat</b>	▪ BIA/IFA Klasse M	
<b>Luftdurchlässigkeit</b>	l/dm <sup>2</sup> *min	65 (ΔP = 200 Pa)
<b>Dicke</b>	mm	2,00
<b>Dichte</b>	g/cm <sup>3</sup>	0,28
<b>Porenvolumen</b>	%	80
<b>Höchstzugkraft (5 cm)</b>	längs	≥ 1500 N
	quer	≥ 1300 N
<b>Höchstzugkraftdehnung</b>	längs	≤ 0 %
	quer	≤ 0 %
<b>Temperaturbelastung</b>	°C	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 150 – dauernd</li> <li>▪ 160 - kurzzeitig</li> </ul>
<b>Chemische-Belastung</b>	starke Säure	●●●
	schwache Säure	●●●●
	starke Lauge	●
	schwache Lauge	●●
	Lösungsmittel	●●●
	Oxidation	●●●●
	Hydrolyse	●
	Legende: ●●●● sehr Gut   ●●● gut   ●● mäßig   ● schlecht	

Abbildung 5.4: Datenblatt des verwendeten Filtermediums

Tabelle 5.5: Prüfablauf eines Filtrationsprüfstands nach DIN ISO 11057

Messphase	Bedingungen	Bestimmung der Reingaskonzentration
1. Phase: Konditionierung	30 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Regenerierung und einem festgelegten Regenerierungsdruckpunkt von 1.000 Pa	ja
2. Phase: künstliche Alterung	2.500 Regenerierungszyklen zeitgetaktet jeweils alle 20 s	nicht erforderlich
3. Phase: Stabilisierung	10 Beladungszyklen mit differenzdruckgesteuerter Regenerierung	nicht erforderlich
4. Phase: Messung	2 h Beladungszyklus mit differenzdruckgesteuerter Regenerierung und einem festgelegten Regenerierungsdruckpunkt von 1.000 Pa	ja
5. Phase: optionale Messung	2 h Beladungszyklus mit differenzdruckgesteuerter Regenerierung und einem festgelegten erhöhten Regenerierungsdruckpunkt von 1.800 Pa	ja

## 5.4 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf ist wie folgt:

1. Einschalten der SPS
2. Starten des Lüfters und Warten bis Volumenstrom konstant ist
3. Starten der Staubdispergierung und der Messung
4. Stopp der Messung bei Erreichen des Zieldruckverlusts
5. Regenerieren des Filters
6. Ausschalten der SPS
7. Reinigen des Prüfstands

Wird der Prüfstand nicht regelmäßig gereinigt, verbleibt der Staub im System. Dieser wirbelt zu Beginn der nächsten Messung auf und verfälscht so die Bilanz des Staubeintrags

in das System. Ebenso sind die Verschmutzungen auf den Gläsern, hinter denen sich die Lasertriangulationssensoren befinden, regelmäßig zu entfernen. Geschieht dies nicht, kommt es aufgrund der Verschmutzung zu Messaussetzern bis hin zu einem vollständigen Versagen der Messung.

## 5.5 Messtechnik

### 5.5.1 Messgeräte

#### Partikelkonzentration - SICK Dusthunter T50

Der *Dusthunter T50* ist ein Transmissions-Staubmessgerät der Firma *SICK*. Das Gerät misst die Transmission und leitet daraus die Opazität und die Extinktion ab. Das Messgerät kann frei im Messbereich  $0 \dots 10 \text{ g/m}^3$  eingestellt werden. Aufbau und Funktionsprinzip des Messgeräts sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

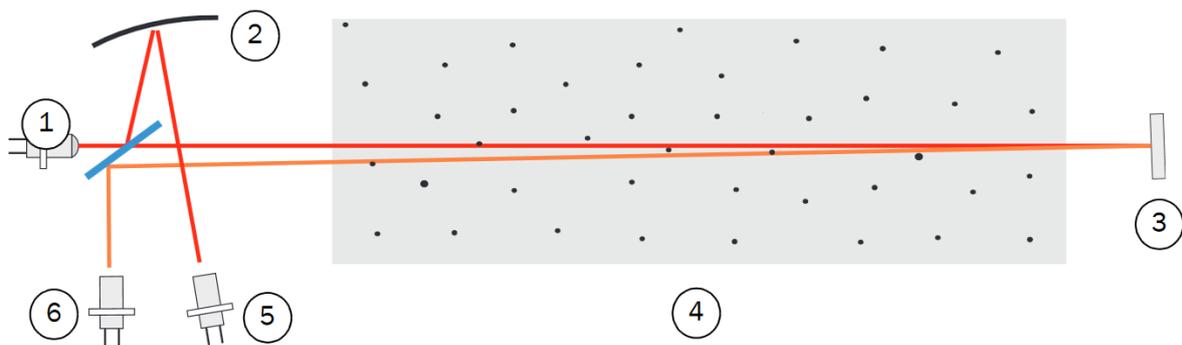


Abbildung 5.5: Messprinzip des SICK Dusthunter T50 (entnommen aus [64]). Eine Verringerung empfangenen Lichtintensität entspricht einer Erhöhung der Partikelkonzentration im Strahlengang

Die nummerierten Komponenten in Abbildung 5.5 sind:

1. LED
2. Hohlspiegel
3. Reflektor
4. aktive Messstrecke
5. Monitorempfänger
6. Messempfänger

Aus folgenden Größen wird die Partikelkonzentration ermittelt (alle Gleichungen sind übernommen aus [64]):

**Transmission  $T$ :**

$$T = N \cdot \frac{I_{Mess}}{I_{Monitor}} \quad (5.5)$$

Mit: Normierungskonstante  $N$ ; Empfangenes Licht  $I_{Mess}$ ; Monitorsignal  $I_{Monitor}$

**Opazität  $O$ :**

$$O = 1 - T \quad (5.6)$$

**Extinktion  $E$ :**

$$E = \log \left( \frac{1}{T} \right) \quad (5.7)$$

**Relative Opazität  $O_{Rel}$ :**

$$O_{Rel} = 1 - e^{-E \cdot D_{Rohr} (2 \cdot s_{Mess})^{-1}} \quad (5.8)$$

Mit: Eulersche Zahl  $e$ ; Rohrdurchmesser  $D$ ; Messstrecke  $s$

Gleichung 5.8 ist in der Bedienungsanleitung des Messgeräts mit einem positiven Exponenten angegeben. Für eine relative Opazität von 0...1 muss der Exponent hingegen negativ sein. Die Messstrecke und der Durchmesser sind als positiv anzunehmen. Da eine negative Extinktion physikalisch nicht plausibel ist, wird das Negieren des Exponenten notwendig.

Aufgrund des Lambert-Beer'schen Gesetzes ergibt sich:

**Partikelkonzentration  $c_{Roh}$ :**

$$c_{Roh} = \frac{2,31 \cdot E}{k \cdot 2 \cdot s_{Mess}} \quad (5.9)$$

Mit: Extinktionskonstante  $k$

Der Faktor 2,31 wird vom Hersteller vermutlich verwendet, da statt des dekadischen der natürliche Logarithmus verwendet wird. Die Extinktion ist bei konstanter Partikelgröße und homogener Partikelverteilung direkt proportional zur Partikelkonzentration. Da dies in der Praxis nicht der Fall ist, sind gravimetrische Kalibrierungsmessungen durchzuführen.

ren (vgl. Abschnitt 5.5.3). Das Messgerät ist mit der Steuereinheit MCU-P verbunden, welche die Messwerte des Dusthunter T50 verarbeitet, darstellt und an die SPS zur Datenaufzeichnung weiterleitet. Zudem ist in der MCU-P eine Spüllufteinheit integriert, welche die Optiken des Dusthunter T50 staubfrei hält. Diese Spüllufteinheit ist mit einem Spülluftvolumenstrom von  $< 20 \text{ m}^3/\text{h}$  angegeben. Da die Spülluft aus der Umgebung angesaugt wird und diese am Standort bedingt durch die umgebenden Anlagen einen fluktuierenden Staubanteil aufweist, wird die Ansaugung mit einem Grobfilter der Klasse G3 versehen.

### Partikelkonzentration - DR. FÖDISCH GMD 06

Bei diesem Gerät handelt es sich um eine Staubbmesslanze mit zugehöriger Messausrüstung, welche dazu dient, die Partikelkonzentration in einem Gas gravimetrisch zu bestimmen. Hierzu wird die Messlanze für eine definierte Zeit von 20 min im Rohgasstrom positioniert und ein Teil des partikelbeladenen Gasstroms eingefangen [65]. Die Partikeln werden innerhalb der Lanze an einem Filter abgeschieden und können anschließend ausgewogen werden. Über die Massendifferenz vor und nach der Probenahme wird, im Zusammenspiel mit dem gemessenen Volumenstrom, die mittlere Partikelkonzentration im Messzeitraum ermittelt. Aus diesem Mittelwert kann, zusammen mit den Messwerten des *SICK Dusthunter T50*, eine Kalibrierung des Dusthunters erfolgen. Detaillierte Informationen zur Kalibrierung können dem Abschnitt 5.5.3 entnommen werden.

### Volumenstrom - SCHAKO VRA-E 250

Zum Messen des Volumenstroms im Reingas wird ein Volumenstromregler VRA-E der Firma SCHAKO verwendet. Dieser misst den Volumenstrom über ein Doppelmesskreuz und kann über eine Stellklappe den Volumenstrom entsprechend regeln. Die Messkreuze besitzen jeweils saug- und druckseitig 12 Messpunkte, welche zur Mittelwertbildung herangezogen werden. Der verbaute Volumenstromregler ist in der Baugröße DN250 verbaut. In Tabelle 5.6 sind die Werte des Geräts vermerkt.

Tabelle 5.6: Werte des Volumenstromreglers SCHAKO VRA-E 250

Wert	VRA-E 250 mm
Nenndurchmesser in mm	250
minimaler Volumenstrom $\dot{V}_{min}$ in $\text{m}^3/\text{h}$	173
maximaler Volumenstrom $\dot{V}_{max}$ in $\text{m}^3/\text{h}$	1500
Kalibrierwert (Eichwert) in $\text{m}/\text{s}$	12

Der Kalibrierwert, vom Hersteller als Eichwert angegeben, steht für den Wert der Strömungsgeschwindigkeit im Rohr, bei dem die Spannung des Messausgangssignals 10 V beträgt. Das Messprinzip der verbauten Messkreuze beruht auf der Messung des Totaldrucks

an der Anströmseite der Messkreuze und des substatischen Drucks auf der Abströmseite (Abbildung 5.6). Aus beiden gemessenen Drücken wird ein Differenzdruck gebildet, aus welchem die Geschwindigkeit abgeleitet wird.

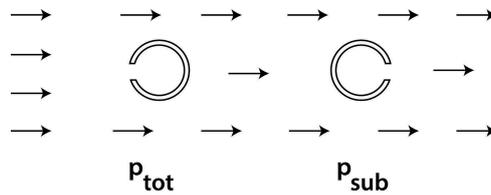


Abbildung 5.6: Prinzip des Messkreuzes mit der Messung des Totaldrucks  $p_{tot}$  und des substatischen Drucks  $p_{sub}$

Da der substatische und nicht der statische Druck gemessen wird, wird ein Verstärkungsfaktor  $M$  eingeführt. Dieser ist durch eine Kalibrierung zu ermitteln. Die Gleichungen hierzu sind im Folgenden aufgeführt:

**Dynamischer Druck  $p_{Dyn}$ :**

$$p_{Dyn} = p_{Tot} - p_{Stat} \quad (5.10)$$

**Verstärkungsfaktor  $M$ :**

$$M = \frac{\Delta p}{p_{Dyn}} \quad (5.11)$$

Mit: Gemessener Differenzdruck  $\Delta p$

**Strömungsgeschwindigkeit  $v$ :**

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_{Dyn}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot M}} \quad (5.12)$$

**Volumenstrom  $\dot{V}$ :**

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{Rohr}^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot M}} \quad (5.13)$$

Gleichung 5.13 beruht auf der Annahme einer homogenen Geschwindigkeitsverteilung über den Rohrquerschnitt. Der Hersteller liefert hierzu keine genauen Angaben jedoch ist zu erwarten, dass der Verstärkungsfaktor  $M$  an dieser Stelle der Kalibrierung dient. Somit ist die Anwendung von Gleichung auch bei einer inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung möglich.

## Differenzdruck - HESCH HE 5409

Der am Filterschlauchteststand verwendete Differenzdrucksensor entspricht dem am Lasertriangulationsstand verwendeten, welcher in Abschnitt 3.3.1 beschrieben ist.

## Schichtdicke - KEYENCE LK-H087

Ebenso wie beim Differenzdrucksensor, wird auch die Lasertriangulationsmessung an beiden Testständen mit baugleichen Messgeräten durchgeführt. Die Lasertriangulationssensoren sind in Abschnitt 3.3.2 beschrieben.

### 5.5.2 Messstellen

Über den Filterschlauchteststand sind verschiedene Messstellen verteilt (Abbildung 5.7). Der Volumenstrom der Anlage wird im reingasseitigen Rohr gemessen. Der Druckverlust wird direkt an der Trennung zwischen Roh- und Reingas über ein Ringmesssystem aus vier Einzelmessungen gemittelt. Im Zustrom des Rohgases wird noch vor dem Eintritt des Rohgases in die Filterkammer die Rohgaskonzentration ermittelt. Für die Lasertriangulationsmessung können vier der vorhandenen fünf Sichtfenster verwendet werden. Das unterste Sichtfenster (Nummer 5), kann nicht verwendet werden, da der Filterschlauch bereits oberhalb endet. Nach Schmidt [66] gibt es einen Gradienten des Druckverlusts über die Schlauchlänge. Entsprechend ist die Möglichkeit vorgesehen, Messungen an verschiedenen Positionen durchzuführen.

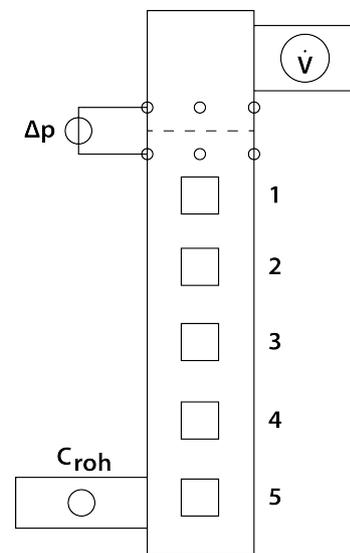


Abbildung 5.7: Übersicht der vorhandenen Messstellen am Filterschlauchteststand

### 5.5.3 Kalibrierung

#### Partikelkonzentration

Das Partikelkonzentrationsmessgerät *SICK Dusthunter T50* wird mithilfe der Staubmesslanze *DR. FÖDISCH GMD 06* kalibriert. Hierzu werden mehrere Messreihen durchgeführt. Zunächst wird ohne Partikeldispersierung über einen Zeitraum von zehn Minuten mit den Messgeräten gemessen. Die Gewichtszunahme des Filters des *GMD 06* wird in die Steuereinheit des Geräts eingegeben, woraus eine mittlere Partikelkonzentration errechnet wird. Auch können die aufgezeichneten Messergebnisse des *Dusthunter T50* untersucht werden. Hier wird über die Versuchsdauer ein arithmetischer Mittelwert der gemessenen Partikelkonzentration gebildet. Die Kalibrierungsmessungen werden mit mittlerer und

Tabelle 5.7: Messwerte der Kalibrierungsmessungen der Partikelkonzentration

Partikeldosierung	Messwert <i>Dusthunter T50</i>	Messwert <i>GMD 06</i>
Aus	610 mg/m <sup>3</sup>	6,5 mg/m <sup>3</sup>
Mittel	1243 mg/m <sup>3</sup>	1823 mg/m <sup>3</sup>
Hoch	3140 mg/m <sup>3</sup>	3447 mg/m <sup>3</sup>

hoher Staubdosierung durchgeführt. Alle Messreihen werden dreifach durchgeführt. Die gemittelten Ergebnisse aus den jeweils drei Messreihen sind in Tabelle 5.7 dargestellt.

Die Messwerte werden zu einer Korrekturfunktion zweiten Grades überführt. Diese Korrekturfunktion besitzt einen Gültigkeitsbereich von  $610 \text{ mg/m}^3 \leq c_{Roh,Mess} \leq 3140 \text{ mg/m}^3$ .

$$c_{Roh,real} = -0,0008 \text{ m}^3/\text{mg} \cdot c_{Roh,Mess}^2 + 4,343 \cdot c_{Roh,Mess} - 2347 \text{ mg/m}^3 \quad (5.14)$$

$$K_2 = -0,0008 \text{ m}^3/\text{mg}$$

$$K_1 = 4,343$$

$$K_0 = -2347 \text{ mg/m}^3$$

Mithilfe der Koeffizienten  $K_2$ ,  $K_1$  und  $K_0$  kann die SPS die Rohmesswerte verarbeiten und ausgeben.

## Volumenstrom

Die Volumenstromsensoren sind ab Werk für eine Durchströmgeschwindigkeit von 12 m/s kalibriert. Vergleichsmessungen mit zwei Handanemometern (Hitzdraht und Staudruck) zeigen eine Übereinstimmung der gemessenen Geschwindigkeiten. Da Geschwindigkeit und Volumenstrom direkt über die durchströmte Querschnittsfläche in Zusammenhang stehen, ist die Geschwindigkeit zur Validierung der Genauigkeit des Volumenstromsensors geeignet.

## Differenzdruck

Der verwendete Differenzdrucksensor kann über ein verbautes Potentiometer kalibriert werden. Hierzu muss das Gerät laut Anleitung 30 Minuten warmlaufen. Der Nullpunkt des Geräts wird über das Potentiometer eingestellt. Hierzu werden die beiden Schlauchanschlüsse kurzgeschlossen, sodass sich zwischen beiden Druckbereichen ein Differenzdruck von null einstellt. Das Gerät ist damit betriebsbereit.

## 5.6 Betrachtung der Messunsicherheiten

### 5.6.1 Differenzdrucksensor

Für den Differenzdruckmesser HESCH HE 5409 ist vom Hersteller eine Grundgenauigkeit (GG) von  $\pm 1\%$  vom Endwert angegeben. Der Endwert beträgt bei dem verwendeten Gerät 10 kPa. Bei einer Temperaturänderung während der Messung kommt es zu einer Temperaturdrift (TD) von  $\pm 0,05\%/K$  vom Endwert. Ebenso verfügt der Sensor über eine Hysterese von  $\pm 0,5\%$  vom Endwert, was bedeutet, dass an- und abfallende Druckverläufe nicht zwingend deckungsgleich gemessen werden. Da die Drücke im Messzeitraum monoton steigend verlaufen, wird die Hysterese vernachlässigt.

$$e_{Druck} = e_{GG} + e_{TD} = 1\% \cdot 10 \text{ kPa} + 0,05\% \cdot 10 \text{ kPa} \cdot 0 \text{ K} = 100 \text{ Pa} \quad (5.15)$$

Aufgrund des Standorts und der Dauer der Messreihen kommt es zu keiner Temperaturänderung während einer Messreihe. Entsprechend kann die Temperaturdrift vernachlässigt werden. Es ergibt sich damit für die Druckmessung ein maximaler Messfehler von 100 Pa.

### 5.6.2 Volumenstromsensoren

SCHAKO gibt für die Volumenstromregler der VRA-R-Serie eine Messungenauigkeit von maximal  $\pm 5\%$  an. Weitere Daten gibt der Hersteller nicht an. Anhand eigener Vergleichsmessungen mit Handanemometern (Staudruck und Hitzdraht) zeigen sich bei einem Volumenstrom von  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ , mit dem die Anlage betrieben wird, eine Abweichung von ca.  $\pm 2\%$ . Dies entspricht somit einem Messfehler von  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 5.6.3 Partikelkonzentrationsmessung

SICK gibt für den Dusthunter T50 eine allgemeine Messunsicherheit von  $\pm 2\%$  an. Dieser Wert bezieht sich auf den frei wählbaren Endwert des Messbereichs. Dieser ist am Versuchsstand auf  $3,5 \text{ g}/\text{m}^3$  eingestellt, da dieser mit einer konstanten Partikelkonzentration von  $3 \text{ g}/\text{m}^3$  betrieben wird. Der Nullpunktfehler, also die Abweichung des tatsächlichen Nullpunkts vom idealen Nullpunkt, ist mit  $\pm 1\%$  der Transmission angegeben, ist aber aufgrund der durchgeführten Kalibrierung zu vernachlässigen. Linearität, Alterung, Temperaturdrift und Verschmutzungen werden bei jedem Start durch einen automatischen Selbsttest ausgeglichen. Es verbleibt somit ein Messfehler aufgrund der Messunsicherheit:

$$e_{Partikel} = e_{MU} = 2\% \cdot 3,5 \text{ g}/\text{m}^3 = 70 \text{ mg}/\text{m}^3 \quad (5.16)$$

## 5.6.4 Lasertriangulationsmessung

Für den Lasertriangulationssensor gibt KEYENCE eine Messungenauigkeit von  $\pm 0,02\%$  des Messbereichs an [41]. Bei einem Messbereich von  $\pm 18\text{ mm} = 36\text{ mm}$  ergibt sich ein Messfehler von:

$$e_{\text{Laser}} = e_{\text{MU}} = 0,02\% \cdot 36\text{ mm} = 7,2\ \mu\text{m} \quad (5.17)$$

Es ist ebenfalls eine Temperaturdrift angegeben, jedoch kann diese aufgrund gleichbleibender Umgebungsbedingungen während eines Messzyklus vernachlässigt werden.

## 5.7 Analyse der Schwingungen

Im Betrieb einer Schlauchfilteranlage kommt es zu Schwingungen der einzelnen Filterschläuche aufgrund ihrer Flexibilität und der Strömungsverhältnisse im Inneren der Filterkammer. Diese Schwingungen führen zu potentiellen Messfehlern, sofern die Abtastrate der Lasertriangulationssensoren und der darauffolgenden Messerfassung nicht korrekt eingestellt ist. In Abbildung 5.8 sind die Schwingungen des Filterschlauchs gegenüber der Filterkammer dargestellt. Zur Erfassung der Werte wird die Abtastfrequenz der Lasertriangulationssensoren variiert um zu überprüfen, ob die Abtastfrequenz für die Messungen relevant ist. Eine Fourier-Analyse der aufgenommenen Messwerte zeigt, dass die einzig bedeutsame Schwingung eine Frequenz von 2,8 Hz aufweist. Andere Schwingungen besitzen Amplituden, welche um mehrere Größenordnungen geringer sind und die Messungen nicht beeinflussen. Die verwendeten Sensoren besitzen einen Bereich der Abtastrate von 1...392 kHz. Bei Messungen mit der höchsten Abtastfrequenz stellt das Messsystem engere Grenzwerte ein, in denen die Messung durchgeführt werden kann. Die vorliegenden Schwingungen überschreiten die Grenzwerte, sodass eine Messung mit höchstmöglicher Abtastrate im untersuchten Fall nicht möglich ist. Eine Reduzierung der Abtastrate auf 200 kHz ist in diesem Fall erfolgreich und erlaubt die Messung der Schwingungen. Der Vergleich zwischen den Abtastfrequenzen 1 kHz, 10 kHz und 200 kHz zeigt, dass alle Abtastfrequenzen ausreichend genau sind. Dies kann auch durch das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem [67] belegt werden. Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens das zweifache der maximalen Schwingungsfrequenz betragen muss. Für die gemessene Schwingung mit einer Frequenz von 2,8 Hz bedeutet dies eine minimale Abtastfrequenz von 5,6 Hz. Somit ist die minimale Abtastfrequenz von 1 kHz der Sensoren ausreichend genau. Gleiches gilt für die Messfrequenz der verwendeten SPS welche 10 Hz beträgt. Auch diese ist ausreichend hoch.

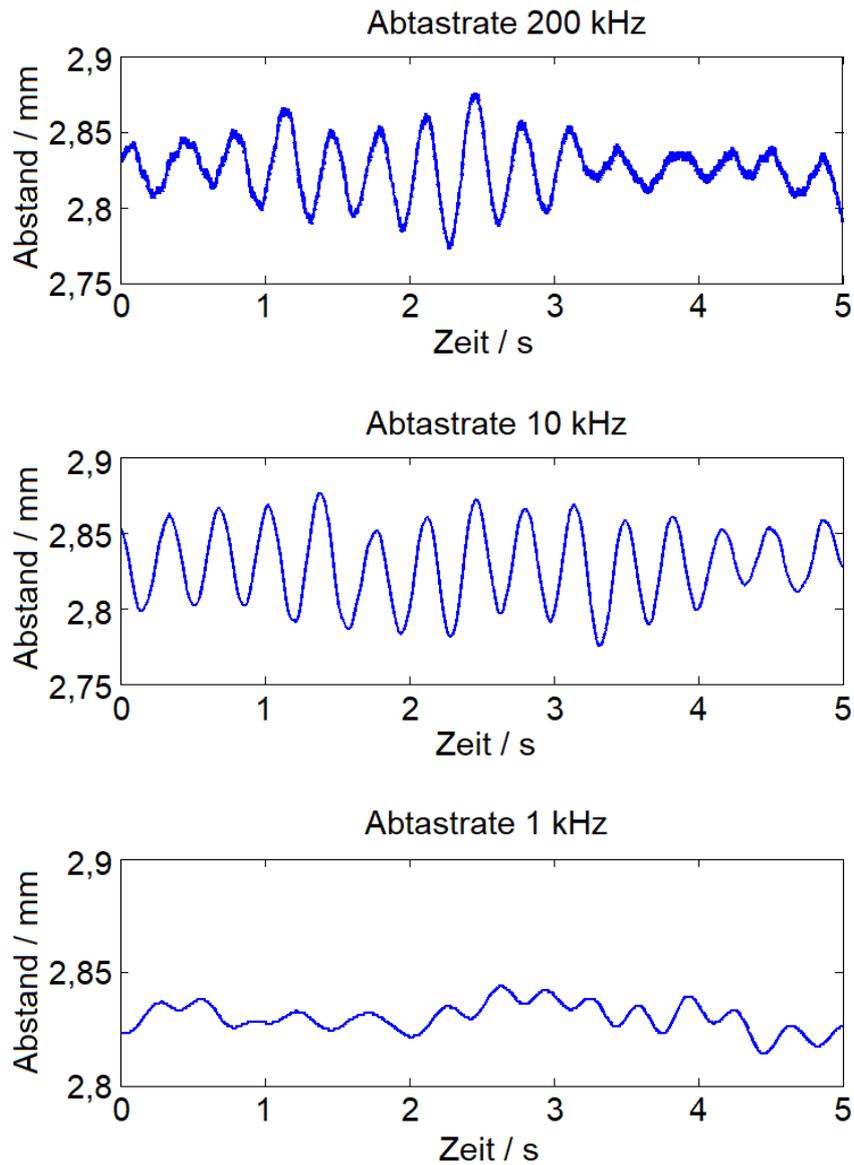


Abbildung 5.8: Am Versuchsstand gemessene Schwingungen bei verschiedenen Abtastraten [42]

Auffällig ist, dass die Schwingung mit der Abtastfrequenz von 1 kHz eine geringere Amplitude aufweist. Dies liegt jedoch nicht am Messsystem sondern an der Betriebsweise der Anlage. Diese ist mit einer Volumenstromregelung versehen, welche die Lüfterdrehzahl moduliert. Findet ein Regeleingriff statt, kommt es zu Veränderungen der Schwingungen, wobei die Frequenz erhalten bleibt, die Amplituden jedoch gedämpft werden. Der Graph der Messung mit 200 kHz zeigt gegen Ende der Messdauer ein ähnliches Verhalten der gedämpften Amplituden.

## 5.8 Messergebnisse

### 5.8.1 Wachstum des Staubkuchens

Das Ergebnis einer repräsentativen Messreihe ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

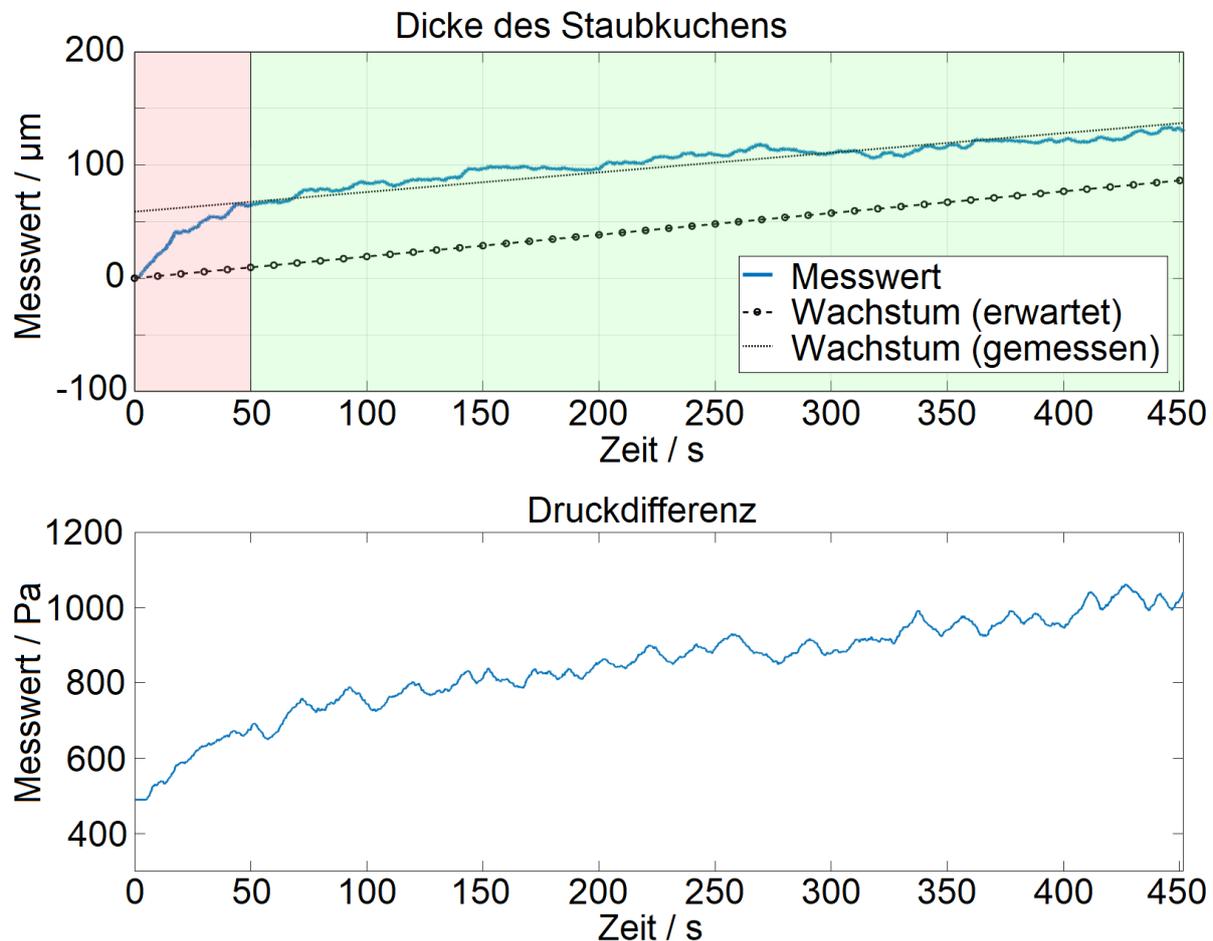


Abbildung 5.9: Ergebnis einer Messreihe zur Messung der Staubkuchendicke. Gegenübergestellt sind die Messwerte, eine lineare Regression der Messwerte (Wachstum gemessen) sowie das bilanziell erwartete Wachstum

Auffällig ist der zweigeteilte Verlauf der Kurve, welcher sich in allen durchgeführten Messreihen zeigt. In den ersten 50 s findet ein Wachstum der Form  $1 - e^{-x}$  statt. Darauf folgt ein linearer Anstieg. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist, dass Staubpartikeln, welche während des vorherigen Regenerierungsprozesses vom Filter entfernt wurden, erneut am Filter abgeschieden werden und somit ein verstärktes Staubkuchenwachstum in den ersten Sekunden bewirken. Das Staubkuchenwachstum ist monoton, jedoch stellenweise nicht streng monoton steigend. Für ein negatives Wachstum des Staubkuchens kommen im Wesentlichen zwei Möglichkeiten infrage, eine Kompression des Staubkuchens und eine Partikelabscheidung am Referenzmessobjekt. Eine Kompression ist unter den durchgeführten Parametern mit Druckdifferenzen von ca. 1 kPa sehr unwahrschein-

lich. Entsprechend ist zu vermuten, dass das stellenweise negative Wachstum infolge eines Messfehlers durch Partikelabscheidung auftritt.

Wird das gemessene Wachstum als Staubkuchenzuwachs über die Messzeit bestimmt, zeigt sich eine Wachstumsrate des Staubkuchens von  $10,42 \mu\text{m}/\text{min}$ . Der Erwartungswert kann anhand einer Bilanzierung berechnet werden (hier mit einer Rohgaskonzentration von  $c_{roh} = 3 \text{ g}/\text{m}^3$ ):

**Effektive Filteroberfläche:**

$$A_{Eff} = \pi \cdot D_{FS} \cdot L_{FS} = \pi \cdot 0,15 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 1,41 \text{ m}^2 \quad (5.18)$$

**Staubmassenstrom:**

$$\dot{m}_P = \dot{V}_{Roh} \cdot c_{Roh} = 200 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 3 \text{ g}/\text{m}^3 = 600 \text{ g}/\text{h} \quad (5.19)$$

**Staubkuchenwachstum (in Anlehnung an [32]):**

$$W_{SK} = \frac{\dot{m}_P}{\rho_P \cdot (1 - \epsilon) \cdot A_{eff}} = \frac{600 \text{ g}/\text{h}}{2400 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot (1 - 0,8) \cdot 1,41 \text{ m}^2} = 14,78 \mu\text{m}/\text{min} \quad (5.20)$$

Es zeigt sich, dass das gemessene Wachstum des Staubkuchens ca. 30 % unter dem erwarteten Wachstum liegt. Eine mögliche Erklärung dafür ist die Ablagerung von Partikeln vor dem Filter. Die Versuche zeigen, dass sich ein nicht unwesentlicher Teil der Partikeln vor dem Eintritt in die Filterkammer an den Rohren ablagert. Diese Partikeln werden in der Bilanzierung nicht erfasst und führen somit zu einem höheren berechneten Wachstum.

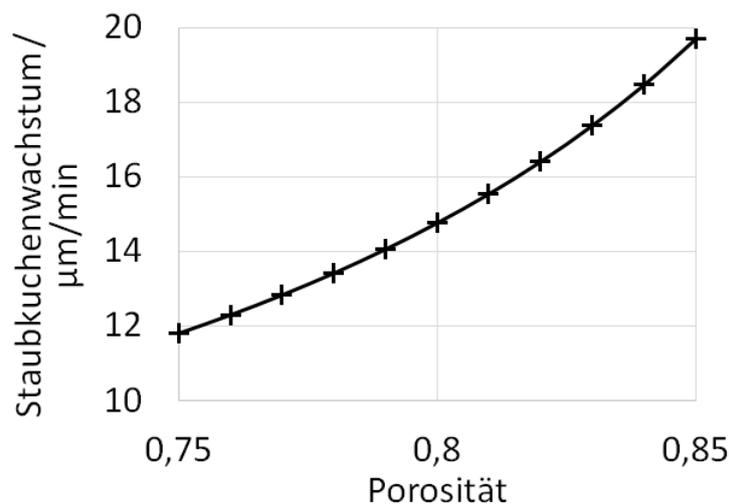


Abbildung 5.10: Einfluss der Porosität auf das bilanziell erwartete Staubkuchenwachstum. Bereits geringe Abweichungen der Porosität bewirken deutliche Veränderungen im Staubkuchenwachstum

Wie in Abschnitt 2.1.3 dargestellt, wird von einer Porosität von 0,8 ausgegangen. Abbildung 5.10 zeigt den Einfluss der Porosität auf das bilanziell ermittelte Staubkuchenwachstum. Bereits eine geringe Abweichung der Porosität vom Wert 0,8 führt zu einer deutlichen Veränderung des Staubkuchenwachstums. Jedoch sind die erzielten Ergebnisse des Staubkuchenwachstums und damit die gewählte Porosität plausibel.

## 5.8.2 Filterkoeffizienten

Aus den gewonnenen Messwerten lassen sich auch die Koeffizienten aus Gleichung 2.16 bestimmen. Hierzu wird eine Formel nach [20] verwendet, wobei nach selbiger Quelle der Gesamtabscheidegrad vereinfacht als  $E = 1$  angenommen werden kann:

**spezifischer Filtermedienwiderstand:**

$$K'_{FM} = \frac{\Delta p_{rest} - \Delta p_{leer}}{FFB} = \frac{500 \text{ Pa} - 12 \text{ Pa}}{2,4 \text{ m/min}} = 3,39 \text{ Pa}\cdot\text{h/m} \quad (5.21)$$

**spezifischer Staubkuchenwiderstand:**

$$K'_{SK} = \frac{\Delta p}{\Delta t \cdot FFB^2 \cdot c_{Roh} \cdot E} = \frac{300 \text{ Pa}}{375 \text{ s} \cdot (2,4 \text{ m/min})^2 \cdot 3 \text{ g/m}^3} = 0,0463 \text{ Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{h/g} \quad (5.22)$$

## 5.8.3 Partikelkonzentration

Analog zur Berechnung der Partikelkonzentration über das gemessene Wachstum des Staubkuchens in Abschnitt 4.5.5 wird auch für diesen Versuch die Partikelkonzentration berechnet. Aus den gegebenen Werten ergibt sich eine Partikelkonzentration von  $2,08 \text{ g/m}^3$ . Basierend auf der Annahme, dass die Abweichung aus der Ablagerung von Partikeln entstammt, lagern sich ca. 30% der Partikeln ab, bevor sie den Filter erreichen.

## 5.8.4 Entwicklung über mehrere Messreihen

Wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben, ist die Verschmutzung des Referenzmessobjekts ein Effekt, welcher zu erheblichen Messfehlern führt. Der Einfluss der Verschmutzung wird in den Abbildungen 5.11 und 5.12, sowie vergleichend in Abbildung 5.13 dargestellt. Es werden jeweils zehn Messreihen aufgenommen. Jede Messreihe entspricht einer Filtrationsphase und hat eine Dauer von ca. 300 s. Die Randbedingungen wie Volumenstrom und Partikelkonzentration im Rohgas sind über alle Messreihen hinweg konstant. Zwischen den einzelnen Messreihen findet jeweils eine Regenerationsphase statt. Bei der Betrachtung der Messergebnisse, welche mit einem luftdurchlässigen Referenzmessobjekt gewonnen werden, zeigen sich starke Anomalien (vgl. Abbildung 5.11). Dargestellt ist jeweils der gemessene zeitliche Verlauf der Staubkuchendicke. Die erste Messreihe zeigt einen plausiblen

Verlauf, in welchem die Staubkuchendicke streng monoton steigt. Ein ähnlicher Verlauf stellt sich in der zweiten Messreihe dar. Bei den Messreihen 3 bis 5 zeigen sich deutliche Abweichungen vom erwarteten Wachstumsverlauf. Die Kurve fällt im Messverlauf teils deutlich und zeigt teilweise längere Zeit konstante Werte der Staubkuchendicke dar. Ein konstanter Wert stellt sich ein, wenn sich auf dem Referenzmessobjekt ein Staubkuchen bildet, welcher die gleiche Wachstumsrate wie der Staubkuchen auf dem Filtermedium aufweist. Ein fallender Verlauf der Staubkuchendicke ist ebenfalls damit zu erklären, dass Partikeln am Referenzmessobjekt abgeschieden werden. Die Messreihen 7 bis 9 zeigen plausible Werte, welche streng monoton steigen. In der letzten Messreihe zeigt sich ein nahezu konstanter Wert der Staubkuchendicke. Zusammenfassend variieren die Messergebnisse bei der Verwendung von luftdurchlässigen Referenzmessobjekten stark. Zwischen plausiblen Messreihen finden sich mehrere Messreihen, welche offensichtliche Messfehler beinhalten. Die Verbesserung der Messergebnisse ab Messreihe 6 ist vermutlich auf die Regenerierung zurückzuführen.

Vergleichend zu Abbildung 5.11 sind in Abbildung 5.12 zehn Messreihen dargestellt, welche mit einem luftundurchlässigen Referenzmessobjekt aufgenommen werden. Dargestellt sind erneut jeweils die zeitlichen Verläufe der Staubkuchendicke. Es zeigt sich, dass sich die Messergebnisse über alle Messreihen hinweg nur geringfügig ändern. So weisen alle Kurven einen zweigeteilten Verlauf, bestehend aus verstärktem Wachstum zu Beginn und anschließendem linearem Wachstum, auf. Speziell in den Messreihen 2, 7 und 10 ist auffällig, dass die Staubkuchendicke langsamer wächst als bei den übrigen Messreihen. Möglicherweise ist dies auf eine unzureichende Regenerierung des Filtermediums zurückzuführen. In diesem Fall wird der Staubkuchen nicht vollständig gelöst, sodass ein lokal hoher Druckverlust entsteht. Dadurch wird das Filtermedium an dieser Stelle kaum noch durchströmt, womit auch keine Partikeln abgeschieden werden und das Staubkuchenwachstum nahe null liegt.

In Abbildung 5.13 werden jeweils die Messreihen 1, 3 und 5 vergleichend gegenübergestellt. Hier zeigt sich dem Betrachter deutlich, wie sich die Degradation beim luftdurchlässigen Referenzobjekt gegenüber dem luftundurchlässigen äußert.

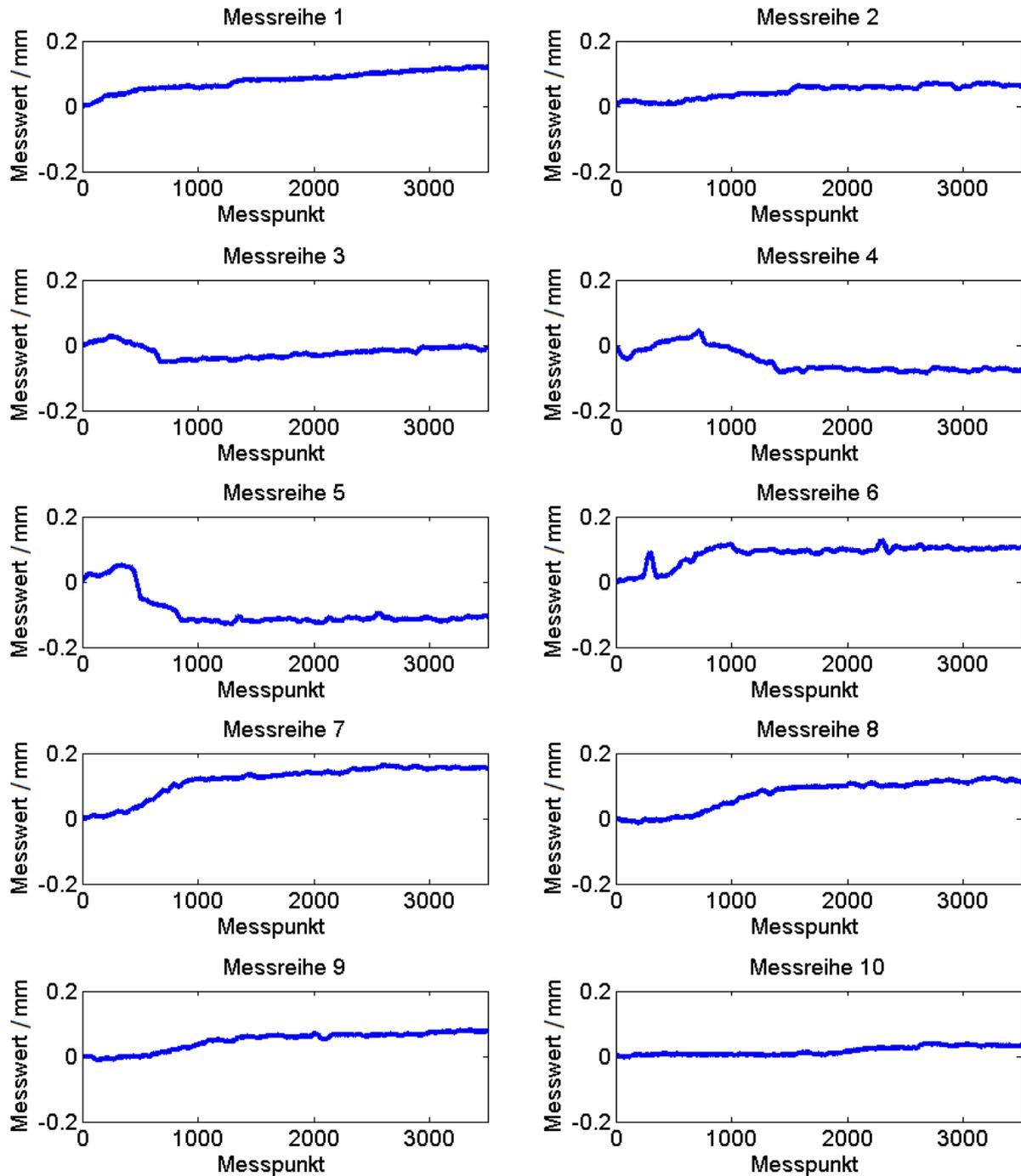


Abbildung 5.11: Ergebnisse mehrerer Messreihen bei der Verwendung eines luftdurchlässigen Referenzmessobjekts. Es zeigen sich mit zunehmender Zeit vermehrt Abweichungen vom erwarteten Staubkuchenwachstum aufgrund der Degradation des Referenzmessobjekts

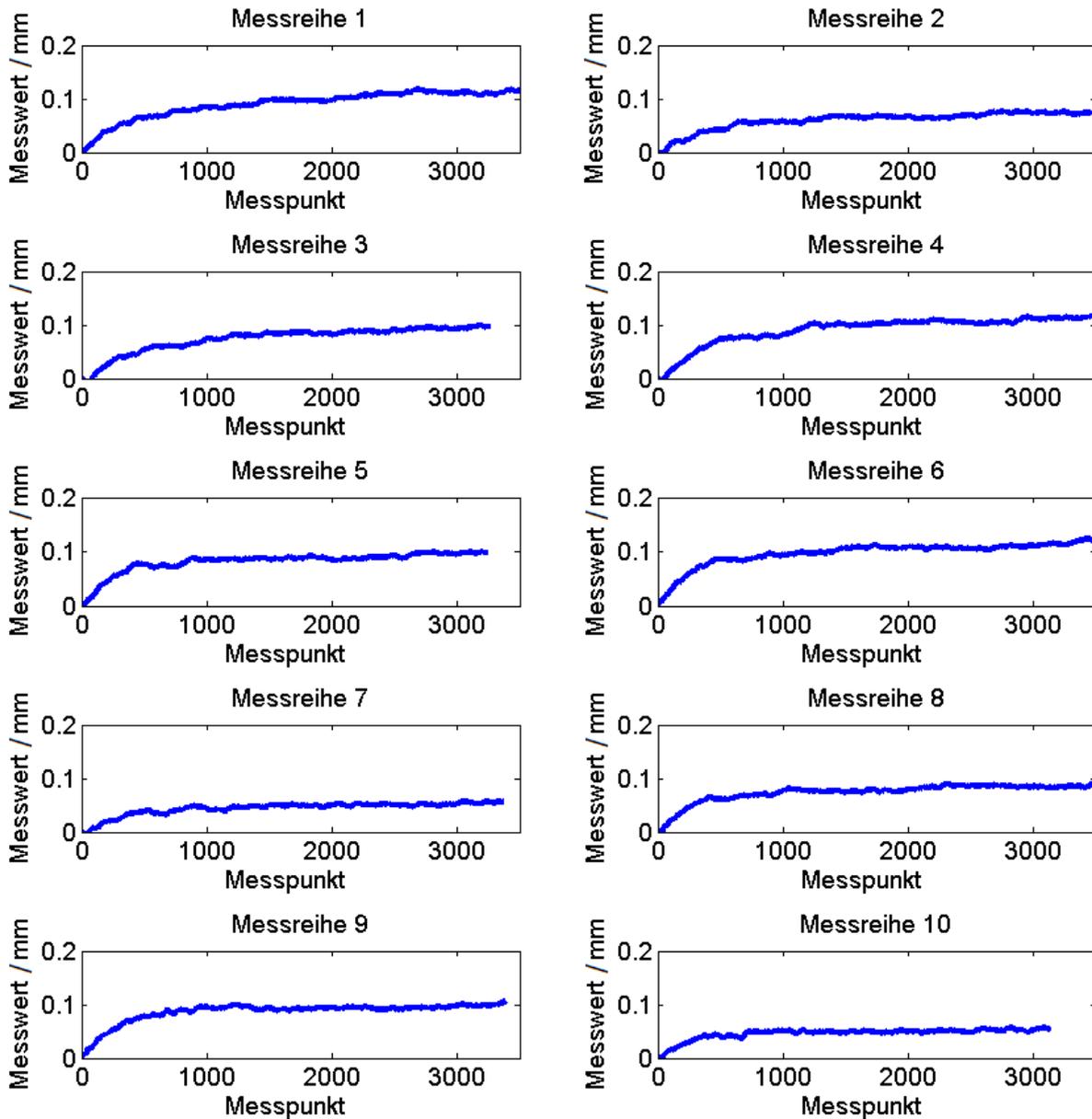


Abbildung 5.12: Ergebnisse mehrerer Messreihen bei der Verwendung eines luftundurchlässigen Referenzmessobjekts. Auch nach mehreren Messreihen zeigt sich keine Degradation des Referenzmessobjekts

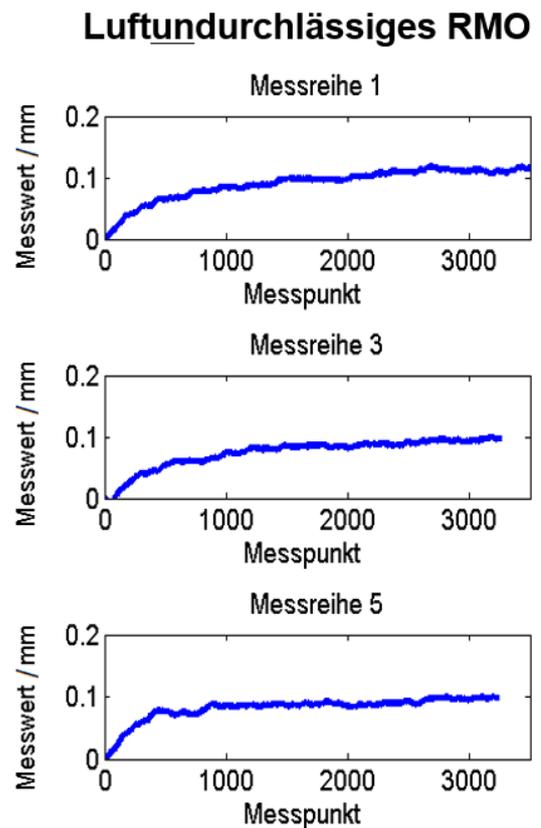
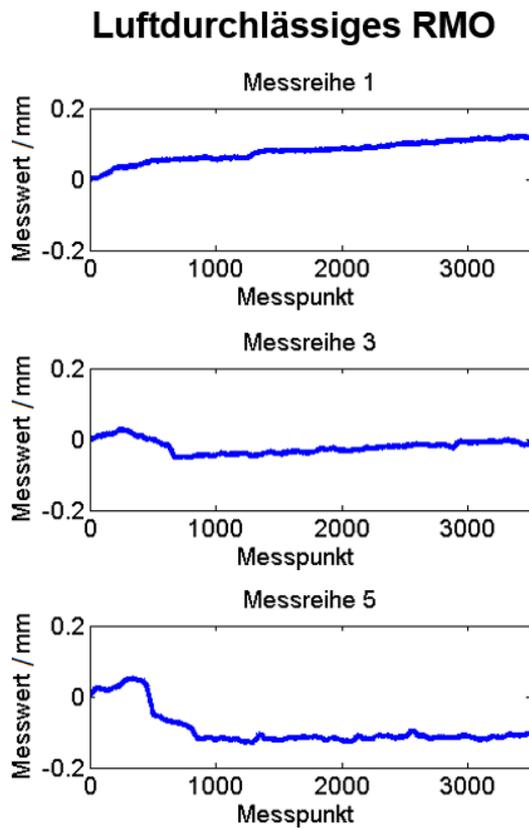


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung jeweils dreier Messreihen bei Verwendung eines luftdurchlässigen bzw. luftundurchlässigen Referenzmessobjekts. Beim luftdurchlässigen Referenzmessobjekt ist eine deutliche Degradation erkennbar. Die Verläufe beim luftundurchlässigen Referenzmessobjekt sind hingegen über die Messreihen sehr ähnlich.

# Kapitel 6

## Numerische Untersuchung

### 6.1 Ziel der Untersuchung

In dem vorherigen Kapitel wird die Lasertriangulationsmethode an einem Filterschlauch getestet. Dieses Kapitel dient der Überprüfung von These III, welche postuliert, dass die Ergebnisse der Lasertriangulationsmessung als Validierung einer numerischen Simulation geeignet sind. Hierzu wird eine numerische Untersuchung durchgeführt. Die Randbedingungen entsprechen denen des Filterschlauchteststands, sodass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

### 6.2 Verwendete Software und Hardware

Zur numerischen Untersuchung wird die Software ANSYS CFX in der Version 2019R1 verwendet. Die Software kann disperse Partikelphasen in einer Mehrphasen-Strömungssimulation berechnen. Zudem sind alle gängigen Modelle hinsichtlich Fluidströmung und Partikelmodellierung hinterlegt. Das Postprocessing wird ebenfalls in der ANSYS-Softwareumgebung durchgeführt. Die Simulationsergebnisse werden auf einem Rechencluster der Technischen Universität Ilmenau berechnet. Hierzu werden 96 Prozessorkerne verwendet. Die Dauer eines Prozessausschnitts von 10 Realsekunden entspricht einer Simulationsdauer von ca. vier Wochen.

### 6.3 Modellierung

#### 6.3.1 Geometrie

Die Geometrie des Versuchsstands wird anhand der Konstruktionszeichnungen nachgebildet. Hierbei werden Abstraktionen vorgenommen. Kleinere Bauteile werden nicht detailliert modelliert, da diese einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Strömung besitzen. Beispiele für nicht modellierte Bauteile sind: Stützkorb, Fenster in der Filterkam-

mer, Rohrwandung des Wickelrohrs sowie Übergänge von Rohrstücken. Jedoch werden in der Zuströmung des Rohgases die zylinderförmigen Einbauten des Partikelkonzentrationsmessgeräts berücksichtigt, da diese nah am Eintritt in die Filterkammer liegen und somit ein Einfluss auf das Einströmen in die Kammer möglich ist. Abbildung 6.1 zeigt die drei Volumina Rohgasraum, Filterschlauch und Reingasraum, aus denen das Geometriemodell besteht. Die jeweiligen Bereiche sind entsprechend markiert.

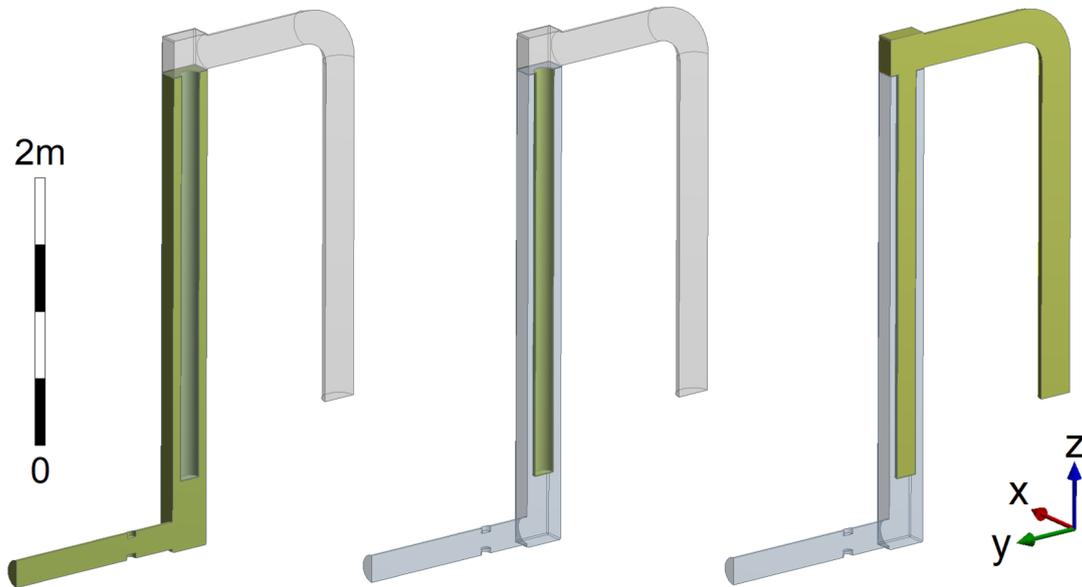


Abbildung 6.1: Geometrie des Rohgases, des Filters und des Reingases (v.l.n.r.)

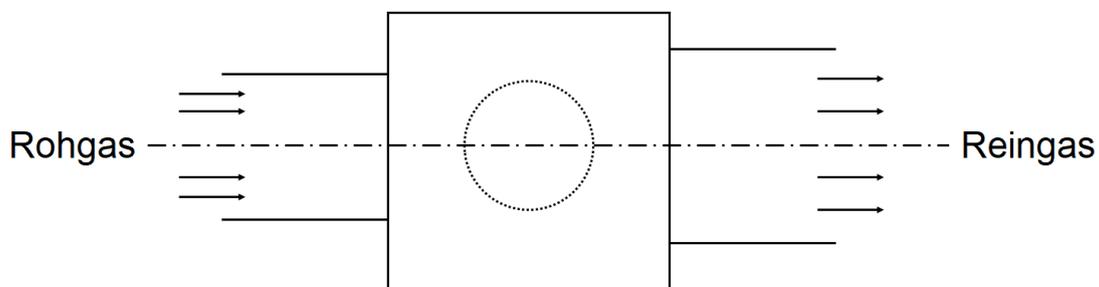


Abbildung 6.2: Symmetrieebene (Strich-Punkt-Linie) aufgespannt über die yz-Ebene und mittig im Teststand gelegen

In Abbildung 6.2 ist die Lage der Symmetrieebene der Anlage dargestellt. Diese spannt sich über die y-Achse und die z-Achse (das Koordinatensystem ist in Abbildung 6.1 definiert) und liegt auf der Rotationsachse des Filterschlauchs. Durch die Nutzung der Symmetrie kann die Hälfte der Berechnungszellen eingespart werden. Die Symmetriebildung ist an dieser Stelle nur zulässig, wenn der Filter als ebenfalls symmetrisch angesehen wird, andernfalls muss dieser vollumfänglich modelliert und berechnet werden. Im gewählten Fall ist der Filter kreisförmig und somit die Verwendbarkeit der Symmetrieebene gegeben.

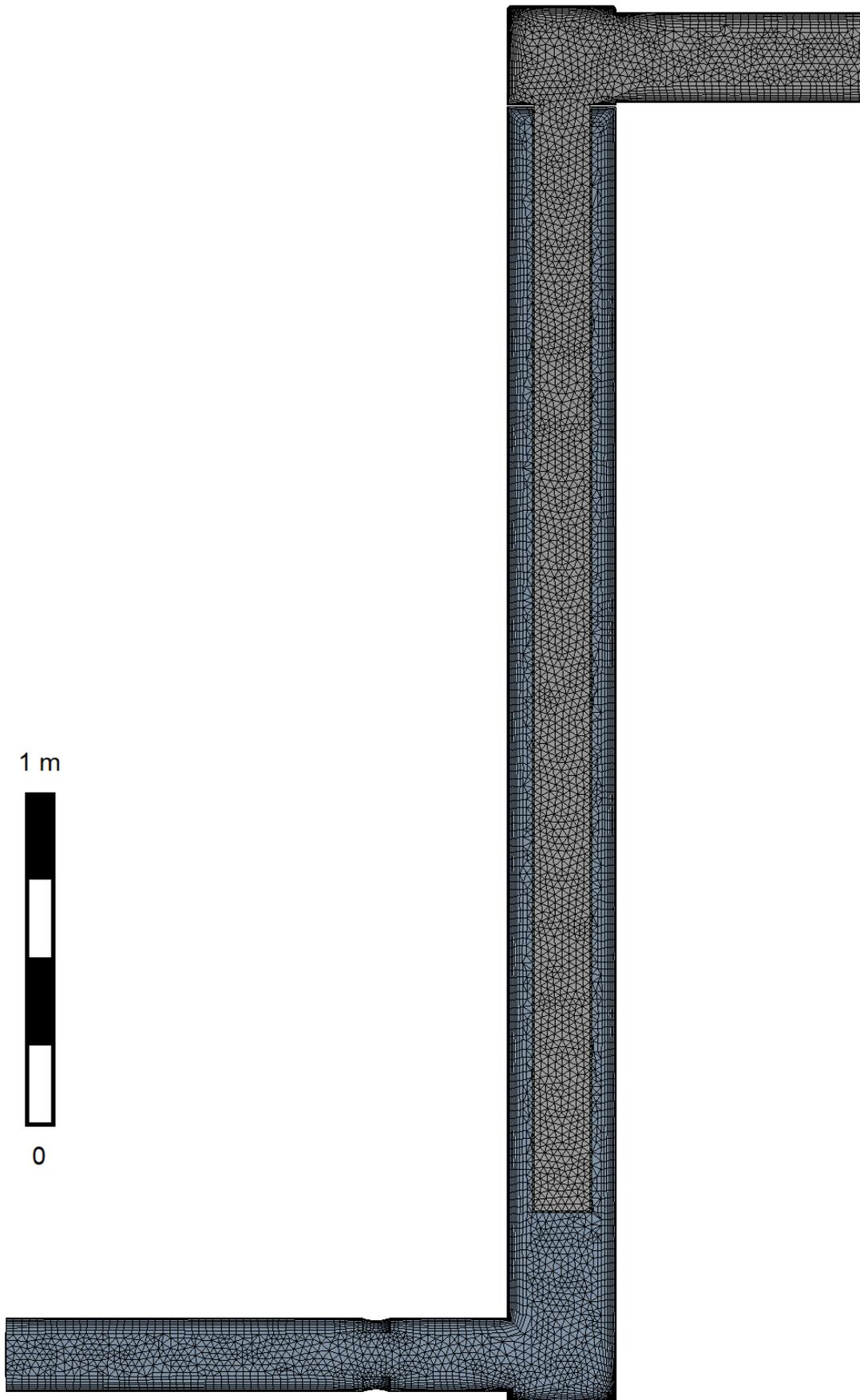


Abbildung 6.3: Diskretisierung der Teststandgeometrie

### 6.3.2 Diskretisierung

In der Filterkammer ist die Strömungsgeschwindigkeit zu großen Teilen sehr gering und weist bis auf die Zuströmung des Rohgases nur geringe Gradienten auf. Eine sehr feine Vernetzung ist in diesen Bereichen nicht notwendig. An den Wänden wird auf eine Prismenschicht zurückgegriffen, um die Grenzschicht korrekt abzubilden. Ob die Vernetzung ausreichend fein ist, wird anhand einer stationären Strömungssimulation mit vergleichbaren Randbedingungen wie die der finalen Simulation durchgeführt, jedoch ohne die Berechnung der dispersen Phasen. Anhand der Residuen der Ergebnisgrößen lässt sich die Qualität der Diskretisierung ablesen. Das finale Netz ist in Abbildung 6.3 dargestellt und besteht aus ca.  $1,2 \cdot 10^6$  Elementen sowie  $475 \cdot 10^3$  Knoten.

### 6.3.3 Fluidmodelle

Im Fluidmodell werden die Eigenschaften des Trägerfluids angegeben. Es handelt sich dabei um Umgebungsluft bei einer Temperatur von  $20\text{ °C}$  und einem Luftdruck von  $1,013\text{ bar}$ . Da es sich um ein kompressibles Medium handelt, sind die Gleichungen der thermischen Energie zu lösen. Das Fluid hat einen Volumenanteil von  $0,99999875$  (vgl. folgender Abschnitt).

### 6.3.4 Partikelmodelle

Die Partikeln sind aufgrund ihrer hohen Anzahl als Kontinua zu betrachten. Entsprechend wird ein Euler-Euler-Modell gewählt. Um den unterschiedlichen Partikelfraktionen Rechnung zu tragen, werden die Partikeln in drei Hauptfraktionen unterteilt:

- Fein ( $< 2,5\ \mu\text{m}$ )
- Mittel ( $2,5 \dots 10\ \mu\text{m}$ )
- Grob ( $> 10\ \mu\text{m}$ )

#### Berechnung der Partikeldurchmesser

Für die Simulation ist ein repräsentativer Partikeldurchmesser anzugeben. Dieser wird anhand der ermittelten Partikelgrößenverteilung bestimmt (Abbildung 6.4). Hierzu wird folgender Ansatz verwendet:

$$D_{rep} = \frac{\sum_{D,Frak,Min}^{D,Frak,Max} (D \cdot q(D))}{\sum_{D,Frak,Min}^{D,Frak,Max} q(D)} \quad (6.1)$$

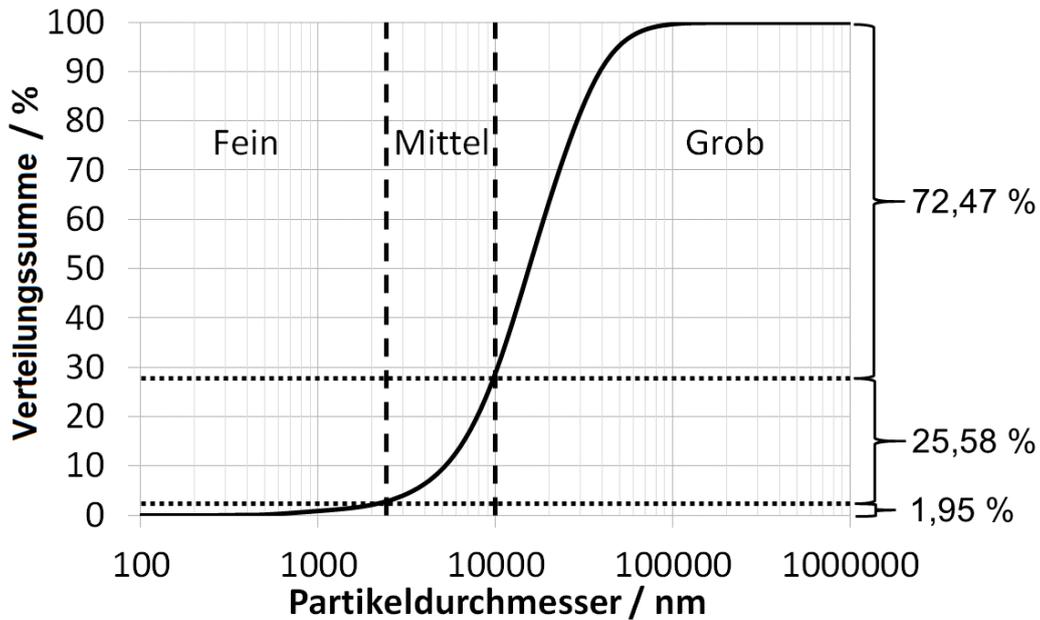


Abbildung 6.4: Partikelgrößenverteilung (volumenbezogen) mit den markierten Fraktionsgrenzen bei  $2,5 \mu\text{m}$  und  $10 \mu\text{m}$  sowie den entsprechenden prozentualen Volumenanteilen der Fraktionen

Daraus ergeben sich die in Tabelle 6.1 dargestellten repräsentativen Durchmesser für die einzelnen Fraktionen.

Tabelle 6.1: Repräsentative Durchmesser der einzelnen Fraktionen

Fraktion	Bereich	repräsentativer Durchmesser
Fein	$< 2,5 \mu\text{m}$	$2,06 \mu\text{m}$
Mittel	$2,5 \dots 10 \mu\text{m}$	$7,50 \mu\text{m}$
Grob	$> 10 \mu\text{m}$	$27,22 \mu\text{m}$

### Berechnung der Volumenanteile

Als weiterer Eingangsparameter der numerischen Simulation sind die Volumenanteile der einzelnen Partikeln am Einlass des Simulationsraums zu bestimmen. Hierzu ist die Partikelkonzentration des einströmenden Gases relevant. Diese ist auf  $3000 \text{ mg}/\text{m}^3$  eingestellt. Auf Basis der Verteilungssummenfunktion des verwendeten Staubs ist der Anteil der Fraktionen zu ermitteln (vgl. Abbildung 6.4). Mithilfe der Materialdichte des Staubs von  $2.400 \text{ kg}/\text{m}^3$  ergibt sich ein Gesamtvolumenanteil des Staubs von  $1,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Dieser Gesamtvolumenanteil teilt sich entsprechend der Anteile der Fraktionen auf. Die Ergebnisse für die drei Partikelfraktionen sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Der Volumenanteil des Trägergases ergibt sich aus:

$$\phi_{Luft} = 1 - (\phi_{Fein} + \phi_{Mittel} + \phi_{Grob}) \quad (6.2)$$

Tabelle 6.2: Volumenanteil der einzelnen Partikelfractionen am Gesamtvolumenstrom

Fraktion	Volumenanteil
Fein	$2,43625 \cdot 10^{-8}$
Mittel	$3,19775 \cdot 10^{-7}$
Grob	$9,058625 \cdot 10^{-7}$

Somit beträgt der Volumenanteil der Luft in der Strömung 0,99999875. Die Luftphase ist die primäre Phase.

### Wahl des Widerstandsmodells

Um die an den Partikeln wirkenden Widerstandskräfte zu modellieren, stehen vier Möglichkeiten zur Wahl:

- Schiller-Naumann
- Wen-Yu
- Gidaspow
- Widerstandsbeiwert

Nach Kołodziejczyk [68] stimmen die Modelle weitestgehend überein. Da für den verwendeten Staub keine experimentell ermittelten Daten zum Widerstandsbeiwert der Partikeln vorliegen, wird auf das Schiller-Naumann-Modell zurückgegriffen.

## 6.3.5 Randbedingungen

### Einlass

Der Eintritt in das System liegt einen Meter vor Eintritt der Filterkammer. Dort haben die dispergierten Partikeln in der realen Anlage bereits eine Wegstrecke von ca. zwei Metern zurückgelegt und sich somit über den Rohrquerschnitt verteilt. Es wird eine homogene Partikelverteilung über den Rohrquerschnitt angenommen. Als Randbedingung für das Fluid wird die Geschwindigkeit von  $1,77 \text{ m/s}$  gesetzt (entspricht einem Volumenstrom von  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Die Geschwindigkeit der Partikeln entspricht der des Fluids. Die Turbulenz der Einströmung wird auf einen mittleren Wert von 5 % gesetzt. Die Geschwindigkeit ist an der Einlassrandbedingung über den Querschnitt homogen verteilt. Das entsprechende Geschwindigkeitsprofil bildet sich bis zum Eintritt in die Filterkammer selbstständig aus. Gleiches gilt für die Partikeln. Diese werden ebenso, homogen über den Querschnitt verteilt, in das System eingebracht.

## Auslass

Am Auslass befindet sich ein Volumenstrommesser, sodass an dieser Stelle ein gemessener Wert von  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  für die Randbedingung bekannt ist. Bezogen auf die Querschnittsfläche des DN250 Rohrs, ergibt sich eine Abströmgeschwindigkeit von  $1,13 \text{ m/s}$ , welche als uniform über die Querschnittsfläche angenommen werden kann, wenn das Auslassrohr ausreichend weit verlängert wird und sich somit am Auslass eine gleichmäßige Strömung einstellt.

## Wände

Die Wände des Simulationsraums sind adiabatisch mit einer no-slip-Randbedingung definiert. Die Geschwindigkeit an der Rohrwand beträgt somit null. Weiterhin ist die Rauigkeit aller Wände als *rau* definiert. Die Innenwand der Wickelfalzrohre wird nicht genauer modelliert. Eine Partikelabscheidung an den Wänden ist ausgeschlossen, sodass zwangsläufig alle in das System eingebrachten Partikel am Filter abgeschieden werden.

## Filter

Für die Modellierung des Filters ist eine zweigeteilte Herangehensweise notwendig. CFX bietet keine direkte Modellierung eines Staubkuchens an, jedoch Hilfsmittel, mit denen eine solche Modellierung selbstständig implementiert werden kann. Die staubabscheidende Wirkung des konditionierten Filtermediums erzeugt zum Einen einen Druckverlust, zum Anderen verhindert es, dass Partikel aus der Domäne des Rohrgases in die des Reingases übertreten können. Also muss das Filtermedium in der Simulation die Partikelphasen aus der Strömung entfernen. Dies geschieht über eine Kontinuumssenke. Um diese zu implementieren, ist eine Subdomain im Bereich des Filters notwendig. Hier kann für jede Partikelphase unter *FluidSources* → *Partikelphase* → *ParticleEuler* → *Continuity* → *TotalFluidMassSource* die Expression:

`-ParticleEuler.massFlow()@Inlet`

eingetragen werden. Da die Partikelphasen in der Simulation kontinuierlich als Anteil der ebenfalls konstanten Einströmung in das System eingebracht werden, können diese über oben genannte Expression am Interface zwischen Rohrgas und Filter wieder entfernt werden. Die dazugehörigen Geschwindigkeitskomponenten werden auf null gesetzt. Durch diesen Ansatz wird das Moment der Partikel entfernt und somit eine Abscheidung der Partikel am Filtermedium nachgebildet. Zusätzlich wird eine Modellierung des in Gleichung 2.16 vorgestellten Faktors  $K_{SK}$  notwendig, um den steigenden Druckverlust infolge der Bildung des Staubkuchens zu modellieren.

Hierzu wird in der Filter-Domäne ein *ResistanceLossCoefficient* verwendet. In diesem werden die im Filter abgeschiedenen Partikel mit einem Faktor multipliziert und führen somit zu einem Druckverlust in Abhängigkeit zur Menge der abgeschiedenen Partikel.

$$(\text{ParticleEuler.Volume Fraction} + \text{ParticleEulerFein.Volume Fraction} + \text{ParticleEulerGrob.Volume Fraction}) \cdot K \cdot 1 [m^{-1}]$$

Der Koeffizient  $K$ , welcher eine Beziehung zwischen abgedehntem Volumenanteil und hierdurch entstandenem Druckverlust herstellt, muss anhand der Messergebnisse berechnet werden. Dieser lässt sich aus dem spezifischen Staubkuchenwiderstand  $K'_{SK}$  ableiten.

## 6.3.6 Solvereinstellungen

### Zeitschrittweite

Es wird eine transiente Simulation durchgeführt, da der zeitliche Verlauf der Staubkuchenbildung von Interesse ist. Um eine stabile Berechnung zu erhalten, werden anhand der auftretenden Maximalgeschwindigkeiten und der jeweiligen Diskretisierungsgröße zunächst die lokalen CFL-Zahlen ermittelt. Als Kriterium für eine stabile transiente Simulation gilt [69]:

$$CFL \leq 1 \tag{6.3}$$

Die CFL-Zahl errechnet sich wie folgt:

$$CFL = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x} \tag{6.4}$$

Mit: Geschwindigkeit  $v$ ; Zeit  $t$ ; Elementgröße  $\Delta x$

Bei gegebenem globalen Zeitschritt kann demnach für jedes Element eine CFL-Zahl ermittelt werden. Bei einem Zeitschritt von  $\Delta t = 1$  s ergibt sich eine maximale CFL-Zahl von 2.641. Entsprechend des linearen Zusammenhangs muss demnach die Zeitschrittweite der Simulation auf  $\Delta t = 3,79 \cdot 10^{-4}$  s eingestellt werden, um eine CFL-Zahl kleiner eins zu erhalten. Bei der Nutzung eines impliziten Lösungsverfahrens kann eine CFL-Zahl größer eins ebenfalls zu einer stabilen Lösung führen, was durch Betrachten der Konvergenz der Residuen überprüft werden kann. Konvergiert die Lösung trotz höherer CFL-Zahl zuverlässig bei jedem Zeitschritt, ist das Lösungsverfahren stabil. Es ist zu beobachten, dass unter den gegebenen Randbedingungen auch CFL-Zahlen größer eins zu einer stabilen Lösung führen. Die finale Simulation wird mit einer Zeitschrittweite von 0,01 s und einer CFL-Zahl von 26,41 durchgeführt. Die Lösung konvergiert während des Lösungsprozesses und ist somit stabil.

### Konvergenzkriterium

Das Konvergenzkriterium wird anhand zweier Werte festgelegt. Die Konvergenzkriterien sind die Anzahl der Iterationen je Zeitschritt und das Erreichen bestimmter Resi-

duen. Trifft eines der Kriterien zu, gilt die Lösung als konvergiert und der nächste Zeitschritt wird berechnet. Für die Simulationen zeigt sich ein Konvergenzkriterium der RMS-Residuen von  $1 \cdot 10^{-4}$  und eine maximale Anzahl an Iterationen je Zeitschritt von 20 als ausreichend.

### 6.3.7 Initialisierung

Bei der numerischen Untersuchung des Teststands wird auf ein initiales Strömungsfeld zurückgegriffen. Dies ist notwendig, da die transiente Berechnung ansonsten bei einer Strömungsgeschwindigkeit von null für den gesamten Berechnungsraum startet. Dies bildet die durchgeführten Versuche nur unzureichend ab. Im Versuch wird die Anlage zunächst ohne Partikelzufuhr betrieben, bis sich ein stabiler Zustand einstellt. Der stabile Zustand zeichnet sich dadurch aus, dass sich Differenzdruck und Volumenströme stabilisieren. Nach der Stabilisierung der Werte wird die Partikelzufuhr aktiviert und die Partikeln verteilen sich von der Dispergierdüse aus im System. Um den Vorgang nachzubilden wird zunächst ein stationäres Strömungsfeld für die Filteranlage berechnet. Dies geschieht ohne die Betrachtung der dispersen Phasen. Die restlichen Randbedingungen entsprechen den im vorherigen Abschnitt vorgestellten. Das Ergebnis aus dieser Simulation wird als Initialbedingung für die anschließende transiente Simulation genutzt. In dieser transienten Simulation werden die dispersen Phasen berechnet, um so die Partikelbewegung durch die Anlage zu analysieren.

## 6.4 Simulationsergebnisse

Abbildung 6.5 zeigt die Strömung im unteren Teil des Filterschlauchs über einen Zeitraum von einer Sekunde. Dargestellt ist die Summe Partikelkonzentration aller Fraktionen. Am Boden des Filterschlauchs bilden sich turbulente Ablösungen der Strömung. Diese Turbulenzen bewegen sich vom Boden des Filterschlauchs weg bis zum oberen Ende der Filterkammer und führen dazu, dass das Filtermedium stets mit variierenden Partikelkonzentrationen belastet wird. Daraus folgt, dass das Wachstum des Staubkuchens ebenfalls fluktuiert. Die entstehenden Wirbel passen zu den gemessenen Schwingungen des Filterschlauchs, welche in Abschnitt 5.7 beschrieben sind.

Ausgewertet werden die Daten für einen Bereich des Filters auf einer Höhe von 2,5 . . . 2,6 m direkt auf der Oberfläche des Filterschlauchs. Dies ist der Bereich der Messstelle 2 (vgl. Abbildung 5.7). Alle Werte werden über die Mantelfläche gemittelt. In den Abbildungen 6.6 bis 6.9 sind die Ergebnisse dargestellt. Zusätzlich ist in jeder Abbildung auch der gleitende Mittelwert über 100 Messwerte vermerkt.

In Abbildung 6.6 ist die Dicke des Staubkuchens dargestellt. Über einen Zeitraum von ca. zehn Sekunden erhöht sich die Dicke des Staubkuchens um ca.  $1,8 \mu\text{m}$ . Das Wachstum ist

streng monoton steigend und somit, für einen inkompressiblen Staubkuchen, plausibel. Im Mittel beträgt das Wachstum  $11,03 \mu\text{m}/\text{min}$ . Vergleichend ist in Abbildung 6.7 die Ableitung der Staubkuchendicke nach der Zeit und somit das Wachstum des Staubkuchens dargestellt. Es zeigen sich deutliche Fluktuationen des Wachstums mit Schwankungen von  $0 \dots 40 \mu\text{m}/\text{min}$ . Der arithmetische Mittelwert des Wachstums liegt bei  $11,03 \mu\text{m}/\text{min}$  und entspricht damit erwartungsgemäß dem Anstieg der Staubkuchendicke aus Abbildung 6.6. Abbildung 6.8 stellt den Druckverlust dar. Dieser wird analog zum Messaufbau in der Nähe der Trennung zwischen Roh- und Reingasseite ermittelt. Hierzu wird der statische Druck auf zwei Ebenen, die an den Positionen der Ringmessstellen liegen, gemittelt. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Druckverlust in etwa der Kurve der Staubkuchendicke folgt, jedoch größere Schwankungen aufweist. Der Verlauf des Druckverlusts weist große Ähnlichkeit mit den aufgenommenen Druckverlustkurven am Filterschlauchteststand auf. Die Fluktuationen entstehen aus einer Überlagerung von zwei Effekten: Druckschwankung infolge der Strömung und Druckverlustanstieg infolge des Staubkuchenwachstums. Dies erklärt auch die vorkommenden Druckverlustabfälle. Die Druckverlustschwankungen infolge der Strömung sind deutlich ausgeprägter als der Druckverlustanstieg wegen des Staubkuchenwachstum und dominieren so den Kurvenverlauf. Der Druckverlustanstieg beträgt im Mittel  $935 \text{ mPa}/\text{s}$ .

Abbildung 6.9 stellt den Quotienten aus Druckverluständerung und Änderung der Staubkuchendicke über die Zeit dar. Der Wert sagt also aus, welcher Druckverlustanstieg durch einen Staubkuchenanstieg erzeugt wird. Es zeigen sich ausgeprägte Schwankungen um den Mittelwert. Zu erwarten ist ein annähernd konstanter Wert bei einer ideal homogenen Strömung im Inneren der Filterkammer. Negative Werte treten auf, sind jedoch unplausibel und auf die Fluktuationen im Druckverlust zurückzuführen. Im gleitenden Mittel zeigt sich ein deutlich glatterer Verlauf, mit nur selten auftretenden negativen Werten. Der Mittelwert liegt über den gesamten Zeitraum betrachtet bei  $10,85 \text{ Pa}/\mu\text{m}$  und ist damit klar positiv. Je Mikrometer Staubkuchenzuwachs, tritt also ein um  $10,85 \text{ Pa}$  höherer Druckverlust auf.

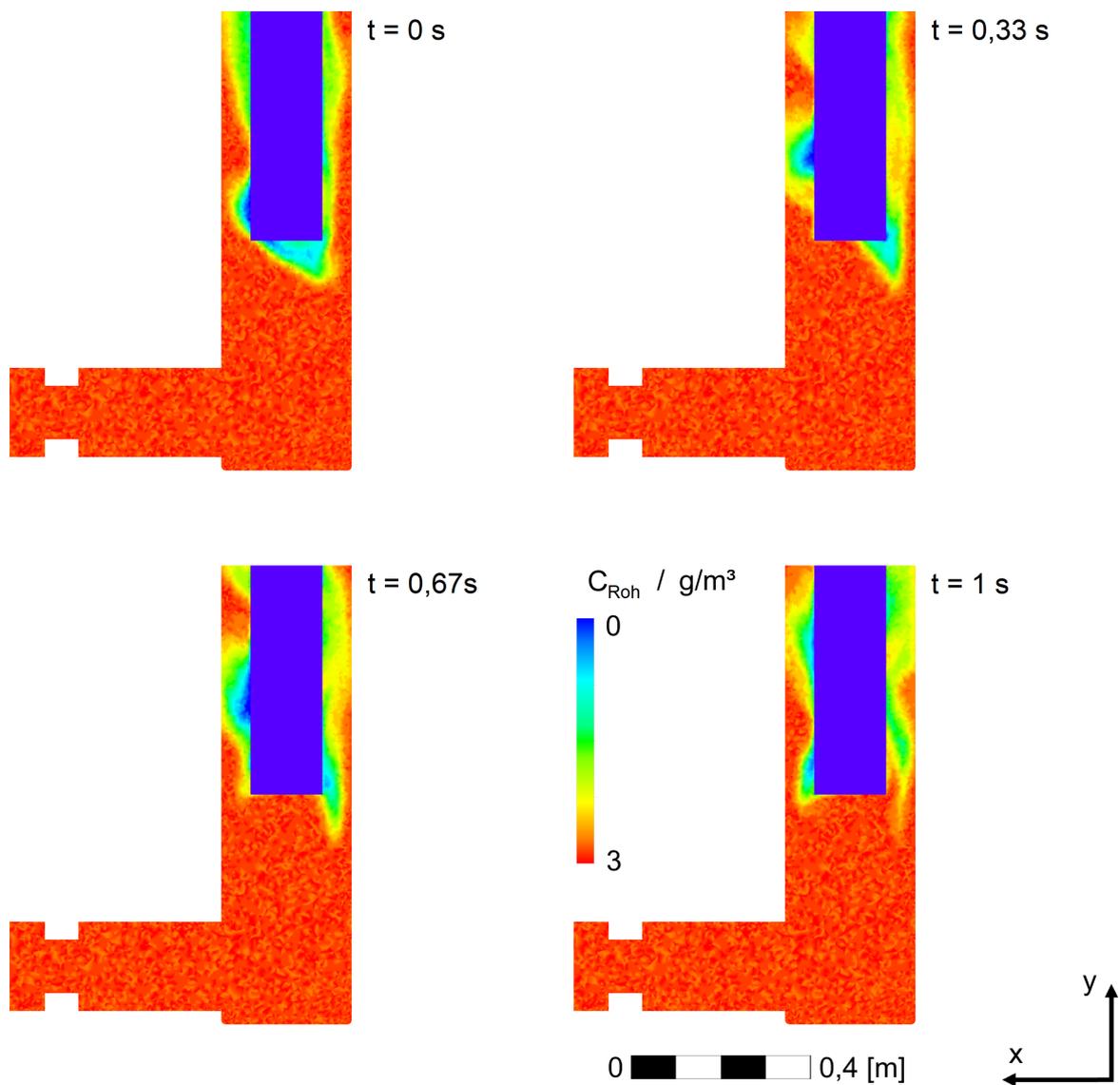


Abbildung 6.5: Strömung am unteren Ende des Filterschlauchs (Gesamtdauer 1 s). Es bilden sich Strömungswirbel, welche sich entlang des Filterschlauchs bewegen. Dargestellt ist die Gesamtpartikelkonzentration, gebildet aus der Summe der Partikelkonzentrationen der drei Fraktionen

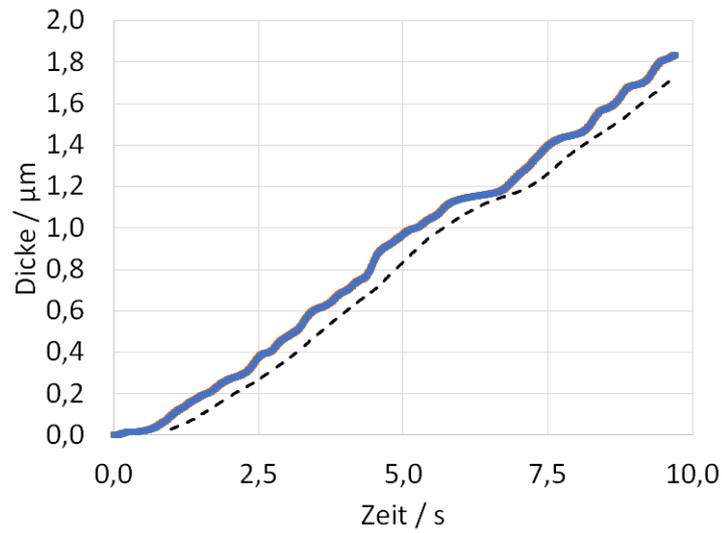


Abbildung 6.6: Zeitliche Entwicklung der Dicke des Staubkuchens basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchung (Strichlinie zeigt den gleitenden Mittelwert über 100 Messwerte an)

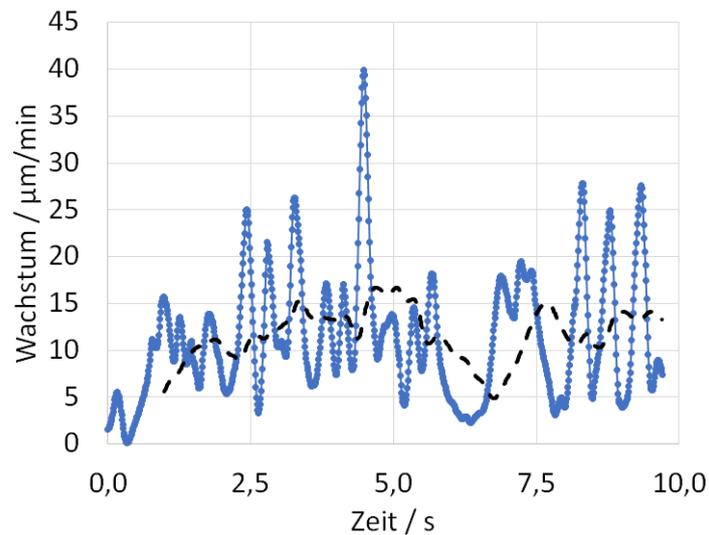


Abbildung 6.7: Wachstum des Staubkuchens basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchung (Strichlinie zeigt den gleitenden Mittelwert über 100 Messwerte an)

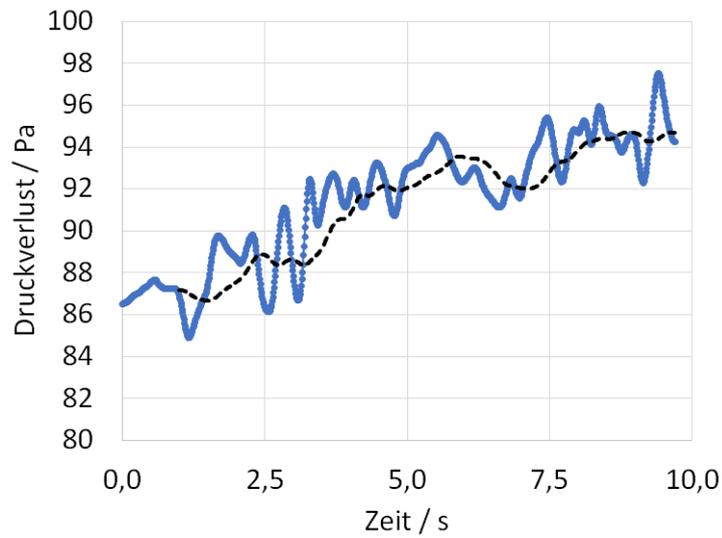


Abbildung 6.8: Zeitliche Entwicklung des Druckverlusts der Anlage basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchung (mittlerer Druckverlustanstieg:  $935 \text{ mPa/s}$ , Strichlinie zeigt den gleitenden Mittelwert über 100 Messwerte an)

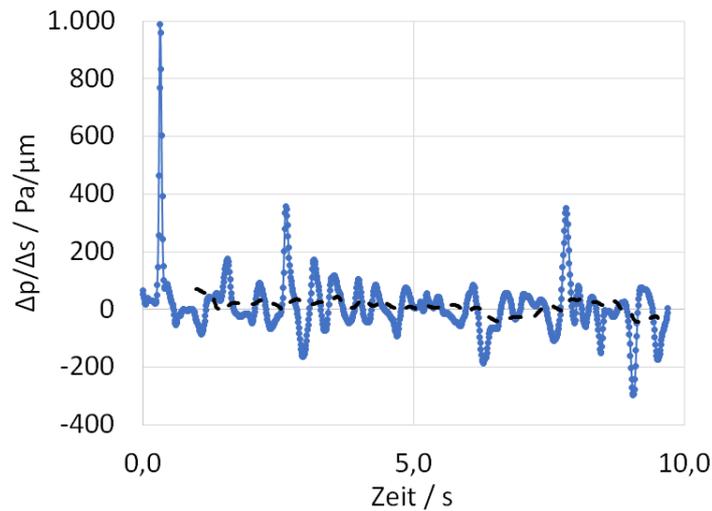


Abbildung 6.9: Darstellung des Quotienten aus Druckverluständerung und Staubkuchendicke über die Zeit basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchung (Strichlinie zeigt den gleitenden Mittelwert über 100 Messwerte an)



# Kapitel 7

## Vergleich und kritische Bewertung der Ergebnisse

### 7.1 Ziel des Vergleichs

In den vorherigen Kapiteln werden Ergebnisse sowohl durch Experimente, als auch numerische Simulation generiert. Das aktuelle Kapitel dient dem Vergleich der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung am Filterschlauchtteststand (Kapitel 5) und der numerischen Simulation (Kapitel 6). Dieser Vergleich dient dem Beweis der eingangs aufgestellten These III, wonach die Messergebnisse der Staubkuchendicke dazu geeignet sind, der numerischen Simulation als Validierungsgröße zu dienen.

Weiterhin werden die gewonnenen Ergebnisse aus den Kapiteln 3 bis 6 kritisch diskutiert und hinsichtlich ihrer Plausibilität bewertet.

### 7.2 Ergebnisvergleich von Experiment und Simulation

#### 7.2.1 Staubkuchendicke

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente und der numerischen Untersuchung entstammen gleichen Randbedingungen. Die Volumenströme in der Anlage werden durch die Regelung auf  $200 \text{ m}^3/\text{h}$  gehalten. Der Partikelgrößenverteilung der verwendeten Partikeln wird, mithilfe der Unterteilung in drei repräsentative Fraktionen, in der numerischen Simulation Rechnung getragen. Eine Rohgaskonzentration von  $3 \text{ g}/\text{m}^3$  ist ebenfalls in beiden Fällen gegeben. Mit dem Druckverlust ist eine wesentliche Ergebnisgröße direkt von den Ergebnissen des Experiments geprägt, da dieser über den spezifischen Staubkuchenwiderstand  $K'_{SK}$  in der Simulation modelliert wird. Aufgrund dieses verwendeten Modells in der numerischen Analyse sind nur geringe Abweichungen zwischen Experiment und Simulation zu erwarten. In den Abbildungen 5.9 und 6.6 sind die Ergebnisse des Staubkuchenwachstums dargestellt. In beiden Fällen steigt die Staubkuchendicke, bis auf

wenige Ausnahmen im Experiment, streng monoton an. Ebenso weisen beide Graphen Fluktuationen im Wachstum des Staubkuchens auf. Bei der Simulation ist die Quelle der Fluktuationen nachvollziehbar. Es handelt sich dabei um Verwirbelungen der Strömung, welche am Boden des Filterschlauchs entstehen (vgl. Abbildung 6.5). Diese bewegen sich entlang des Filterschlauchs fort und erzeugen so auch im oberen Bereich des Filters eine heterogene, transiente Anströmung. Daraus resultiert wiederum eine ungleichmäßige Abscheidung von Partikeln am Filter. Die Ergebnisse aus Experimenten und Simulation stimmen überein.

## 7.2.2 Staubkuchenwachstum

Das Wachstum des Staubkuchens wird über die Ableitung der Schichtdicke bestimmt. Die Werte für das Staubkuchenwachstum betragen im Experiment  $10,42 \mu\text{m}/\text{min}$ . In der Simulation beträgt der Wert des Wachstums im Mittel  $11,03 \mu\text{m}/\text{min}$ . Es besteht also eine geringe Abweichung von ca. 6%. Durch die Simulation nicht berücksichtigt sind Partikelablagerungen abseits des Filters.

## 7.2.3 Druckverlust

Auf Basis der abgeschiedenen Partikeln wird in der Simulation der Druckverlust berechnet. Dessen Verlauf zeigt Übereinstimmungen mit dem der Staubkuchendicke, jedoch lassen sich auch Abweichungen erkennen. Diese sind wiederum auf Inhomogenitäten der Strömung zurückzuführen, welche eine Druckverteilung bewirkt. Diese aus dem Strömungsfeld resultierende Druckverteilung unterscheidet sich von der Druckverteilung infolge des Staubkuchens. Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt ähnliche Verläufe des Druckverlusts. Der Anstieg des Druckverlusts ist im Experiment in einem Zeitintervall von zehn Sekunden annähernd linear. Selbiges lässt sich an den Ergebnissen der Simulation ablesen. Auch die zeitlichen Druckverlustanstiege liegen bei beiden Kurven nah beieinander. Der Anstieg weist im Experiment einen Wert von ca.  $828 \text{ mPa}/\text{s}$  auf. Anhand der Ergebnisse der Simulation lässt sich der Druckverlustanstieg auf  $935 \text{ mPa}/\text{s}$  bestimmen. Die Abweichung beträgt damit ca. 13%.

## 7.3 Kritische Diskussion der Ergebnisse

### 7.3.1 Ergebnisse des Lasertriangulationsteststands

Das Ziel des Lasertriangulationsteststands ist die Bewertung von Einflussparametern hinsichtlich der Messung der Staubkuchendicke. Untersucht wurde der Einfluss der folgenden Parameter:

- Messverfahren
- Messposition und Ausrichtung
- Transmission transparenter Materialien
- Verschmutzung
- Material und Farbe des Messobjekts
- Art des Referenzmessobjekts

#### **Messverfahren**

Das geeignete Messverfahren wird ermittelt, indem Messergebnisse aufgenommen und diese anschließend hinsichtlich ihrer Validität bewertet werden. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine Messung mit nur einem Sensor nicht zielführend ist. Die Ergebnisse der Messreihen mit einem Sensor zeigen Verläufe, welche nicht den Erwartungen entsprechen. Die Ursache ist hierbei auf die fehlende Messreferenz zurückzuführen. Die Nutzung der Ausgleichsfunktion zeigt keine deutliche Verbesserung. Die Messungen wurden mit einem Filtermedium und einer Staubart durchgeführt. Es ist also möglich, dass valide Ergebnisse unter anderen Konstellationen möglich sind. Für das Differenzmessverfahren mit zwei Sensoren zeigen sich sehr gute Ergebnisse. Der Messwert ist unabhängig vom Druckverlust und somit von der Verformung des Filters. Dies bedeutet, dass eine Referenz existiert und somit der störende Einfluss der Verformung auf das Messsystem eliminiert ist.

#### **Messposition und Ausrichtung**

Als Messposition werden vier Positionen, bezogen auf den Stützkorb, untersucht. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Messwerts von der Messposition. An der Position d) (vgl. Abbildung 3.14) sind die auftretenden Verformungen zu hoch, sodass das Messsystem einen Fehler ausgibt. Die Werte zeigen trotzdem eine deutliche Verschiebung der Referenz.

## **Transmission transparenter Materialien**

Hinsichtlich der Transmission transparenter Materialien zeigt sich, dass dies zu einer absoluten und konstanten Messabweichung führt, wenn der Laser senkrecht auf das transparente Medium trifft. Die Abweichung ist einmalig bei der Installation zu beachten, da ansonsten Messfehler möglich sind. Eine analytische Gleichung zur Berechnung der Messabweichung ist mit Gleichung 3.11 hergeleitet wurden. Die Werte stimmen jedoch nicht mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung überein. Somit ist die Messabweichung experimentell zu bestimmen.

## **Verschmutzung**

Zur Bewertung der Verschmutzung werden experimentelle und modellhafte Untersuchungen durchgeführt. Relevant ist die Verschmutzung, da die Transmission des Laserstrahls beeinträchtigt werden kann und eine Verschmutzung des Referenzmessobjekts zu Messabweichungen führt. Sowohl die experimentellen als auch die modellhaften Untersuchungen zeigen eine sehr geringe Verschmutzungsneigung. Die experimentellen Ergebnisse werden durch die Auswertung von Mikroskopaufnahmen gewonnen. Nur sehr wenige Partikeln werden während eines Filtrationsprozesses auf dem Referenzmessobjekt abgeschieden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass eine Partikel genau auf der Messstelle abgeschieden wird und so zu einer Anomalie der Messwerte führt. Solche Anomalien konnten durch die Untersuchung von luftdurchlässigen Referenzmessobjekten nachgewiesen werden. Bei der Nutzung des luftundurchlässigen Referenzmessobjekts konnten keine Anomalien festgestellt werden. Die Modellberechnung der Verschmutzung basiert auf reduzierten Randbedingungen. So bleiben beispielsweise die Schwerkraft und auch die Rotation von Partikeln unberücksichtigt. Auch beruht die Berechnung des Strömungsfelds auf der vereinfachten Annahme einer ebenen Staupunktströmung. In der Realität ist zu erwarten, dass sich die Stromlinien an den Rändern des Referenzmessobjekts wieder in Richtung ihrer ursprünglichen Bewegung ändern. Die Ergebnisse hinsichtlich der Verschmutzungsneigung zeigen valide Kurven, welche so auch bei der Analyse von Impaktoren ermittelt wurden.

## **Material und Farbe des Messobjekts**

Das Material und die Farbe des Referenzmessobjekts beeinflussen zum Teil die Ergebnisse der Messung. Einige, speziell dunkle und raue Oberflächen, reflektieren nur einen kleinen Teil des empfangenen Lichts und erschweren so die Auswertung der Messung. Es wurden acht verschiedene Materialien bzw. Farben untersucht. Speziell hinsichtlich der Partikeln ist nicht auszuschließen, dass andere Stäube ggf. ein anderes Reflexionsspektrum aufweisen und somit für die Messmethode ungeeignet sind.

## **Art des Referenzmessobjekts**

Die Wahl eines geeigneten Referenzmessobjekts ist wesentlich für die Gewinnung valider Messwerte. Es wurden drei Ansätze untersucht, wovon sich einzig das Tape als vollständig geeignet herausstellt. Bezüglich der beiden ungeeigneten Ansätze wird aufgezeigt, aus welchem Grund diese ungeeignet sind.

### **7.3.2 Ergebnisse des Filterstreifenteststands**

Am Filterstreifenteststand werden Versuche zur Messung der Staubkuchendicke durchgeführt. Der Teststand wird bereits für die Ergebniserhebung anderer Veröffentlichungen genutzt [25]. Um das Lasertriangulationsmesssystem nutzen zu können ist es aufgrund des eingeschränkten Messbereichs der Sensoren notwendig, den Teststand zu modifizieren. Dabei wird der Querschnitt des Rohgaskanals wesentlich verkleinert. Der Einfluss dieses Umbaus auf die Strömungsbedingungen konnte nicht definiert werden. Die gemessenen Werte sind jedoch valide. Der Staubkuchen zeigt ein monotonen Wachstum, welches im erwarteten Bereich liegt. Das verwendete Partikelkonzentrationsmessgerät hat einen ungenügenden Messbereich. Somit bleiben ca. 10% der Partikeln (volumenbezogen) unberücksichtigt. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung entspricht das Wachstum des Staubkuchens dem, entsprechend der gemessenen Partikelkonzentration, erwarteten Wachstum.

Die Messung des Druckverlusts zeigt, dass die Messunsicherheit des verwendeten Differenzdrucksensors, bezogen auf die gemessenen Werte, zu hoch ist. Für die durchgeführten Versuche ist dies jedoch zu vernachlässigen, da lediglich der Zeitpunkt des Druckverlustanstiegs relevant ist.

### **7.3.3 Ergebnisse des Filterschlauchtteststands**

Der Filterschlauchtteststand dient der Untersuchung der Messmethode unter annähernd realistischen Bedingungen. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen ein Wachstum des Staubkuchens. Sowohl qualitativ, als auch quantitativ sind die Messergebnisse über mehrere Messreihen konsistent, sodass keine Degradation zu beobachten ist. Die Messtechnik am Prüfstand ist gemäß der Herstellerangaben kalibriert, sodass die gewonnenen Werte als valide einzustufen sind. In den Ergebniskurven ist ein zweistufiges Staubkuchenwachstum zu beobachten. In den ersten Sekunden liegt das Wachstum höher als im späteren Verlauf des Filtrationsprozesses. Zu erklären ist dies durch Staubrückstände, welche vom vorherigen Regenerierungsprozess stammen. Diese werden zu Beginn des Filtrationsprozesses aufgewirbelt und führen zu einem höheren Partikelmassenstrom zu Beginn des Prozesses.

### **7.3.4 Ergebnisse der numerischen Untersuchung**

Ziel der numerischen Simulation war es, die Staubverteilung und -abscheidung im Filterschlauchtteststand nachzubilden. Die Randbedingungen entsprechen den im Experiment ermittelten. Die Simulation ist abhängig von Parametern, welche experimentell bestimmt werden. So wird beispielsweise der Druckverlust über den spezifischen Staubkuchenwiderstand modelliert. Die Ergebnisse der Simulation stimmen sehr gut mit den bilanziell prognostizierten Ergebnissen überein. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen zeigen sich Abweichungen von ca. 6%. Dies kann damit erklärt werden, dass ein Teil der Partikeln bereits im System abgeschieden werden, bevor diese den Filter erreichen. Somit beruhen die aufgestellten bilanziellen Werte auf falschen Randbedingungen, im gegebenen Fall auf einer zu hohen Partikelkonzentration des Rohgases.

# Kapitel 8

## Schlussfolgerung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassendes Fazit

#### 8.1.1 Aufgestellte Thesen

Zu Beginn dieser Arbeit wurden drei Thesen aufgestellt:

These I: Mithilfe eines optischen Messverfahrens lässt sich die zeitliche Änderung der Staubkuchendicke eines Filterschlauchs während des Betriebs erfassen, ohne die Strömung und den Filtrationsprozess zu beeinflussen.

These II: Die mit der Lasertriangulation ermittelten Messwerte sind als Eingangsparmeter für die Regenerierungssteuerung einer Schlauchfilteranlage geeignet und liefern potenziell einen Beitrag zur Verminderung der Degradation der Filterschläuche im Vergleich zur Regenerierungssteuerung mittels Druckverlust.

These III: Die Ergebnisse der Messung der Staubkuchendicke mittels Lasertriangulation sind als zusätzliche Validierungsgröße für eine numerische Simulation des Filtrationsprozesses geeignet.

Im Folgenden werden die Thesen einzeln bewertet und die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Zusätzlich haben sich im Verlauf der durchgeführten Arbeiten weitere Erkenntnisse ergeben, welche in keinem direkten Zusammenhang zu den zuvor aufgestellten Thesen stehen.

#### 8.1.2 Auswertung These I

Um die Eignung des Messverfahrens zu untersuchen, wurden zahlreiche Versuche an insgesamt vier Testständen durchgeführt. Zunächst wurden die Parameter ermittelt, welche einen Einfluss auf die Messung haben. Anschließend wurde untersucht, ob die Messung

mit nur einem Lasertriangulationssensor möglich ist. Hierbei wurde erkannt, dass die Verformung des Filtermediums infolge des Druckverlusts zwischen Roh- und Reingas einen hohen Einfluss auf die Messung hat. Die Verformung wirkt in entgegengesetzter Richtung zum Wachstum des Staubkuchens. Dies führte dazu, dass die Messergebnisse ein negatives Wachstum des Staubkuchens zeigen. Um die Verformung auszugleichen, wurde ein Algorithmus entwickelt. Dieser stellt eine Korrelation zwischen Druckverlust und Verformung her. Mithilfe der so gewonnenen Funktion lassen sich die Messergebnisse hinsichtlich ihrer Ursache in Verformung und Wachstum des Staubkuchens aufteilen. Es zeigt sich jedoch, dass die Ausgleichsfunktion von der Staubkuchendicke abhängig ist. Zudem ist die Verformung des Filtermediums deutlich höher als die Dicke des Staubkuchens, wodurch das Wachstum des Staubkuchens durch die Verformung überlagert wird. Im Ergebnis wurde das Messverfahren mit nur einem Sensor verworfen. Stattdessen wird ein zweiter Sensor verwendet, um eine Differenzmessung durchzuführen. Ein Sensor dient der Referenzierung während der andere Sensor der Messung der Staubkuchendicke dient. Auf diese Weise ist es möglich, die Verformung von der gemessenen Staubkuchendicke zu entkoppeln.

Wesentlich ist dabei die Wahl des Referenzmessobjekts. Nach der Analyse drei verschiedener Ansätze stellt sich die Verwendung eines luftundurchlässigen Tapes (z.B. Gewebeklebeband) als optimal heraus, da dieses einfach zu installieren ist und der Verformung des Filtermediums exakt folgt. Verschmutzungen auf dem Referenzmessobjekt würden die Referenzierung stören. Aus diesem Grund wurde untersucht, in welchem Maße sich Partikeln am Referenzmessobjekt abscheiden. Sowohl experimentelle Versuche als auch Modellrechnungen zeigen, dass nur ein sehr geringer Anteil der Partikeln abgeschieden wird. Auch über den Verlauf mehrerer Messreihen kann keine Anomalie gefunden werden, welche auf derartige Verschmutzungseffekte hinweist.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Wahl der geeigneten Messposition. Nach der Untersuchung von vier verschiedenen Positionen zeigt sich, dass die optimale Position direkt neben einem der axialen Stützkorbdrähte und mittig zwischen den Verstärkungsringen des Stützkorbs liegt. Um die Messtechnik zu schützen, ist diese idealerweise außerhalb der Filterkammer installiert. Um eine Messung zu gewährleisten ist ein Fenster notwendig, welches Einfluss auf die Messung besitzt. Die Durchquerung des Lasers durch das transparente Material erzeugt eine konstante Messabweichung, welche bei der Installation zu berücksichtigen ist. Die Oberfläche und Farbe eines Messobjektes ist ebenfalls für die Anwendung der Messmethode relevant. Dunkle, raue Oberflächen neigen dazu, einen hohen Anteil des Laserstrahls zu absorbieren statt zu reflektieren. Unter Umständen führt dies zu einer zu geringen Lichtintensität am Empfänger und so zu einem Ausfall der Messung. Mit den verwendeten Partikeln und einem schwarzen Gewebeklebeband kann dies nicht beobachtet werden. Bei der Verwendung sehr dunkler Partikeln ist jedoch im Vorfeld eine Überprüfung der Eignung notwendig.

Die gewonnenen Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Erwartungs-

werten und zeugen von einer Eignung des Messsystems unter den untersuchten Umständen. Eine Beeinflussung der Strömung und des Filtrationsprozesses ist im geringen Maße vorhanden, da das luftundurchlässige Referenzmessobjekt zu einer Strömungsanomalie führt.

These I ist somit grundsätzlich bestätigt. Das Messsystem ist zur Messung der Staubkuchendicke geeignet und weist nur einen sehr geringen Einfluss auf den Filtrationsprozess auf.

### **8.1.3 Auswertung These II**

Grundsätzlich besteht eine ausgeprägte Korrelation zwischen Druckverlust und Dicke des Staubkuchens, welche bereits durch Darcys Gesetz beschrieben ist (vgl. Gleichung 2.15). Bei Schlauchfilteranlagen wird die Regenerierung entweder über einen Grenzwert des gemessenen Druckverlusts oder über ein vorgegebenes Zeitintervall gesteuert. Sowohl bei vorzeitiger, als auch verspäteter Regenerierung, erhöht sich die Degradation der Filterschläuche. Aus diesem Grund ist es für den wirtschaftlichen Anlagenbetrieb notwendig, den idealen Zeitpunkt zur Regenerierung zu nutzen. Die Wirtschaftlichkeit ist eine Funktion des Energiebedarfs der Lüfter und der Degradation der Filterschläuche. Dabei hängt der Energiebedarf der Anlage maßgeblich von ihrem Druckverlust ab. Damit bietet die Regenerierung bei einem gewissen Druckverlust die Möglichkeit, direkt einen Wirtschaftlichkeitsfaktor zu berücksichtigen.

Bei der Druckverlustmessung wird ein Differenzdruck zwischen Roh- und Reingasseite gemessen. Entsprechend ist der gemessene Druckverlust ein Mittelwert über alle in der Filterkammer installierten Filterschläuche. Einzelne Filterschläuche können über diese Messmethode nicht überwacht werden, was für eine zielgerichtete Regenerierung und damit einer Minimierung der Degradation jedoch notwendig ist. An dieser Stelle bietet die Messung der Staubkuchendicke die Möglichkeit, das Wachstum des Staubkuchens dem Anstieg des Druckverlusts der Gesamtanlage gegenüberzustellen. Ein reduziertes Wachstum deutet darauf hin, dass der Filterschlauch einen erhöhten Druckverlust gegenüber dem Mittelwert der anderen Schläuche ausweist. Daraus lassen sich wiederum Rückschlüsse auf den Grad der Degradation ziehen und Filterschläuche können gezielt ausgetauscht werden. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ist jedoch auch das erhöhte Investitionsvolumen zu beachten.

Sowohl die Lasertriangulationssensoren, als auch die Präparation der Filterschläuche mit einem Referenzmessobjekt stellen Kostenfaktoren dar, welche es zu berücksichtigen gilt. Besonders in Bezug auf den erzielten Nutzen einer verlängerten Verwendbarkeit der Filterschläuche stellt sich die Frage, ob sich diese Faktoren ausgleichen. Es kommen hier vornehmlich Spezialfälle in Betracht, bei denen beispielsweise radioaktive Stäube abgeschieden werden. Hier können gegebenenfalls hohe Entsorgungskosten verringert werden,

was sich positiv auf die Betriebskosten der Anlage auswirkt.

These II ist somit bestätigt. Jedoch beschränkt sich die sinnvolle Anwendbarkeit des Messsystems voraussichtlich auf Spezialfälle.

### **8.1.4 Auswertung These III**

Die Vergleiche, welche im vorherigen Kapitel aufgestellt werden, zeigen, dass die Staubkuchendicke eine Größe ist, welche unter bestimmten Umständen als Validierungsgröße für numerische Simulationen genutzt werden kann. Dies ist jedoch an Bedingungen geknüpft. Um ein aussagekräftiges Ergebnis hinsichtlich der in der Simulation verwendeten Modelle zu gewinnen, sind die Eingangsparameter unabhängig zu wählen. Basiert die Berechnung auf einem experimentell ermittelten Wert, ist das Ergebnis meist bilanziell vergleichbar. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass der Druckverlust der Anlage über den spezifischen Staubkuchenwiderstand modelliert ist. Damit existiert ein Zusammenhang zwischen Staubkuchendicke und Druckverlust, welche rein auf einem empirischen Faktor beruht. Damit ist die Aussagekraft von Druckverlust und Staubkuchendicke im Ergebnis der Simulation gemindert. Dennoch eignet sich die Staubkuchendicke als Validierungsparameter, da sich über die Fluktuationen Rückschlüsse auf die vorherrschenden Strömungsbedingungen ziehen lassen. Starke Fluktuationen des Wachstums des Staubkuchens bedeuten verwirbelte Strömungen im Inneren der Filterkammer. Wird zusätzlich die Bildung und Durchströmung des Staubkuchens detailliert modelliert, sind die Ergebnisse der Simulation unabhängig von empirischen Werten wie dem Staubkuchenwiderstand. These III ist damit ebenfalls bestätigt.

### **8.1.5 Weitere Erkenntnisse**

Zusätzlich zu den aufgestellten Thesen ergeben sich weitere Erkenntnisse. Die Ergebnisse der Modellberechnung der Verschmutzung des Referenzmessobjekts stellen eine Weiterführung der Arbeiten zu Impaktoren dar. Diese bieten vergleichbare Bedingungen, wobei die in dieser Arbeit untersuchten Reynoldszahlen deutlich unter denen von Impaktoren liegen. Es zeigt sich, dass die Verschmutzungsneigung des Referenzmessobjekts, welche ähnlich dem Trenngrad von Impaktoren definiert ist, den gleichen qualitativen Verlauf aufweist. Zudem konnte gezeigt werden, dass bei zunehmender Breite des Referenzmessobjekts zwar absolut mehr Partikeln abgeschieden werden, die relative Abscheidung jedoch sinkt.

Aus den Messwerten der Staubkuchendicke lassen sich weitere Werte ableiten. Ist der Volumenstrom der Anlage bekannt, kann die Partikelkonzentration des Rohgases ermittelt werden. Die Messergebnisse zeigen in der Auswertung, dass die Ergebnisse aus direkter Partikelkonzentrationsmessung und Errechnung aus den Werten der Staubkuchendicke vergleichbar sind. Jedoch gilt zu beachten, dass je nach Anlagenkonfiguration ein gewis-

ser Anteil der Partikeln abgeschieden wird, bevor der Filter erreicht wird. Dieser Anteil wird über die Berechnung der Partikelkonzentration nicht berücksichtigt. Dies bietet die Möglichkeit, den Anteil der vor dem Filter abgeschiedenen Partikeln zu quantifizieren.

Zusätzlich zum Druckverlust der Anlage bietet die Staubkuchendicke die Möglichkeit, eine Kompression des Staubkuchens zu detektieren. Damit können die Prozessparameter einer Anlage überwacht oder das Kompressionsverhalten des Staubkuchens zu wissenschaftlichen Untersuchungen exakt und zeitlich aufgelöst untersucht werden.

Schließlich konnten Messwerte gewonnen werden, welche die initiale Staubkuchenbildung an einem Filter mit und ohne ePTFE-Beschichtung darstellen. Es zeigt sich, wie erwartet, eine Zeitverzögerung zwischen Anstieg des Druckverlusts und Anstieg der Staubkuchendicke. Die aufgenommenen Werte können der Fortentwicklung von Modellen zur Staubkuchenbildung dienen und zur Validierung genutzt werden.

## 8.2 Mögliche weiterführende Forschung

### 8.2.1 Simulation

Im Rahmen des Promotionsvorhabens wurden Überlegungen angestellt, wie eine mehrskalige numerische Analyse von Filtrationsvorgängen untersucht werden kann. Eine Möglichkeit hierfür ist es, die Filterkammer in drei Skalen aufzuteilen:

- Grobskalig
- Mittelskalig
- Feinskalig

Die Bereiche weisen die folgenden Parameter auf:

#### **Grobskaliger Bereich**

Der grobskalige Bereich umfasst die äußeren Areale der Filterkammer, sowie der Anströmung im Rohgasraum. Die genaue Analyse der Bewegung einzelner Partikeln ist von geringer Relevanz, weshalb auf eine grobe Vernetzung sowie auf einen Euler-Euler-Ansatz zurückzugreifen ist.

#### **Mittelskaliger Bereich**

Zwischen dem grob- und feinskaligen Bereich befindet sich der mittelskalige Bereich. Hier wird der Bereich in geringem Abstand zum Filter untersucht. Partikeln werden mithilfe des Lagrange-Ansatzes beschrieben, jedoch nicht geometrisch diskretisiert. Die Vernetzung ist im Bereich einiger Mikrometer bis hin zu Millimetern vorzunehmen.

## Feinskaliger Bereich

In diesem Bereich, in unmittelbarer Nähe zum bzw. im Filtermedium findet der eigentliche Prozess der Abscheidung statt. Modelliert werden die einzelnen Fasern des Filtermediums. Partikeln werden ebenfalls diskret betrachtet und so die Partikeldeposition am Filtermedium bzw. am bereits ausgebildeten Staubkuchen berechnet. Um die Partikeln und die Fasern des Filtermediums diskretisieren zu können, sind im feinskaligen Bereich Netzauflösungen von  $< 1 \mu\text{m}$  notwendig. In der klassischen CFD kommt man damit in den Bereich der direkten numerischen Simulation, welche ausgesprochen rechenaufwendig ist und bisher, trotz großer Fortschritte im Bereich der Hardware, nur für räumlich sehr begrenzte Fälle angewandt wird [70]. Die Nutzung der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) verspricht eine hohe Rechenleistung bei sehr feinen Netzauflösungen. Es wurden erste Versuche unternommen, die Lattice-Boltzmann-Methode mit der klassischen CFD zu vereinen. Jedoch stellen sich schnell Instabilitäten ein, welche sich mit den vorhandenen Kenntnissen und Ressourcen nicht beseitigen ließen. Aus diesem Grund wurde der Ansatz nicht weiter verfolgt. Für weiterführende Untersuchungen bietet diese Kopplung jedoch ausgezeichnete Aussichten, den Gesamtprozess der Filtration genauer zu untersuchen.

## Kopplung

Hinsichtlich der Kopplung der Bereiche ist ein Interface zu erstellen. Ideal eignet sich eine Open-Source-Software, da dem Anwender hier maximale Freiheit bezüglich der Entwicklung eigener Modelle und Interfaces zur Verfügung steht. Es sind die in Tabelle 8.1 dargestellten Interfaces notwendig.

Tabelle 8.1: Benötigte Interfaces für mehrskalige Simulation

Von	Nach	Bemerkung
Grob	Mittel	Bidirektional da Rückströmung möglich; Übergabe von Partikelkonzentration, Geschwindigkeit und Druck
Mittel	Fein	Unidirektional da nahe am Filter keine Rückströmung zu erwarten ist; Übergabe von Partikeln (Größe, Impuls), Geschwindigkeit und Druck

Ähnliche Ansätze werden unter anderem von [71] verwendet. Die Weiterentwicklung einer gekoppelten CFD-LBM-Methode verspricht eine Vielzahl neuer Forschungsmöglichkeiten, da Problemstellungen unter Einbeziehung mehrerer Skalen analysiert werden können. So können beispielsweise in der Filtration sowohl die Berechnung des Strömungsfelds in der Gesamtanlage, als auch die detaillierte Staubkuchenbildung an der Oberfläche des Filtermediums in einer Simulation vereint werden.

## 8.2.2 Lasertriangulation

Nachdem bereits verschiedene Parameter der Lasertriangulationsmessung in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, ist für eine breite Anwendbarkeit des Verfahrens noch weitere Forschungsarbeit notwendig. So ist zu überprüfen, wie sich das Verfahren bei der Nutzung anderer Partikel verhält. Dabei sind zahlreiche Parameter zu variieren:

- Partikelmaterial
- Partikelgrößenverteilung
- Filtermedium
- Partikelkonzentration

### Partikelmaterial

Es wurde in der vorliegenden Arbeit ausschließlich der Staub APYRAL16 verwendet. Dieser Staub besitzt eine reinweiße Farbe. Dunklere Partikel, beispielsweise Ruß, können aufgrund der höheren Lichtabsorption dazu führen, dass das Messsystem Fehlmessungen erzeugt.

### Partikelgrößenverteilung

Weiterhin sind Partikeln mit einem Durchmesser von ca.  $0,5 \mu\text{m}$  bis  $100 \mu\text{m}$  in den experimentellen Untersuchungen verwendet wurden. Entsprechend ergeben sich die Bereiche  $< 0,5 \mu\text{m}$  und  $> 100 \mu\text{m}$  als noch zu untersuchende Parameter.

### Filtermedium

Als Filtermedium wurde ein Polyester-Nadelfilz mit einer Flächenmasse von  $550 \text{ g/m}^2$  untersucht. Material und Flächenmasse des Filtermediums haben einen potenziellen Einfluss auf die verwendete Differenzmessmethode.

### Partikelkonzentration

Die in den Versuchen verwendete Partikelkonzentration lag bei  $3 \text{ g/m}^3$  bzw.  $30 \text{ g/m}^3$ . Höhere Partikelkonzentrationen führen zu einer Schwächung des Laserstrahls. Bei zu hoher Partikelkonzentration ist der Ausfall des Messsystems möglich.

## Weitere empfohlene Forschungsfelder

Zusätzlich zu den zuvor aufgeführten Parametern sind Untersuchungen hinsichtlich der Anwendung des Messsystems empfohlen:

1. Langzeittests in realen Schlauchfilteranlagen, um eine eventuelle Degradation des Messsystems zu untersuchen.
2. Einbindung von Referenzmessobjekten in den Produktionsprozess der Filterschläuche für den Einsatz im industriellen Bereich. Dies ist beispielsweise über das Anschmelzen bestimmter Bereiche des Filterschlauchs möglich.
3. Sicherstellung der Resistenz der Referenzmessobjekte gegenüber der Umgebungsbedingungen während des Anlagenbetriebs. Als Beispiel seien die Resistenz gegenüber hohen Temperaturen und/oder Säuren bzw. Laugen zu nennen.
4. Untersuchung einer automatischen Reinigungsanlage zum Entfernen von Verschmutzungen im Strahlengang des Messsystems.
5. Durch die erzielten Ergebnisse mit dem Messsystem wird der industrielle Einsatz in einer Schlauchfilteranlage empfohlen. Bei diesem Einsatz soll die Staubkuchenbildung im Realbetrieb überwacht und Rückschlüsse auf eventuelles Optimierungspotenzial der Schlauchfilteranlage gezogen werden.

# Literaturverzeichnis

- [1] BESCHLUSS Nr. 1386/2013/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 20. November 2013 .
- [2] Deutscher Bundestag. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. BImSchG.
- [3] Eberhard Schmidt. Simulation of three-dimensional dust structures via particle trajectory calculations for cake-forming filtration. *Powder Technology*, 86(1):113 – 117, 1996.
- [4] Uwe Janoske. *Modellbildung und numerische Simulation von Filtrationsvorgängen: Zugl.: Wuppertal, Univ., Habil.-Schr.* Wuppertaler Reihe zur Umweltsicherheit. Shaker, Aachen, 2006.
- [5] T. Schrooten, R. Esser, K. Knop, A. Kögel und G.-M. Klein. Optimising plant components using flow simulations. *ZKG Cement Lime Gypsum*, 62:48–53, 2009.
- [6] Niels Finderup Nielsen, Airtech und Skriver Kasper. Fabric filter optimization using computational fluid dynamics. In *ICESP*, Nürnberg, 2011.
- [7] Jan Sedláček und Petr Kovařík. Numerical simulation of large fabric filter. *EPJ Web of Conferences*, 25:01083, 2012.
- [8] Fuping Qian, Naijin Huang, Jinli Lu und Yunlong Han. CFD–DEM simulation of the filtration performance for fibrous media based on the mimic structure. *Computers & Chemical Engineering*, 71:478–488, 2014.
- [9] Feng ZimMing, Fang Xin, Gao Qi-ming und Ding Huan-Huan. Flow field simulation and analysis of bag filter for agriculture sewage. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 47:395–404, 2015.
- [10] Federico Solari, Giorgia Tagliavini, Roberto Montanari, Eleonora Bottani, Nicola Malagoli und Mattia Armenzoni. CFD model validation of a bag filter for air filtration in a milling plant. In *International Multidisciplinary Modeling and Simulation Multiconference*, Barcelona, 2017.

- [11] Achim Dittler, Bernd Gutmann, Ralf Lichtenberger, Herbert Weber und Gerhard Kasper. Optical in situ measurement of dust cake thickness distributions on rigid filter media for gas cleaning. *Powder Technology*, 99(2):177–184, 1998.
- [12] Matthias Rütter, Martina Uray, Horst Bischof, Gernot Krammer und Muhammad Waqas Saleem. An optical measurement device for evaluating dust deposition on flexible filter surfaces. *Proceedings of the 10th Computer Vision Winter Workshop CVWW*, 2005.
- [13] Xin Luan, Zhongli Ji, Longfei Liu und Ruifeng Wang. Cleaning mechanism of ultra-fine dust from rigid filter candles. In *European Conference on Fluid-Particle Separation*, Lyon, 2018.
- [14] Yu-Hsiang Cheng und Chuen-Jinn Tsai. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. *Aerosol Science and Technology*, 29(4):315–328, 1998.
- [15] M. Hamachi und M. Mietton-Peuchot. Cake thickness measurement with an optical laser sensor. *Chemical Engineering Research and Design*, 79(2):151–155, 2001.
- [16] Matthias Rütter, Mahmood Saleem, Horst Bischof und Gernot Krammer. In-situ measurement of dust deposition on bag filters using stereo vision and non-rigid registration. *Assembly Automation*, 25(3):196–203, 2005.
- [17] E. Schmidt. Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media. *Filtration & Separation*, 32(8):789 – 793, 1995.
- [18] Eberhard Schmidt. Theoretical investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media. *Filtration & Separation*, 34(4):365 – 368, 1997.
- [19] Heinz Brauer. *Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen*. Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Springer, Berlin, 1996.
- [20] Friedrich Löffler. *Staubabscheiden*. Lehrbuchreihe Chemieingenieurwesen / Verfahrenstechnik. Thieme, Stuttgart, 1988.
- [21] Eberhard Schmidt und Friedrich Löffler. Filternde Abscheider. In *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*. Springer, Berlin Heidelberg, 1996.
- [22] Siegfried Ripperger, Walter Gösele und Christian Alt. Filtration, 1. fundamentals. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2000.
- [23] Matthias Stieß. *Mechanische Verfahrenstechnik*. Springer, Berlin, 2001.

- [24] Theo Schrooten, Astrid Kögel und Gunnar-Marcel Klein. Industrielle Entstaubung durch Schlauchfilter - Die Evolution der Jet-Pulse Schlauchfiltertechnologie. <https://www.chemie.de/whitepaper/126300/industrielle-entstaubung-durch-schlauchfilter.html>. Abgerufen: 28.03.2020.
- [25] Michael Rutz. *Konzeptionelle und experimentelle Untersuchungen zur Effizienzsteigerung von Oberflächenfiltern*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, Papierflieger Verlag, Clausthal, 2018.
- [26] VDI Verein deutscher Ingenieure. 3677: Filternde Abscheider - Tiefenfilter aus Fasern - Blatt 2, 2010.
- [27] Sheldon K. Friedlander. *Smoke, dust, and haze: Fundamentals of aerosol dynamics*. Topics in chemical engineering. Oxford Univ. Press, New York, 2000.
- [28] Rainer Hiller und Friedrich Löffler. Der Einfluß von Partikelstoß und Partikel-Haftung auf die Abscheidung von Partikeln in Faserfiltern. *Chemie Ingenieur Technik*, 52:352–353, 1980.
- [29] S. Kuwabara. The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in viscous flow at small reynolds number. *J. Phys. Soc. Japan*, 14(4):527 – 532, 1959.
- [30] K. W. Lee und B. Y. H. Liu . Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 1(2):147–161, 1982.
- [31] Friedrich Löffler, Hans Dietrich und Werner Flatt. *Staubabscheiden mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern*. Vieweg, Braunschweig, 1984.
- [32] Eberhard Schmidt. *Abscheidung von Partikeln aus Gasen mit Oberflächenfiltern*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3, Verfahrenstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- [33] Qian Zhang, David Horst und Eberhard Schmidt. Simulation and experiments on the cake formation in dust filtration with fabric filters. In *FILTECH*, Köln, 2019.
- [34] Franz Durst. *Grundlagen der Strömungsmechanik: Eine Einführung in die Theorie der Strömung von Fluiden*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.
- [35] Berthold Noll. *Numerische Strömungsmechanik: Grundlagen*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin Heidelberg, 1993.
- [36] H. Lomax, Thomas H. Pulliam und David W. Zingg. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Scientific Computation. Springer, Berlin Heidelberg, 2001.

- [37] Jürgen Eichler und Hans-Joachim Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [38] W. Adam, M. Busch und B. Nickolay. *Sensoren für die Produktionstechnik*. Springer, Berlin Heidelberg, 2013.
- [39] Axel Donges und Reinhard Noll. *Laser Measurement Technology - Fundamentals and Applications*. Springer, Berlin Heidelberg, 2014.
- [40] Johann Salzberger. Lasertriangulation gefragt wie nie. *KE-NEXT*, 2014. Online; Stand 15. Juli 2008.
- [41] Datenblatt KEYENCE LK-H087. [www.keyence.de](http://www.keyence.de). Abgerufen: 20.01.2020.
- [42] Matthias Haenecke. Online measuring of dust cake thickness on filter bags. In *FILTREX*, Berlin, 2019.
- [43] Stefan Roth und Achim Stahl. *Optik - Experimentalphysik – anschaulich erklärt*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2019.
- [44] Bastian Bach und Eberhard Schmidt. Durch Lecks in Filtern zur Staubabtrennung verursachte Partikelemissionen. *Chemie Ingenieur Technik*, 79(11):1969–1973, 2007.
- [45] Virgil Alan Marple. *Fundamental study of inertial impactors*. Dissertation, University of Minnesota, Minnesota, 1970.
- [46] Virgil Alan Marple und Benjamin Y. H. Liu. Characteristics of laminar jet impactors. *Environmental Science & Technology*, 8(7):648–654, 1974.
- [47] Virgil Alan Marple, Benjamin Y. H. Liu und K. T. Whitby. On the flow fields of inertial impactors. *Journal of Fluids Engineering*, 96(4):394–400, 1974.
- [48] Anssi Arffman. *Numerical and Experimental Study on Inertial Impactors*. Dissertation, Tampere University of Technology, Tampere, 2016.
- [49] Dominik Surek und Silke Stempin. *Technische Strömungsmechanik*. Springer, Wiesbaden, 2017.
- [50] Isaac Newton. *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures bibliopolas, 1687.
- [51] George Gabriel Stokes. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. In George Gabriel Stokes, editor, *Mathematical and Physical Papers*, pages 1–10. Cambridge University Press, Cambridge, 2009.

- [52] P. G. Saffman. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 22(2):385–400, 1965.
- [53] Alfred Barnard Basset. Treatise on hydrodynamics. *Nature*, 40(1035):412–413, 1889.
- [54] Peter Stephan, Dieter Mewes, Stephan Kabelac, Matthias Kind, Karlheinz Schaber und Thomas Wetzel, editor. *VDI-Wärmeatlas*. VDI Springer Reference. Springer, Wiesbaden, 2017.
- [55] G. Magnus. Ueber die Abweichung der Geschosse, und: Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden Körpern. *Annalen der Physik*, 164(1):1–29, 1853.
- [56] VDI Verein deutscher Ingenieure. 3926: Prüfung von Filtermedien für Abreinigungsfilter - Blatt 1, 2004.
- [57] PALAS GmbH. Bedienungsanleitung BEG 1000, 2008.
- [58] Produktbeschreibung Aalborg GFC Massendurchflussregler. [https://www.aalborginstruments.de/index.php/main\\_page/product\\_overview/id\\_product\\_overview/21](https://www.aalborginstruments.de/index.php/main_page/product_overview/id_product_overview/21). Abgerufen: 20.01.2020.
- [59] Produktbeschreibung TOPAS LAP 322 . [https://www.topas-gmbh.de/wordpress/dateien/produkte/322LAP\\_LaserAerosolParticleSizeSpectrometer\\_de.pdf](https://www.topas-gmbh.de/wordpress/dateien/produkte/322LAP_LaserAerosolParticleSizeSpectrometer_de.pdf). Abgerufen: 14.01.2020.
- [60] Christoph Sager. *Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmesstechnik*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen, 2007.
- [61] Datenblatt APYRAL 16/24. [www.nabaltec.de](http://www.nabaltec.de). Abgerufen: 30.05.2020.
- [62] DIN ISO 697:1984-01, Tenside; Waschmittel; Bestimmung der Schüttdichte; Verfahren durch Messen der Masse eines gegebenen Volumens, 1984.
- [63] *DIN ISO 11057:2012-05, Emissionen aus stationären Quellen - Prüfverfahren für die Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien*. Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [64] SICK AG. Bedienungsanleitung Dusthunter T Staubmesssystem. Beschreibung, Installation, Betrieb, 2014.
- [65] Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG. GMD 12 - Produktinformation, 2017.
- [66] Eberhard Schmidt. *Elektrische Beeinflussung der Partikelabscheidung in Oberflächenfiltern*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1991.

- [67] H. Nyquist. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 47(2):617–644, 1928.
- [68] Krzysztof Kolodziejczyk. Numerical Simulations of Polydispersed Suspension Sedimentation in Ansys CFX. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23:1003–1008, 2014.
- [69] Rüdiger Schwarze. *CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2012.
- [70] Claus Wagner, Andrei Shishkin und Olga Shishkina. The use of direct numerical simulations for solving industrial flow problems. In *Direct and Large-Eddy Simulation VIII*, Dordrecht, 2011. Springer Netherlands.
- [71] Vanessa Puderbach, Kilian Schmidt und Sergiy Antonyuk. Numerical and experimental investigation of filter cake formation during solid-liquid separation by resolved CFD-DEM coupling. In *FILTECH*, Köln, 2019.

# Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.