

Experimentelle Untersuchung der  
Konzentrations- und  
Geschwindigkeitsverteilung in  
Staub/Luft-Gemischen in einer pneumatisch  
befüllten Laborapparatur

**Masterarbeit**

von

Amelie Schwegler

Fachhochschule Mannheim

und

Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit  
und Arbeitsmedizin

Mannheim, November 2019



# Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Mannheim, 06. November 2019

-----  
(Amelie Schwegler)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Allgemeines . . . . .	5
1.2	Computersimulation im Explosionsschutz . . . . .	6
1.3	Zielsetzung . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1	STK und deren Einfluss auf Staubexplosionen . . . . .	8
2.2	Laminare und turbulente Strömung . . . . .	10
2.3	Strömungssimulation . . . . .	13
2.4	Messunsicherheit . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>16</b>
3.1	Verwendete Messgeräte . . . . .	16
3.1.1	Staubkonzentrationsmessgerät . . . . .	16
3.1.2	Laser-Doppler-Anemometer . . . . .	21
3.2	Messaufbau . . . . .	23
3.2.1	Staubkammer . . . . .	25
3.2.2	Partikeldosierer RBG 1000 . . . . .	25
3.2.3	Ringionisator . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchung</b>	<b>27</b>
4.1	Untersuchung der Randbedingungen . . . . .	27
4.1.1	Staubeigenschaft . . . . .	27
4.1.2	Umgebungsbedingung . . . . .	28
4.1.3	Untersuchung der Agglomeratbildung . . . . .	29
4.2	Versuchsprogramm . . . . .	30
4.3	Versuchsbeschreibung . . . . .	31
4.4	Messergebnisse . . . . .	33

4.4.1	Staubkonzentrationsdaten . . . . .	33
4.4.2	Geschwindigkeitsdaten . . . . .	38
4.5	Auswertung . . . . .	39
4.5.1	Systematischer Fehler . . . . .	39
4.5.2	Statistischer Messfehler . . . . .	41
4.5.3	Sensitivitätsanalyse . . . . .	51
4.5.3.1	Datenreihe Geschwindigkeit . . . . .	53
4.5.3.2	Datenreihe Beladung . . . . .	57
4.6	Visualisierung und Vergleich mit der numerischen Simulation . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse und Ausblick</b>	<b>63</b>
5.1	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	63
5.2	Ausblick . . . . .	65
<b>A</b>	<b>Technische Zeichnung</b>	<b>77</b>
<b>B</b>	<b>REM Aufnahme Maisstärke</b>	<b>80</b>
<b>C</b>	<b>Messgitter</b>	<b>81</b>
<b>D</b>	<b>Staubkonzentrationsmesswerte</b>	<b>82</b>
D.1	Referenz . . . . .	82
D.2	Geschwindigkeit . . . . .	85
D.3	Beladung . . . . .	87
<b>E</b>	<b>Geschwindigkeitsmesswerte</b>	<b>90</b>
E.1	Referenz . . . . .	90
E.2	Geschwindigkeit . . . . .	92
E.3	Beladung . . . . .	93
<b>F</b>	<b>Häufigkeitsverteilung</b>	<b>95</b>
<b>G</b>	<b>Auswertung der Staubkonzentrationsmesswerte</b>	<b>96</b>
G.1	Geschwindigkeit . . . . .	96
G.2	Beladung . . . . .	97
<b>H</b>	<b>Auswertung der Geschwindigkeitsmesswerte</b>	<b>100</b>
H.1	Geschwindigkeit . . . . .	100
H.2	Beladung . . . . .	102

I	Stopfdichte	104
J	Umgebungseinfluss	108
K	Absolute Wasserbeladung	111

# Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$A$	$m^2$	Fläche
$c$	$g/m^3$	Konzentration allgemein
$c_i$	$g/m^3$	Zeitlicher Konzentrationsverlauf
$\bar{c}$	$g/m^3$	Zeitlich gemittelte Konzentration
$c_m$	$g/m^3$	Massenkonzentration
$d$	m	Durchmesser allgemein
$E$	-	Extinktion
$\epsilon$	$m^2/g$	Extinktionskoeffizient
$f$	Hz, 1/s	Frequenz allgemein
$F_1, F_2, F_3$	-	Dimensionslose Faktoren
$H$	mm	Vorhandene Feststofffüllhöhe RBG 1000
$I$	$W/m^2$	Intensität des transmittierten Lichtes
$I_0$	$W/m^2$	Intensität des ausgesandten Lichtes
$l$	m	Abstand allgemein
$l_1, l_2$	m	Messabstand SKG-Hülsen
$l_i$	$g/m^3, m/s$	Einzelwert
$\bar{l}$	$g/m^3, m/s$	Mittelwert
$\lambda$	$\mu m$	Wellenlänge
$m$	mg, g	Eingewogene Staubmasse
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$n$	mm/h	Vorschubgeschwindigkeit
$n$	-	Stichprobenumfang
$N$	U/min	Bürstendrehzahl
$\eta$	Pa · s	dynamische Viskosität
$\omega$	m/s	Rotationsgeschwindigkeit
$p$	bar	Druck allgemein
$p_{ex}$	bar	Explosionsdruck
$p_{max}$	bar	Maximaler Explosionsdruck
$p_{red}$	bar	Reduzierter Explosionsdruck
$dp$	bar	Druckdifferenz
$(dp/dt)_{max}$	bar/s	Maximaler zeitlicher Druckanstieg
$P$	%	Wahrscheinlichkeit
$\varphi$	%	Relative Feuchtigkeit
$\phi$	°	Einfallswinkel Laserstrahl

$q$	$\text{g/cm}^3$	Stopfdichte
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte allgemein
$r$	m	Radius, allgemein
$Re, Re_{\text{krit}}$	-	Dimensionslose Kenngröße Strömungsmechanik
$s$	$\text{g/m}^3, \text{m/s}$	Standardabweichung der jeweiligen Betrachtungsgröße
$\sigma$	$\text{g/m}^3, \text{m/s}$	Messunsicherheit der jeweiligen Betrachtungsgröße
$t$	s	Zeit allgemein, Messdauer
$t_d$	s	Dosierdauer
$t_{d,k}$	s	Dosierdauer, kumulativ
$t_{\text{Probe}}$	s	Aufnahmedauer
$\Delta t, \tau$	s	Zeitdifferenz
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur allgemein
$u$	m/s	Geschwindigkeit allgemein
$u(t)$	m/s	Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf
$\bar{u}$	m/s	Mittlere Geschwindigkeit
$u', u_{\text{RMS}}$	m/s	Schwankungsgröße
$U$	mV, V	Spannung allgemein
$U(t)$	mV, V	Spannungs-Zeit-Verlauf
$U_0$	mV, V	Anfangsspannung
$U_p$	mV, V	Plateau-Spannung
$U_{\text{SKG}}$	V	Angezeigte Spannung am SKG 5
$UEG, OEG$	$\text{g/m}^3$	Untere bzw. obere Explosionsgrenze
$v$	$\text{g/m}^3, \text{m/s}$	Statistischer Messfehler, Vertrauensintervall
$v$	m/s	Geschwindigkeit, allgemein
$v_x$	m/s	Mittengeschwindigkeit Freistrahler
$V$	ml, l, $\text{m}^3$	Volumen allgemein
$\dot{V}$	l/min	Volumenstrom
$w$	$\text{g/m}^3, \text{m/s}$	Systematischer Messfehler
$\Delta x$	m	Abstand der Interferenzstreifen



# Vorwort

Zum Abschluss meines Studiums auf dem Gebiet Verfahrenstechnik war es mir möglich, bei der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V (FSA) bzw. im Zentrallabor der Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) eine Masterarbeit anzufertigen. Die angebotene Themenstellung umfasste die messtechnische Ermittlung der Staub- und Geschwindigkeitsverteilung in einer Laborapparatur bei verschiedenen Befüllvorgängen. Es war notwendig, sich neues Wissen anzueignen und anzuwenden, sowie während des Studiums erlangten Grundkenntnisse effizient einzubringen.

An dieser Stelle möchte ich mich all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Abschlussarbeit unterstützt haben. Großen Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Hoffner für seine Bereitschaft diese Arbeit zu betreuen. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dr. Jan-Niklas Tödt, der mich durch seine engagierte und lehrreiche Betreuung und durch seine hilfreichen Anregungen und seiner Geduld immer wieder unterstützt hat.

Weiterhin möchte ich mich bei Madlen Nicklisch und den Herren Dirk Lorenz, Sebastian Nissle, Pavlo Chupin, Hermann Schiebler und allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der FSA/BGN für ihr hilfreichen Ratschläge, ihre tatkräftige Unterstützung, sowie die Bereitstellung von Messgeräten und Arbeitsmitteln und nicht zuletzt auch für die äußerst angenehme Arbeitsumgebung ganz herzlich bedanken.

Schließlich gilt mein Dank noch meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht und meine schulische Laufbahn mit großem Interesse und moralischer Unterstützung begleitet haben.



# Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, eine statistisch abgesicherte Datenbasis unter definierten Randbedingungen zur Überprüfung einer numerischen Simulation der Staubwolkenentwicklung in Luft zu erzeugen. Dazu wird eine Laborapparatur pneumatisch mit einem Gemisch aus getrockneter Maisstärke und Luft befüllt und an verschiedenen Messpositionen im untersuchten Messvolumen die Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Die erzeugten Daten dienen der Validierung einer numerischen Simulation, daher ist die Anforderung an die Qualität der Daten besonders hoch.

In der Laborapparatur werden insgesamt 20 Messpositionen definiert. An fünf Positionen wird die Staubkonzentration zeitlich parallel mit Hilfe von fünf Staubkonzentrationsmessgeräten (SKG) bestimmt. Davon befinden sich zwei Messpositionen auf der Symmetrieachse der Staubaustrittsdüse in unterschiedlicher Entfernung zum Einlassbereich; drei Messpositionen befinden sich außerhalb dieses Bereiches. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA). Für die vorliegende Arbeit stand ein LDA mit einem Messkopf zur Verfügung. Daher werden die 15 Messpunkte zur Geschwindigkeitsaufnahme sukzessiv erfasst. Bei der Fehleranalyse der Staubkonzentrationsmessdaten wird ein systematischer Messfehler bei der Staubwolkenenerzeugung identifiziert und weitest möglich eliminiert. Die verbleibende Messwertstreuung ist rein statistischer Natur. Die Fehleranalyse der Geschwindigkeitsmessdaten zeigt, dass ein messbereichsabhängiger Fehler durch das LDA verursacht wird. Dieser Anteil wird zum systematischen Messfehler aufsummiert. Durch Wahl eines geeigneten Vertrauensbereiches in Höhe der dreifachen Standardabweichung ergibt sich eine abgesicherte Messunsicherheit sowohl in der Konzentrations- als auch in der Geschwindigkeitsmessung.

Weiterhin werden die Geschwindigkeit sowie die Staubbeladung des eingeblasenen Staub/Luft-Gemisches separat variiert. Die daraus resultierenden Messwertänderungen decken sich mit der theoretischen Erwartung.

Mit Hilfe eines Lasers und einer speziellen Streulinse wird die zeitabhängige Staubverteilung in der vertikalen Ebene durch die zentrale Symmetrieachse der Staubaustrittsdüse visualisiert und mit einer Videokamera aufgenommen. Ein Vergleich mit ersten Simulationsergebnissen zeigt bereits Ähnlichkeit zwischen numerische Vorhersage und experimenteller Beobachtung.



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines

In vielen technischen Prozessen und Aufarbeitungsschritten werden pulverförmige Feststoffe gefördert, gelagert, verarbeitet und anschließend transportiert. Anwender solcher Feststoffhandhabungen sind sowohl in der Lebensmittel- als auch in der Pharmaindustrie zu finden. Die Anwender solcher Prozesse müssen bei der Handhabung von Schüttgütern ausreichende Sicherheitsmaßnahmen ergreifen, da brennbare pulverförmige Stoffe, fein verteilt in der Luft, ein explosionsfähiges Gemisch bilden können. Entzündet sich dieses Gemisch, kommt es zu einer Staubexplosion. Beim gleichzeitigen Vorhandensein von brennbarem Staub, ausreichend Luftsauerstoff und einer geeigneten Zündquelle, z. B. durch Funken, heiße Oberflächen oder elektrostatische Entladung, entzündet sich das Staub/Luft-Gemisch. Die Konzentration des brennbaren Staubes in der Luft muss sich dabei innerhalb eines sogenannten Explosionsbereiches [1] befinden. In Abbildung 1.1 sind die Bedingungen für eine Staubexplosion in einem sogenannten Gefahrendreieck dargestellt.

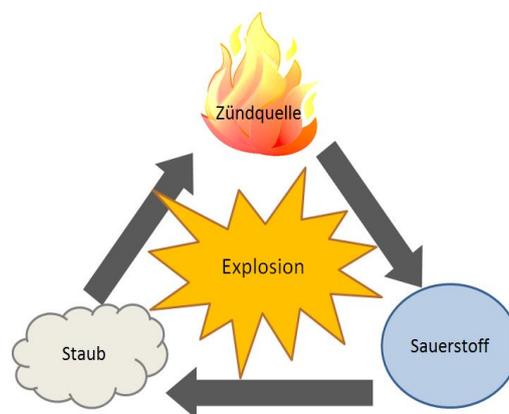


Abbildung 1.1: Bildliche Darstellung des Gefahrendreiecks. Grafik eigene Darstellung.

Die Entzündung der Staub/Luft-Gemische lässt sich nicht immer sicher verhindern. Um eine Explosion zu verhindern, beziehungsweise deren Auswirkung zu begrenzen, gibt es verschiedene Explosionsschutzmaßnahmen. Zum einen können durch vorbeugende Maßnahmen das Vorhandensein einer zündfähigen Atmosphäre, sowie das Vorhandensein einer Zündquelle vermieden werden. Sind diese Maßnahmen nicht ausreichend muss durch den konstruktiven Explosionsschutz die Auswirkung einer Staubexplosion begrenzt werden. Dazu zählen unter anderem eine Explosionsdruckentlastung oder eine Explosionsunterdrückung nach dem Stand der Technik, die das Schadensausmaß erheblich reduzieren können. Eine konstruktive Maßnahme zum Explosionsschutz stellt dabei eine Druckentlastungseinrichtung dar. Bei einer Druckentlastungseinrichtung öffnet sich eine definierte Entlastungsfläche unter Explosionsbedingungen und lässt so den anstehenden Überdruck ins Freie entweichen. Die Druckentlastungseinrichtungen können wiederverwendbar (Explosionsklappe) oder nicht wiederverwendbar (Berstscheibe) sein [2].

## 1.2 Computersimulation im Explosionsschutz

Die Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V (FSA) und die Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) sind seit zwei Jahren bestrebt, die bisher existierenden selbst entwickelten Modellrechnungen durch Computational Fluid Dynamics, kurz CFD, Simulationen zu erweitern. Bereits 1993 wurden experimentelle Untersuchungen auf dem Versuchsgelände in Kappelrodeck in einem Silo der Firma AZO durchgeführt und mit einer numerischen Simulation verglichen. Bei den 1993 durchgeführten Messungen sind allerdings nicht alle Einflussfaktoren, sowie Randbedingungen bekannt, sodass die Präzision zur korrekten Modellierung der Staubkonzentrationsverteilung nicht ausreichend ist. Zu diesem Zweck hat die FSA e.V. das Projekt F-05-1802 mit dem Titel „Modellierung der Staubverteilung in Behältern bei verschiedenen Befüllungsverfahren“ initiiert. Dabei soll ein Modell zur Untersuchung der Staubverteilung innerhalb einer Laborapparatur erstellt werden. Die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit des numerischen Modelles muss dazu im Vorfeld experimentell im Labormaßstab nachgewiesen werden.

Zweck dieser Untersuchung ist die Anwendbarkeit von Formeln zur Auslegung von Druckentlastungsflächen bei verschiedenen Befüllverfahren bei großen Silos nachzuweisen. Die Formeln zur Berechnung der Druckentlastungsflächen sind in der Norm DIN EN 14491 hinterlegt. Der Formelsatz für die pneumatische Befüllung von Silos und Behältern gilt lediglich für kleine Behältervolumen bis maximal  $250 \text{ m}^3$ . Für die Auslegung der Druckentlastungsflächen bei Silos größer  $250 \text{ m}^3$  wird ein allgemeingültiger Formelsatz verwendet. Hierbei kommt es häufig zu einer Überdimensionierung der Entlastungsflächen. Dies soll in Zukunft vermieden werden. Anhand der numerischen Simulation soll der Nachweis erbracht werden, dass die Verhältnisse mit wachsendem Volumen zunehmend unkritisch und die Formeln zur Auslegung von Druckentlastungsflächen bei verschiedenen Befüllverfahren auch für größere Volumina und höhere Förderleistungen anwendbar sind.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Erzeugung und Verifizierung statistisch abgesicherter Messdaten unter definierten Randbedingungen. Dabei soll die Staubkonzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung des Staub/Luft-Gemisches in einer Laborapparatur ermittelt werden. Der Aufbau, der für die Versuche notwendigen Messumgebung, und die Entwicklung einer geeigneten Messmethodik werden im Vorfeld eigenständig konzipiert. Darüber hinaus wird durch Variation verschiedener Parameter der Einfluss auf das Versuchsergebnis untersucht.

Dabei gilt es folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Statistische Verteilung erfassen
- Statistischen bzw. systematischen Messfehler identifizieren
- Messunsicherheit bestimmen
- Reproduzierbarkeit durch mehrmalige Messung untersuchen

In Kapitel 2 sollen die theoretischen Hintergründe dieser Arbeit erläutert werden. Dazu werden für diese Arbeit relevante sicherheitstechnische Kenngrößen und strömungsmechanische Grundlagen beschrieben. Ein Überblick verschiedener Modelle zur numerischen Simulation und für diese Arbeit nötigen Kenntnisse zur Bestimmung der Messunsicherheit schließen das Kapitel ab. Der experimentelle Aufbau ist in Kapitel 3 aufgeführt. Darin werden die verwendeten Messgeräte und der Messaufbau detailliert dargestellt. Kapitel 4 befasst sich mit der experimentellen Untersuchung. Neben der Untersuchung der Randbedingungen und der Aufführung des Versuchsprogramms, wird die Versuchsdurchführung zur Messwerterzeugung beschrieben. Die Ergebnisse werden anschließend ausgewertet und die Messunsicherheit bestimmt. Eine Sensitivitätsanalyse soll den Einfluss einer Parametervariation auf das Messergebnis untersuchen. Am Ende dieses Kapitels wird die Ausbreitung der Staubwolke innerhalb der Messkammer mit Hilfe einer laseroptischen Methode visualisiert. Die Messdaten dienen als Grundlage zur Validierung der numerischen Modellrechnung für das Projekt F-05-1802. Als Abschluss dieser Arbeit werden in Kapitel 5 die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick für weiterführenden Arbeiten beschrieben.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

Diese Arbeit dient der Schaffung möglichst exakter Messdaten zur Prüfung einer Modellierung zur pneumatischen Befüllung mit Stäuben. Zu Beginn dieses Kapitels werden sicherheitstechnische Kenngrößen (STK) von Staubexplosionen in Abschnitt 2.1 erläutert, die für diese Arbeit relevant sind. Des Weiteren werden in Abschnitt 2.2 die Grundlagen laminarer und turbulenter Strömung sowie in Abschnitt 2.3 die numerische Modellierung von Zweiphasensystemen beschrieben. Abschnitt 2.4 führt Kenntnisse zur Berechnung der Messunsicherheit für die spätere Auswertung der erzeugten Messdaten in Kapitel 4.5 auf.

### 2.1 STK und deren Einfluss auf Staubexplosionen

Staub kann als unwillkommene Nebenerscheinung eines Herstellungsprozesses oder als gewolltes Endprodukt in einem Betrieb auftreten. Feststoffe, die zu einer Staubexplosionen führen können, sind brennbar und haben einen Partikeldurchmesser von  $d < 500 \mu\text{m}$  [1]. Um Fehleinschätzungen zu vermeiden und eine sichere Handhabung zu gewährleisten, ist die Kenntnis ihrer Eigenschaften notwendig [3].

*Untere (UEG) bzw. Obere Explosionsgrenze (OEG)*

Der Staubkonzentrationsbereich, der zwischen UEG und OEG liegt, wird Explosionsbereich genannt. Bei Staubkonzentrationen, die außerhalb des Explosionsbereiches liegen, ist keine Zündwilligkeit mehr gegeben und damit eine Explosionsgefährdung ausgeschlossen. Die untere bzw. obere Explosionsgrenze gibt den unteren bzw. oberen Grenzwert der Konzentration eines brennbaren Staubes in einem Gemisch aus diesem Staub mit Luft an, bei dem sich nach dem Zünden eine von der Zündquelle unabhängige Flamme gerade nicht mehr selbstständig fortpflanzen kann. Bei Staubkonzentrationen unterhalb der UEG liegt zu wenig Brennstoff (zu mager), bei Staubkonzentrationen oberhalb der OEG zu viel Brennstoff (zu fett) vor. In Abbildung 2.1 ist die schematische Darstellung des Explosionsbereiches dargestellt. Die Kenntnis der Staubkonzentration in der Luft in z.B. Silos ist deshalb von fundamentaler Bedeutung für die Forschung von Staubexplosionen und deren Risikobetrachtung.

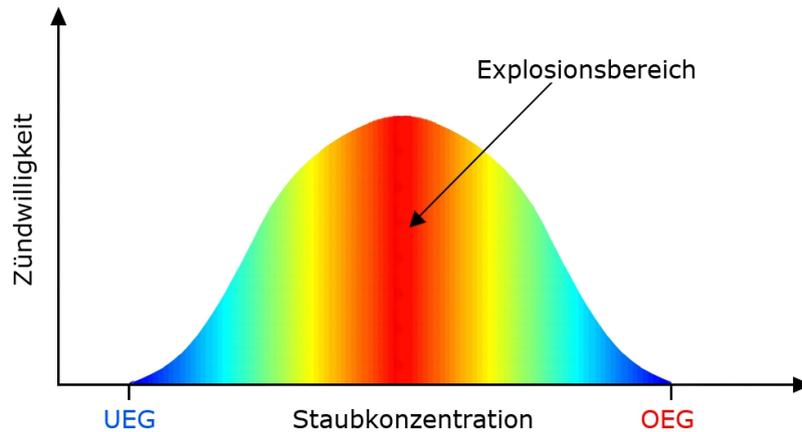


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Explosionsbereiches und der unteren bzw. oberen Explosionsgrenzen. Dazwischen befindet sich die explosionsfähige Atmosphäre.

Das stöchiometrische Verhältnis ist das Luft/Brennstoff-Verhältnis, welches die höchste Zündwilligkeit besitzt. Bei dieser Staubkonzentration wird bei einer Explosion der maximale Überdruck  $p_{\max}$  erreicht.

*Maximaler Explosionsdruck  $p_{\max}$  und reduzierter Explosionsdruck  $p_{\text{red}}$*

Der maximale Explosionsdruck  $p_{\max}$  ist der maximale Überdruck, der in einem geschlossenen Behälter bei der Explosion einer explosionsfähigen Atmosphäre auftritt. Er liegt in der Regel über der Behälterfestigkeit. Durch eine Explosionsdruckentlastung oder eine Explosionsunterdrückung kann der maximale Explosionsdruck auf den reduzierten Explosionsdruck  $p_{\text{red}}$  verringert werden.

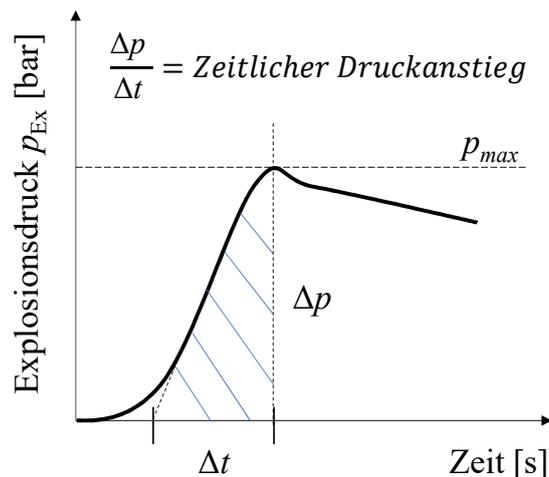


Abbildung 2.2: Definition des zeitlichen Druckanstieges einer Staubexplosion. Die Druckdifferenz  $\Delta p$  beschreibt den maximal auftretenden Explosionsdruck  $p_{\max}$  im Verhältnis zur Zeit  $\Delta t$ . Grafik entnommen aus [1].

### *Maximaler zeitlicher Druckanstieg $(dp/dt)_{\max}$*

Der maximale zeitliche Druckanstieg  $(dp/dt)_{\max}$  ist ein Maß für die Geschwindigkeit einer Explosion. Er ist der höchste zeitliche Druckanstieg in einem geschlossenen Behälter, der bei der Explosion eines explosionsfähigen Gemisches innerhalb des Explosionsbereiches eines brennbaren Stoffes auftritt. In Abbildung 2.2 ist der zeitliche Druckanstieg anhand eines zeitlichen Druckverlaufs einer Explosion in einem geschlossenen Behälter illustriert.

Explosionsartige Verbrennungen von Staub/Luft-Gemischen stellen komplexe Prozesse dar, bei denen sich chemische und physikalische Effekte gegenseitig beeinflussen. Der Reaktionsmechanismus bestimmt einerseits die Geschwindigkeit der Energiefreisetzung, sprich die Heftigkeit einer Explosion. Andererseits beeinflussen die Strömungsverhältnisse (insbesondere die Turbulenz) und die Temperatur wiederum die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion [4]. Das bedeutet, dass neben der Staubkonzentration auch die Strömungs- und Turbulenzzustände eine wichtige Rolle bei der Explosion eines Staub/Luft-Gemisches spielen. Je turbulenter die Strömung, desto schneller findet die Verbrennung des Staubes statt und desto höher ist der zeitliche Druckanstieg  $(dp/dt)_{\max}$ . Deshalb sollen in dieser Arbeit neben der Staubkonzentrationsverteilung auch die Strömungs- und Turbulenzzustände innerhalb der Staubkammer untersucht werden.

## **2.2 Laminare und turbulente Strömung**

Als eine Strömung wird die Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen (Fluiden) bezeichnet. Bei Strömungsverhalten wird zwischen laminarer und turbulenter Strömung differenziert. Eine laminare Strömung kennzeichnet sich dadurch aus, dass sich die Strömungsschichten nicht miteinander vermischen. Wohingegen eine turbulente Strömung unbeständig und zufällig ausgebildet ist, die Strömungsschichten mischen sich durch Verwirbelungen untereinander. Eine Kenngröße zur Unterscheidung zwischen den verschiedenen Strömungsfällen bietet die Reynoldszahl  $Re$  [5]:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad (2.1)$$

Wobei  $\rho$  die Dichte des Fluides,  $\eta$  die dynamische Viskosität,  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit und  $d$  die charakteristische Länge eines Körpers ist. Die charakteristische Länge wird auch als Bezugslänge bezeichnet und ist für die jeweilige Problemstellung zu definieren. In dieser Arbeit ist die charakteristische Länge der Düseninnendurchmesser  $d$  der Staubaustrittsdüse der Dosiereinheit. Überschreitet die Reynoldszahl einen kritischen Wert  $Re_{\text{krit}}$ , ist mit einem Umschlag von laminarer in turbulente Strömung zu rechnen. Somit lässt sich festhalten, dass laminare Strömung bei  $Re < Re_{\text{krit}}$  herrscht, Turbulenz bei  $Re > Re_{\text{krit}}$ . In Abbildung 2.3 sind die zwei Fälle dargestellt.

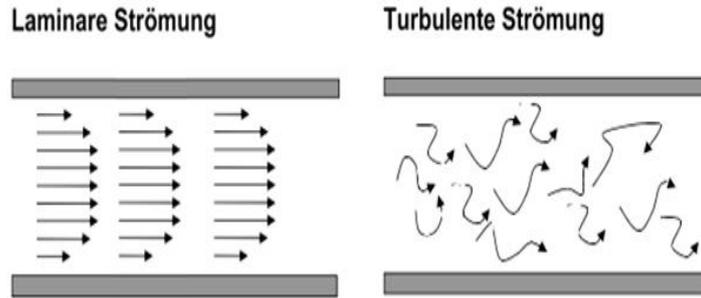


Abbildung 2.3: Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Bei der laminaren Strömung lässt sich die Ausbildung eines gleichförmigen Strömungsprofils erkennen, die Strömungsschichten verlaufen parallel zueinander. Wohingegen sich bei der turbulenten Strömung eine starke Verwirbelung zeigt. Grafik entnommen aus [5].

Ein wesentliches Merkmal turbulenter Strömungen ist eine signifikante Unregelmäßigkeit der Fluidgeschwindigkeit in Ort und Zeit. In Abbildung 2.4 ist der zeitliche Verlauf einer Geschwindigkeitskomponente  $u(t)$  in einer turbulenten Strömung dargestellt. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeit aufgetragen über der Zeit erkennbaren Schwankungen unterliegt. Um eine Aussage über die Geschwindigkeit und deren Turbulenzintensität treffen zu können, wird die gemessene Geschwindigkeit in zwei Teile zerlegt.

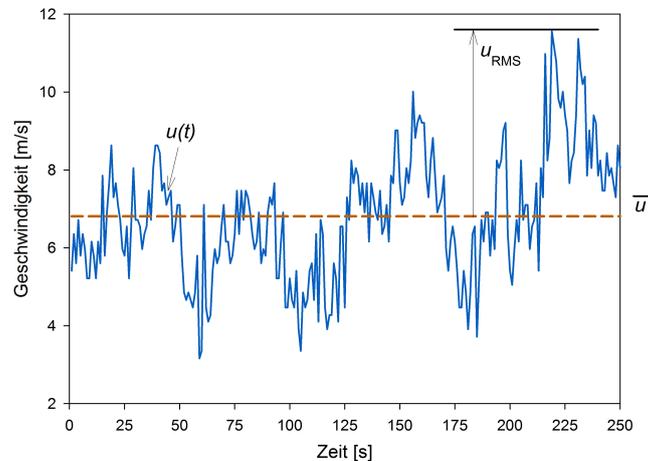


Abbildung 2.4: Der zeitliche Verlauf einer Geschwindigkeitskomponente  $u(t)$  in einer turbulenten Strömung mit der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$ , sowie deren Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$ . Grafik entnommen aus [6].

Zum einen in die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$ , sowie deren Schwankungsgröße  $u'$ . Bei  $\tau$  handelt es sich um die Zeitspanne der Messung  $t' - t$ . Der zeitliche Mittelwert wird durch Integration der Funktion  $u(t)$  über die Zeit ermittelt.

$$\bar{u} = \frac{1}{\tau} \int_t^{t'} u(t) dt \quad (2.2)$$

Die Turbulenz der Strömung wird anhand der Schwankungsgröße bzw. durch den RMS-Wert (Root Mean Square) der Geschwindigkeit charakterisiert.

$$u' = u_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_t^{t'} (u(t) - \bar{u})^2 dt} \quad (2.3)$$

Ein Gemisch aus Staub und Luft wird als Zwei- bzw. Mehrphasengemisch bezeichnet, da es sich um ein System mit einem Fluid und einem Feststoff handelt. Bei dem Befüllvorgang in die Laborapparatur handelt es sich um eine turbulente Zwei-Phasenströmung, da die eintretende Strömung eine hohe Reynoldszahl besitzt und sich das Staub/Luft-Gemisch nach dem Austritt aus der Staubaustrittsdüse unter hoher Turbulenz frei in das Staubkammerinnere verteilt. Die Geschwindigkeit des Strahls besitzt in der Strahlmitte die Mittengeschwindigkeit  $v_x$ . Durch die Ausbreitung in den freien Raum nimmt die Strömungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von dem Eintrittspunkt ab.

In Abbildung 2.5 ist ein drallfreier, axialsymmetrischer Freistrahls abgebildet, dessen Strahlprofil einen charakteristischen Verlauf besitzt. Hier sei erwähnt, dass sich diese Arbeit auf die Betrachtung des turbulenten Freistrahls beschränkt.

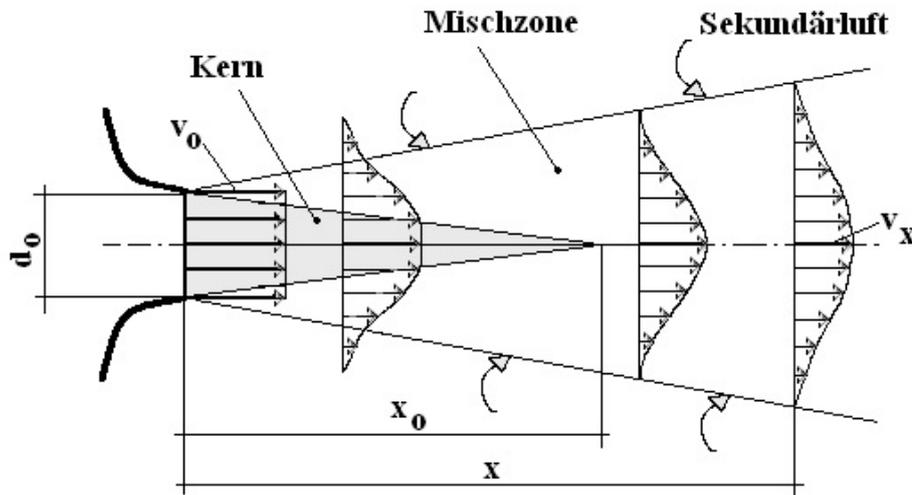


Abbildung 2.5: Ausbreitung eines Freistrahls in die freie Umgebung aus einer Düse mit dem Durchmesser  $d_0$ , der Maximalgeschwindigkeit  $v_0$  und der Mittengeschwindigkeit  $v_x$ . Der Kernbereich endet bei einem Abstand von  $x_0$ . Grafik entnommen aus [7].

Der Freistrahls lässt sich in drei Bereiche unterteilen: in den Kernbereich (Nahfeld), den Ähnlichkeitsbereich (Fernfeld), sowie einen Übergang zwischen den beiden Bereichen. Im kegelförmigen Kernbereich mischt sich die ungestörte Kernströmung mit der vom Rand her angesaugten Sekundärluft, d.h. das Fluid aus der Umgebung wird an dem Randbereich in die Kernströmung hinein transportiert. Dieser Vorgang wird als Entrainment bezeichnet. Mit zunehmendem Abstand zur Düse nimmt die Mittengeschwindigkeit  $v_x$  ab und der Strahlradius verbreitert sich.

Im Fernfeldbereich nimmt die Geschwindigkeit  $v_x$  von der Strahlmitte nach außen hin ab. Das sich bildende Profil lässt sich in Form einer Gauß'schen Glockenkurve<sup>1</sup> beschreiben. Zwischen Nah- und Fernfeld herrscht eine Übergangszone. In diesem Bereich nähert sich das Geschwindigkeitsprofil einer selbstähnlichen Form an. Nach [8] ist der Freistrah voll ausgebildet, wenn er den Ähnlichkeitsbereich erreicht. In dieser Arbeit soll überprüft werden, ob sich das Staub/Luft-Gemisch in das Staubkammerinnere in dem beschriebenen Strömungsprofil ausbreitet. Zu diesem Zweck werden Staubkonzentrations- und Geschwindigkeitsdaten auf der Strahlachse aufgenommen und analysiert.

## 2.3 Strömungssimulation

Es existieren verschiedene Ansätze in der Strömungsmechanik, um Strömungsmodelle am Computer darzustellen bzw. zu simulieren. In diesem Abschnitt sollen die Unterschiede deutlich gemacht und gezeigt werden mit welchen Grenzen die einzelnen Methoden verbunden sind [9]. Abbildung 2.6 gibt einen Überblick der drei beschriebenen Näherungsverfahren wieder, wobei der Grad der Modellierung über den Rechenaufwand aufgetragen ist.

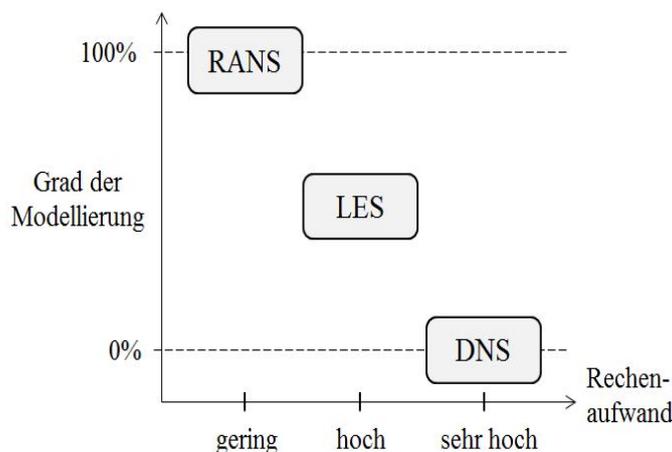


Abbildung 2.6: Der Grad der Modellierung, dargestellt über den Rechenaufwand. Grafik entnommen aus [10].

### *Direkte Numerische Simulation (DNS)*

Die Direkte Numerische Simulation, kurz DNS, ist eine Berechnungsmethode der Strömungsmechanik, in der auch kleinskalige turbulente Schwankungen numerisch in Raum und Zeit aufgelöst und nicht durch Turbulenzmodelle dargestellt werden. Die DNS ist die genaueste Methode, Strömungen zu simulieren, damit verbunden ist jedoch ein hoher Rechenaufwand sowie die höchste Anforderung an das numerische Verfahren.

<sup>1</sup>Nach dem Mathematiker Carl-Friedrich Gauß 1777-1855.

### *Reynolds-Averaged Navier-Stokes-Simulation (RANS)*

Für die Praxis sind oft nur einige quantitative Eigenschaften einer turbulenten Strömung von Interesse. Die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen sind in diesem Fall eine mögliche Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen<sup>2</sup>. In diesem Ansatz wird die Strömungsgeschwindigkeit als Summe der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  und der Schwankungsgeschwindigkeit  $u'$  (siehe Gleichung 2.2 und 2.3) betrachtet und die Navier-Stokes-Gleichung nach  $\bar{u}$  gelöst. Aufgrund der Nichtlinearität der Navier-Stokes-Gleichungen müssen durch die Reynolds-Mittelung entstehende Terme modelliert werden. Durch die Turbulenzmodelle erhöht sich einerseits der Grad der Modellierung, andererseits wird der Rechenaufwand im Vergleich zur dem DNS-Modell deutlich gesenkt.

### *Large Eddy Simulation (LES)*

Die numerische Simulation des Forschungsprojektes F-05-1802 arbeitet mit der Large Eddy Simulation, kurz LES oder auch Grobstruktursimulation genannt. Diese bildet einen Kompromiss zwischen den beiden oben erläuterten Methoden. Bei dieser Methode wird zwischen Grob- und Feinstruktur unterschieden. Die großen Wirbelstrukturen, sogenannte „large eddies“ werden numerisch simuliert, während kleine Wirbel anhand eines Feinstrukturmodells dargestellt werden. Dies kann sinnvoll sein, da die großskaligen Bewegungen im Allgemeinen den größten Beitrag zu einer Strömung liefern.

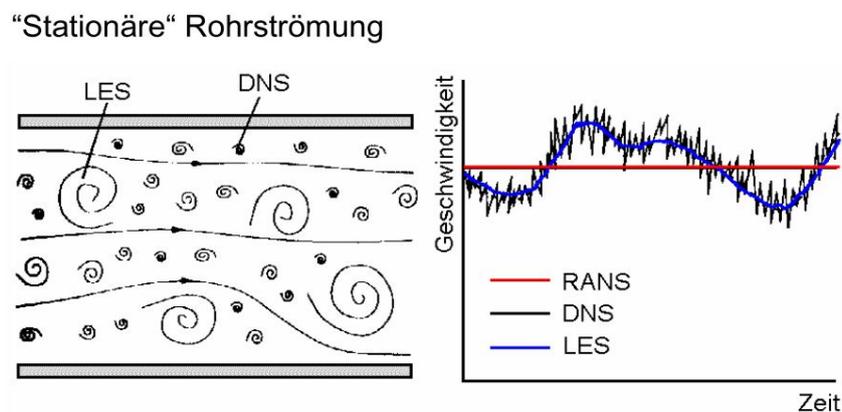


Abbildung 2.7: Überblick der verschiedenen Berechnungsmethoden. Die Darstellung einer stationären Rohrströmung (links) zeigt den Unterschied zwischen LES und DNS. Ein Geschwindigkeitsverlauf (rechts) vergleicht den Näherungsansatz der drei beschriebenen Modelle. Grafik entnommen aus [10].

Die drei betrachteten Näherungsverfahren sind in Abbildung 2.7 zusammenfassend dargestellt. Das linke Bild soll den Unterschied zwischen DNS und LES verdeutlichen. Die DNS betrachtet selbst kleine Strömungsvorgänge, daraus resultiert jedoch ein erhöhter Rechenaufwand. Die LES beschränkt sich auf die numerische Lösung der groben Strukturen, in diesem Fall große Wirbel. Der Rechenaufwand sinkt im Vergleich zur DNS.

<sup>2</sup>Die Navier-Stokes-Gleichungen sind ein mathematisches Modell der Strömung von linear-viskosen newtonschen Fluiden. Die Navier-Stokes-Gleichungen sind nicht analytisch lösbar, sondern können nur durch Näherungsmodelle wieder gegeben werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die vorliegende Arbeit die Large Eddy Simulation die beste Lösung darstellt. In Abbildung 2.7 ist auf der rechten Seite ein Geschwindigkeitsverlauf abgebildet, um die Nährungsverhalten der betrachteten Modelle zu verdeutlichen. Der DNS-Ansatz ist aufgrund des geringen Grades der Modellierung das genaueste Näherungsverfahren. Darauf folgt der LES-Ansatz, da es möglich ist, den Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit mit einer geringeren Genauigkeit darzustellen. RANS-Modelle liefern für den vorliegenden Fall eine zu geringe Genauigkeit [6].

## 2.4 Messunsicherheit

Beim Messen einer physikalischen Größe treten Messfehler auf. Diese lassen sich in systematische und statistische Fehler unterscheiden. Ein systematischer Fehler liegt dann vor, wenn z. B. das verwendete Messgerät nicht korrekt kalibriert ist. Ebenso können systematische Fehler durch das angewandte Messverfahren selbst entstehen z. B. wenn dem Anwender stets der selbe Fehler bei der Versuchsdurchführung unterläuft. Statistische Fehler dagegen sind zufällige Fehler, die nicht beeinflussbar sind. Die daraus resultierende Messunsicherheit  $\sigma$  lässt sich wie folgt definieren [11]:

$$\sigma = v + |w| \quad (2.4)$$

Das Vertrauensintervall  $v$  ist der durch den statistischen Fehler verursachte Anteil. Dieser lässt sich durch eine Wahrscheinlichkeitsrechnung bestimmen. Der systematische Restfehler lässt sich nicht erfassen und wird durch  $w$  abgeschätzt. Es gilt zunächst die Annahme, dass die Messdaten einer Normalverteilung unterliegen. Die Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2} \quad (2.5)$$

ist ein Maß für die Abweichung der Einzelwerte  $l_i$  vom wahren Wert  $\bar{l}$ , sprich die Streuung der Messwerte. Für einen großen Stichprobenumfang  $n$  liegt die Wahrscheinlichkeit  $P$  bei 68,3 % einen Einzelwert  $l_i$  zu messen, innerhalb des Intervalls  $\bar{l} = \pm s$ . Je breiter das Intervall, desto größer die Wahrscheinlichkeit, Einzelwerte innerhalb des Intervalls zu messen. Alle Messungen ergeben zusammen eine Stichprobe vom Umfang  $n$ . Nach [11] wird ein Vertrauensbereich von  $v = 3 \cdot m$  empfohlen, sodass mit einer Wahrscheinlichkeit  $P$  von 99,7 % aller Messwerte innerhalb des Intervalls liegen. Die Größe  $m$  berechnet sich aus der Standardabweichung  $s$  und dem Stichprobenumfang  $n$ .

$$m = \pm \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.6)$$

Nach Gleichung (2.4) und (2.6) ergibt sich eine angepasste Messunsicherheit  $\sigma$ .

$$\sigma = 3 \cdot |m| + |w| \quad (2.7)$$

# Kapitel 3

## Experimenteller Aufbau

In diesem Kapitel werden die zum Versuchsaufbau notwendigen Messgeräte, das Staubkonzentrationsmessgerät und das Laser-Doppler-Anemometer, in Abschnitt 3.1 beschrieben. Des Weiteren werden in Abschnitt 3.2 diejenigen Komponenten aufgeführt, die für den Messaufbau erforderlich sind. Dazu gehören die Staubkammer, der Partikeldosierer RBG<sup>1</sup> 1000 sowie der Ringionisator.

### 3.1 Verwendete Messgeräte

Mit Hilfe eines Staubkonzentrationsmessgerätes, kurz SKG, wird die Staubkonzentration in der Luft gemessen. Ein Laser-Doppler-Anemometer, kurz LDA, dient zur Aufnahme der Partikelgeschwindigkeit und der Bestimmung des Turbulenzgrades in der Strömung. Das Messprinzip der Messgeräte sowie notwendige Formeln zur Umrechnung der Rohdaten in die auszuwertenden Messdaten werden aufgeführt. Die Informationen sind aus [12, 13, 14, 15, 16, 11] entnommen.

#### 3.1.1 Staubkonzentrationsmessgerät

Das beschriebene Staubkonzentrationsmessgerät wurde von der FSA zur kontinuierlichen Registrierung von Staubkonzentrationen in technischen Prozessen entwickelt. Das Messprinzip des SKG ist in Abbildung 3.1 dargestellt und beruht auf der Absorption von infrarotem Licht durch Staubpartikel. Der Sender in dem Messkopf beinhaltet eine Infrarotdiode, die eine Intensität  $I_0$  durch das zu untersuchende Medium in Richtung des Empfängers emittiert. Bei dem Empfänger handelt es sich um eine Fotodiode, die sich auf der optischen Strahlachse des Senders befindet. Das Licht wird an den Staubpartikeln auf dem Weg  $l$  vom Sender zum Empfänger gestreut und absorbiert, wodurch es zu einer Abschwächung der Intensität kommt.

---

<sup>1</sup>Rotating Brush und Generator.

Der Empfänger misst dadurch eine geringere Lichtintensität  $I$  als die von Sender zum Empfängers abgestrahlte Intensität  $I_0$ . Die Schwächung der Intensität ist ein Maß für die Staubkonzentration.

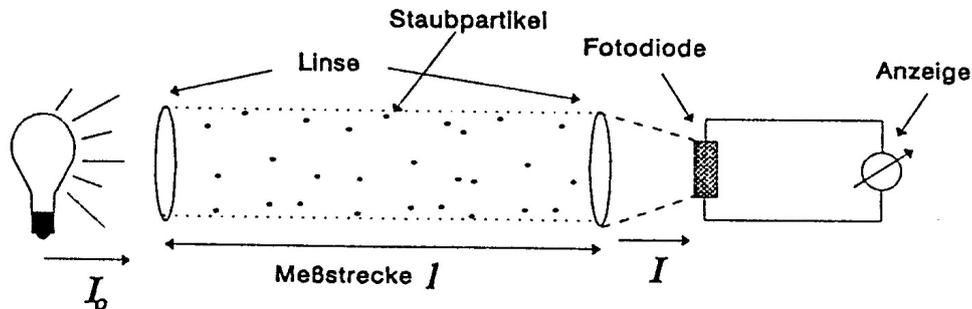


Abbildung 3.1: Schematisch dargestelltes Messprinzip der Staubkonzentrationsmessung. Durch Absorption und Lichtstreuung an den Staubpartikeln wird die Intensität des Lichtstrahls  $I_0$  reduziert. Grafik entnommen aus [13].

Die Extinktion  $E$  ist ein Maß für die Lichtundurchlässigkeit eines Stoffes. Sie ist durch das Lambert-Beer'sche Gesetz mit der Intension verknüpft:

$$I = I_0 \cdot e^{-E} = I_0 \cdot e^{-\epsilon \cdot c \cdot l} \quad (3.1)$$

Aus Gleichung (3.1) wird deutlich, dass die Extinktion von den drei Größen Staubkonzentration  $c$ , Länge  $l$  der durchleuchteten Strecke sowie vom Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  abhängt. Die Stoffkonstante  $\epsilon$  muss über eine Kalibriermessung am zu prüfenden Staub ermittelt werden. Die gesuchte Staubkonzentration  $c$  lässt sich damit an Hand des bekannten Abstandes  $l$  zwischen Infrarotsender und -empfänger, der am Sender registrierten Intensität  $I_0$  sowie der am Empfänger gemessenen Intensität  $I$  berechnen. Aus (3.1) folgt die Extinktion durch Umstellen und Logarithmieren:

$$E = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = c \cdot \epsilon \cdot l \quad (3.2)$$

Das Staubkonzentrationsmessgerät besteht aus zwei Komponenten, einer Messeinheit (Messkopf), mit der die Spannungsmessdaten erfasst werden, und einer Anzeige- und Steuereinheit, mit der die Daten verarbeitet und angezeigt werden (Abb. 3.2). Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Spannung und der registrierten Intensität ist in Gleichung (3.3) beschrieben:

$$U_{\text{SKG}} = 1 \text{ V} \cdot \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \quad (3.3)$$

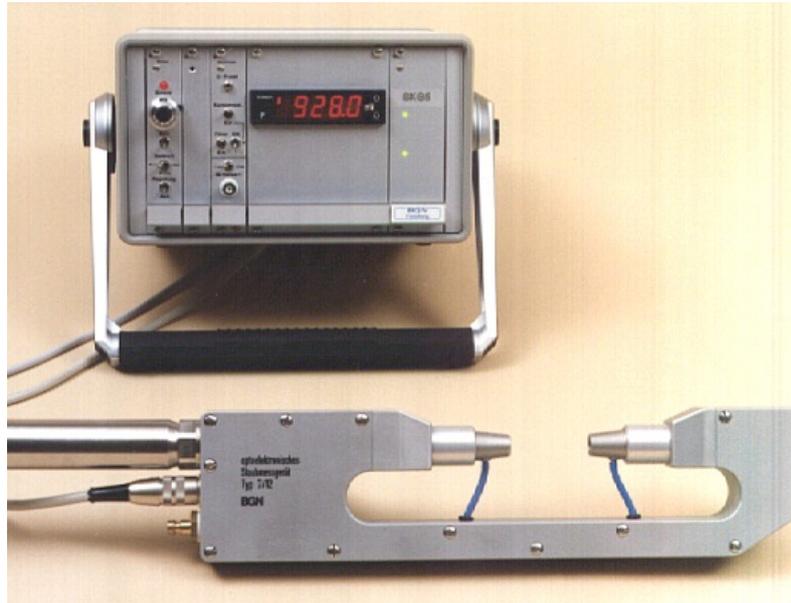


Abbildung 3.2: Das SKG der fünften Generation der FSA, bestehend aus Anzeigeeinheit (hinten) und optoelektronischer Messeinheit (vorne rechts). Grafik entnommen aus [12].

Die Anzeige- und Steuereinheit des SKG ist ein tragbares Gerät, in dem das Netzteil, zwei Elektronikarten für die Sende- und Empfängerdiode sowie ein digitales Display zur Anzeige der gemessenen Spannung  $U_{SKG}$  untergebracht sind. Die Sendediode ist eine Laserdiode und strahlt Infrarotlicht in einem schmalen Wellenlängenbereich um 950 nm. Im Gegensatz dazu ist die gegenüberliegende Empfängerdiode eine Fotodiode, die im betreffenden Spektralbereich sensitiv ist. Eine Linse vor den jeweiligen Dioden bündelt das Licht zu einem parallelen Strahl. Mit Hilfe eines Druckluftanschlusses können die Linsen während der Messung gesäubert werden. In Abbildung 3.3 ist die Skizze eines SKG-Messkopfes abgebildet.

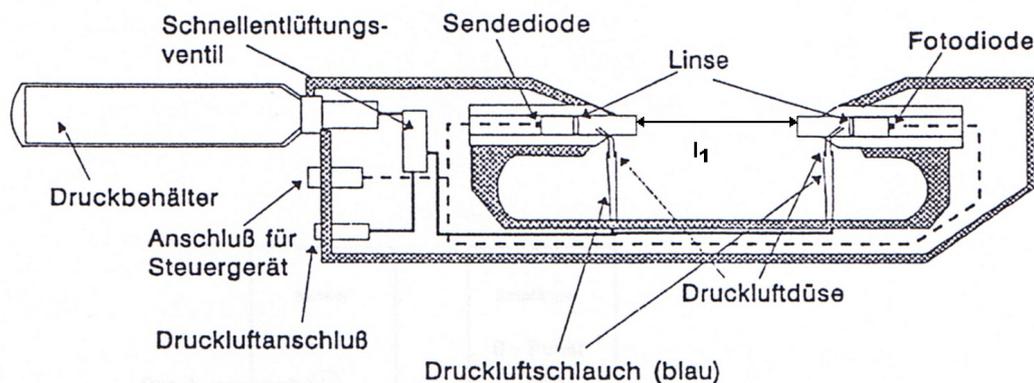


Abbildung 3.3: Aufbauskitze eines SKG-Messkopfes. Grafik entnommen aus [13].

Zur Transformation der gemessenen Spannung  $U_{\text{SKG}}$  in einen Konzentrationswert  $c$  muss eine Kalibrierkurve für den zu untersuchenden Feststoff erstellt werden um den Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  zu bestimmen. Hierfür wird in den Strahlengang der Messeinheit des SKGs ein infrarotdurchlässiges Kalibriergefäß gebracht. Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau zur Erfassung der Kalibrierpunkte. Das Gefäß befindet sich auf einer Rührplattform mit Magnetrührer und wird mit Ethanol gefüllt. Anschließend werden abgewogene Staubportionen unter ständigem Rühren in die Flüssigkeit gegeben und jeweils die Ausgabespannung  $U_{\text{SKG}}$  am SKG abgelesen. Ein Beispiel für die so entstandenen Kalibrierpunkte ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Für die Ausgabespannung gilt:

$$U_{\text{SKG}} = 1 \text{ V} - 1 \text{ V} \cdot e^{-E} = 1 \text{ V} - 1 \text{ V} \cdot e^{-\epsilon \cdot l \cdot c} \quad (3.4)$$

Über diesen Zusammenhang kann per Regressionsrechnung eine Kalibrierkurve erstellt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen Sender und Empfänger gegebenenfalls angepasst werden muss. Die Konzentration  $c$  ist abhängig von dem Abstand  $l$  zwischen Infrarotsender und -empfänger. Bei der Kalibrierung wird ein Gefäß mit einer Messweite von  $l_2 = 42 \text{ mm}$  genutzt, der Abstand der SKG-Messeinheit im Betrieb beträgt  $l_1 = 50 \text{ mm}$  (siehe Abb. 3.3). Somit ergibt sich eine längenabhängige Korrektur von  $l = l_1/l_2$ . Durch Auflösen der Formel (3.4) nach der Konzentration  $c$  kann der Zusammenhang zwischen gemessener Spannung  $U_{\text{SKG}}$  und der Extinktion  $E$  hergestellt werden [15].

$$c = \ln \left( 1 - \frac{U_{\text{SKG}}}{1 \text{ V}} \right) \cdot \frac{1}{(-l \cdot \epsilon)} \quad (3.5)$$



Abbildung 3.4: Vorrichtung zur Erfassung der Kalibrierkurve des SKG. Der Messkopf durchleuchtet ein mit Ethanol gefülltes Kalibriergefäß. Eine Rührplattform sorgt für eine ausreichende Durchmischung des Feststoffes in der Kalibrierflüssigkeit.

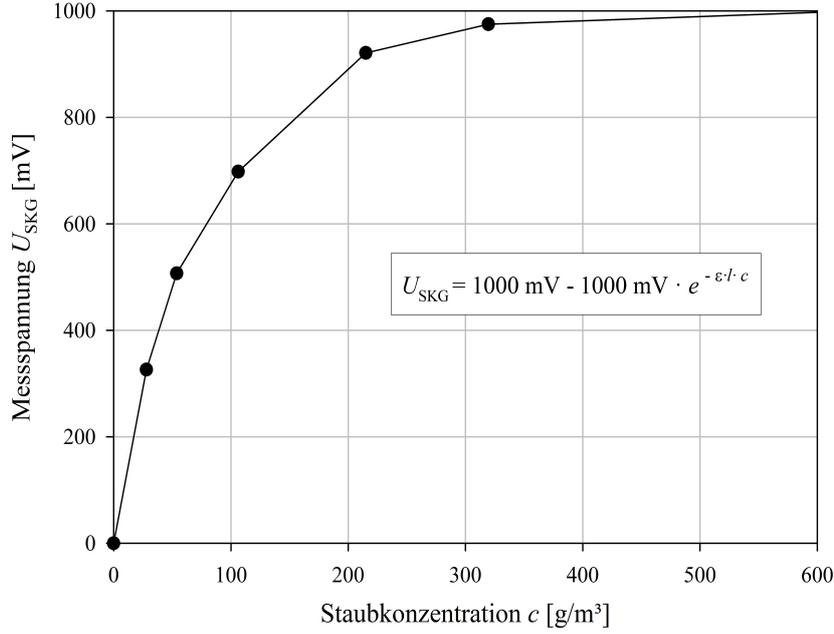


Abbildung 3.5: Kalibrierpunkte des SKG für Maisstärke.

In dieser Arbeit wurden fünf Staubkonzentrationsmessgeräte zur Aufnahme der Staubkonzentrationsmesswerte verwendet. Da es sich bei dem Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  um eine Stoffkonstante handelt, wird daher ein konstanter Wert bei allen SKG-Messgeräten erwartet. Aufgrund der verschiedenen Geräteeigenschaften, kann es bei den optischen Eigenschaften zu Unterschieden kommen [16]. Alle Steuergeräte wurden mit dem dazugehörigen Messkopf mit Ethanol und der verwendeten Maisstärke kalibriert. Dabei wurden für jedes SKG-Messgerät je fünf Kalibrierkurven erstellt.

Schwankungen bei der Erfassung der Kalibrierpunkte und der daraus folgenden Berechnung des Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  üben nach Gleichung (3.5) einen Einfluss auf die Konzentrationsberechnung aus. Die Auswirkung dieser Schwankung auf den Messwert soll anhand einer Fehlerfortpflanzung [11] gezeigt werden. Zur Bestimmung des größtmöglichen Fehlers wird in der Regel der sogenannte Größtfehler herangezogen. Er beschreibt das rechnerische Aufsummieren der Beträge der einzelnen Vertrauensbereiche. In diesem Fall stellt der statistische Messfehler der Kalibrierung einen Vertrauensbereich  $v_{c,\epsilon}$  der Konzentrationsmessung dar, der durch die statistischen Schwankung des Extinktionskoeffizienten  $v_\epsilon$  verursacht wird.

$$v_{c,\epsilon} = \left| \frac{\delta c}{\delta \epsilon} \right| \cdot |v_\epsilon| \quad (3.6)$$

Die partielle Ableitung der Gleichung (3.5) nach dem Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  ergibt:

$$v_{c,\epsilon} = \left| \frac{\delta}{\delta \epsilon} \left( \frac{1}{-l \cdot \epsilon} \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_{SKG}}{1V} \right) \right) \right| \cdot |v_\epsilon| \quad (3.7)$$

$$v_{c,\epsilon} = \left| \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{1}{l \cdot \epsilon} \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_{\text{SKG}}}{1V} \right) \right| \cdot |v_\epsilon| = \frac{1}{\epsilon} \cdot c \cdot v_\epsilon \quad (3.8)$$

Der Vertrauensbereich  $v_{c,\epsilon}$  wird auf die Staubkonzentration  $c$  bezogen. Durch Umstellen der Gleichung (3.8) ergibt sich die relative Abweichung des Vertrauensbereiches:

$$\frac{v_{c,\epsilon}}{c} = \frac{v_\epsilon}{\epsilon} \quad (3.9)$$

Daraus folgt, dass die relative Abweichung der Kalibrierung  $v_\epsilon$  bezogen auf den Extinktionskoeffizienten  $\epsilon$  der relativen Abweichung des Vertrauensbereiches  $v_{c,\epsilon}$  bezogen auf die Konzentration  $c$  entspricht. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick der mittleren Extinktionskoeffizienten  $\bar{\epsilon}$  der einzelnen SKG-Messgeräte, dem Vertrauensbereich  $v_\epsilon$ , sowie der Abweichung  $v_\epsilon/\bar{\epsilon}$  wieder. Der Anteil des Vertrauensbereiches  $v_{c,\epsilon}$  wird im späteren Verlauf zu dem Vertrauensbereich der Messung  $v_{\text{Mess}}$  dazu addiert und errechnet sich aus  $v_\epsilon/\bar{\epsilon}$  multipliziert mit dem Konzentrationswert  $c$ .

SKG	1	2	3	4	5
Extinktionskoeffizient $\bar{\epsilon}$ [m <sup>2</sup> /g]	0,1004	0,1133	0,1234	0,1060	0,1096
Vertrauensbereich $v_\epsilon$ [m <sup>2</sup> /g]	0,0007	0,0059	0,0033	0,0026	0,0020
Abweichung $v_\epsilon/\bar{\epsilon}$ [%]	0,69	5,20	2,69	2,46	1,84

Tabelle 3.1: Übersicht der mittleren Extinktionskoeffizienten  $\bar{\epsilon}$  der fünf SKG-Messgeräte mit  $n = 5$ , dem Vertrauensbereich  $v_\epsilon$ , sowie der Abweichung  $v_\epsilon/\bar{\epsilon}$ .

### 3.1.2 Laser-Doppler-Anemometer

Die Laser-Doppler-Anemometrie, kurz LDA, ist ein optisches, berührungsloses Messverfahren zur punktuellen Bestimmung von Geschwindigkeitskomponenten in Strömungen. Ein Laserstrahl wird mit Hilfe eines Strahlteilers in zwei Partialstrahlen aufgeteilt, die sich am Messpunkt kreuzen. Am Messpunkt entsteht so ein Interferenzstreifenmuster. In Abbildung 3.6 ist das, sich bildende Interferenzmuster schematisch dargestellt. Wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Laserlichtes,  $\Delta x$  der Abstand der Interferenzstreifen und  $\phi$  der Einfallswinkel der Laserstrahlen ist. Die Partikelgeschwindigkeit ist mit  $u$  definiert.

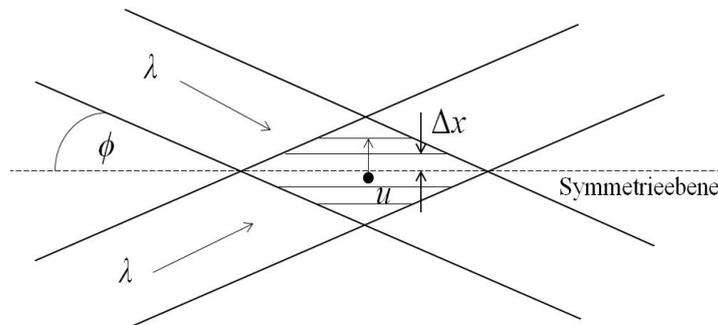


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung des Interferenzmusters am Messpunkt zweier Laserstrahlen der Wellenlänge  $\lambda$ . Grafik entnommen aus [17].

Bewegt sich ein Partikel durch das Streifenmuster, generiert es in einem Photodetektor ein moduliertes Streulichtsignal. Die Interferenzstreifen sind parallel zur Symmetrieebene und besitzen ein Intensitätsmaxima im Abstand von

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \phi} \quad (3.10)$$

Die Modulationsfrequenz des Signals ist proportional zu der Geschwindigkeitskomponente, die sich senkrecht zu den Interferenzstreifen befindet. Das Streulicht eines Partikels am Messpunkt ist abhängig von der Lichtintensität am Ort des Partikels. Bewegt sich ein das Teilchen mit der Geschwindigkeit  $u$  senkrecht zu dem Interferenzmuster, durchläuft es Intensitätsmaxima und Minima - das Streulicht ist moduliert. Damit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem Messsignal  $f$  und der Geschwindigkeit  $u$  der Partikel.

$$f = \frac{u}{\Delta x} = \frac{2 \sin \phi u}{\lambda} \quad (3.11)$$

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten LDA-System handelt es sich um ein Zweistrahl-Anemometer in Rückwärtsstreuordnung. In Abbildung 3.7 ist der schematische Messaufbau dargestellt.

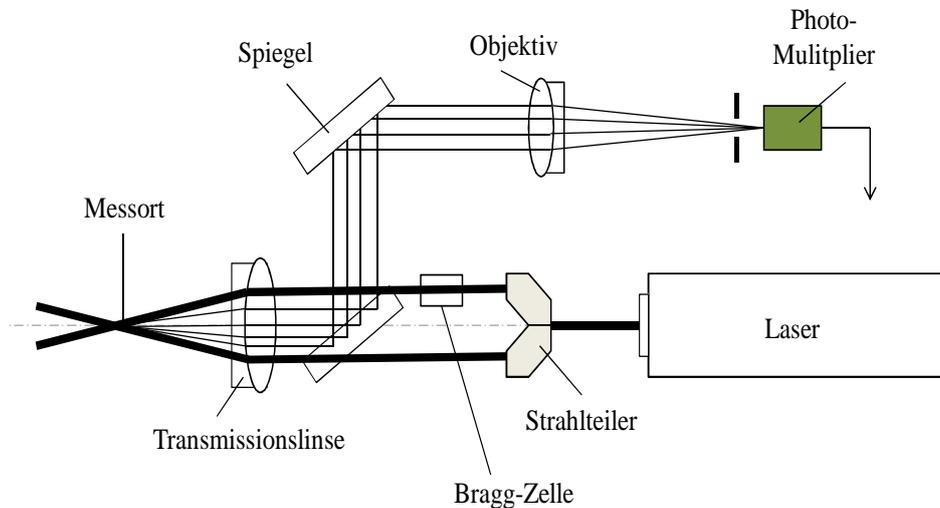


Abbildung 3.7: Prinzip der optischen Anordnung für Rückstreuungsmessungen mit dem Zweistrahl-Anemometer. Grafik entnommen aus [18].

Ein Laserstrahl wird mittels eines Strahlteilerprismas in zwei intensitätsgleiche Laserstrahlen aufgeteilt, diese werden über eine Transmissionslinse am Messort gebündelt. Das am Schnittpunkt entstehende Streulicht aus dem Messvolumen wird über die gleiche Transmissionslinse parallel gerichtet und über eine zweite Linse auf einen Photomultiplier konzentriert. Einer der Laserstrahlen durchläuft eine sogenannte Bragg-Zelle. Durch diese Zelle wird der Laserstrahl moduliert, es entsteht

eine Frequenzverschiebung. Durch die Überlagerung des frequenzverstärkten Strahls mit dem unmodulierten Teilstrahl wird im Messvolumen ein bewegtes Interferenzstreifenmuster erzeugt. Anhand dessen lässt sich neben der Partikelgeschwindigkeit auch die Richtung der gemessenen Geschwindigkeit bestimmen. Eine Aufnahme von „negativen“ Geschwindigkeiten bedeutet, dass die Partikel gegen die Messrichtung strömen z. B. durch Rezirkulation.

Das für die Arbeit verwendete LDA des Herstellers Dantec besteht aus zwei Messgeräten, dem FlowLite und dem Flow Velocity Analyzer, sowie einem Messkopf FiberFlow (Abbildung 3.8). Die FiberFlow Sonde ist per Kabel mit dem Gerät FlowLite verbunden. Dieses beinhaltet einen Helium-Neon-Laser sowie einige optische Bauelemente. Das Verbindungskabel bestehend aus Glasfasern und elektrischen Leitungen zur Licht- und Datenübertragung führt u.a. Hochspannung zu dem Photomultiplier in der Sonde. Der Flow Velocity Analyzer enthält die Messelektronik und analoge Datenverarbeitung. Ein Vorteil der LDA-Messung gegenüber herkömmlichen Messmethoden ist die Unabhängigkeit der Umgebungsbedingungen, wie z. B. Druck, Temperatur oder Dichte auf die Messung [18].



Abbildung 3.8: Messgerätschaften bestehend aus FlowLite (links, oben) und Flow Velocity Analyzer (links, unten) sowie der Messsonde FiberFlow (rechts).

## 3.2 Messaufbau

Um das gesamte Konzentrationsfeld in einer Versuchsdurchführung erfassen zu können, werden alle fünf SKG-Messköpfe ortsfest in den Messaufbau positioniert. Die SKG-Messköpfe üben durch ihre Größe einen erheblichen Einfluss auf das Strömungsfeld innerhalb der Staubkammer aus. Das Messen der Konzentration an verschiedenen Orten durch Versetzen des Messkopfes würde das Messergebnis verfälschen. Die einzelnen Versuche wären untereinander nicht vergleichbar. Im Gegensatz dazu wird der LDA-Messkopf bei der Geschwindigkeitsmessung für jeden Versuch neu positioniert. Hier wird das Strömungsfeld demnach verändert, durch die kompakte Größe des LDA-Messkopfes wird die Strömung jedoch weniger beeinflusst als durch die SKG-Messköpfe.

Bei der Entwicklung der Messmethode musste ein Messaufbau konstruiert werden, der es den Sensoren zur Datenaufnahme ermöglicht, innerhalb des zu untersuchenden Messraumes die Position in einem gewählten Rahmen präzise und reproduzierbar zu wechseln. Abbildung 3.9 zeigt den Messaufbau, wobei hier die Messköpfe der SKGs (unten) bzw. der Messkopf des LDA (oben) auf Schienen und Hubsäulen montiert sind, um verschiedene Messorte realisieren zu können. Die Bauteile wurden mit einem technischen Zeichenprogramm erstellt. Eine Staubkammer aus Edelstahl bildet die räumliche Grenze des Untersuchungsvolumen und ist wegen der besseren Übersichtlichkeit nicht in der Abbildung dargestellt.

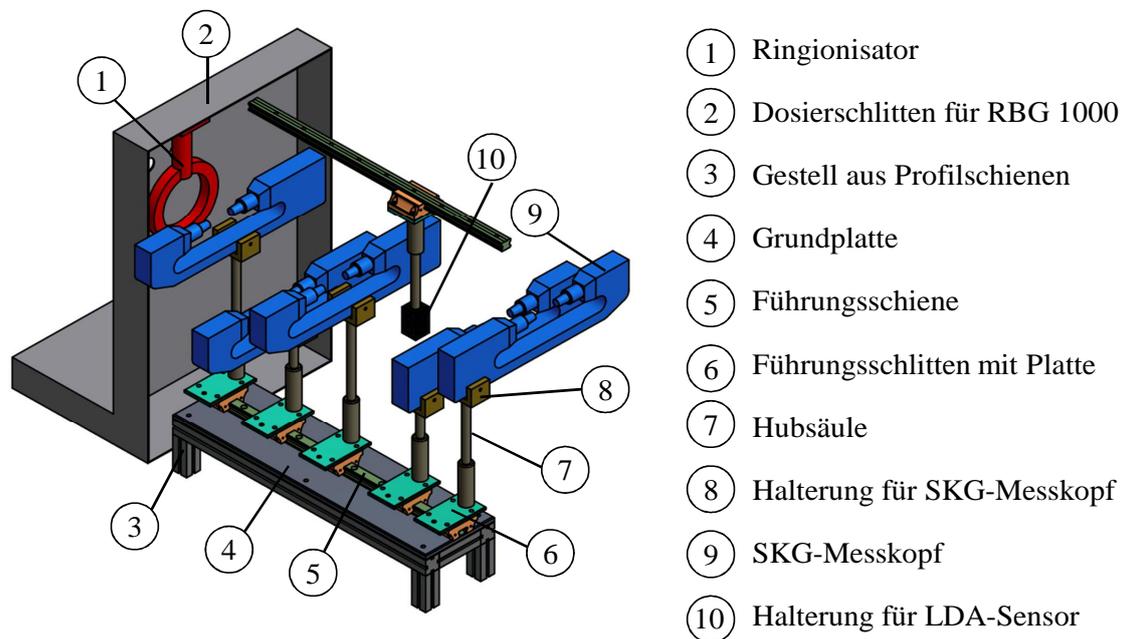


Abbildung 3.9: Das 3D-Modell des Messaufbaus zeigt alle Einbauten. Die Einbauten sind nummeriert und in der Legende beschrieben.

Der Ionisationsring (1) entlädt elektrostatisch aufgeladene Partikel beim Eintritt in das Staubkammerinnere. Zur Aufnahme der Dosiereinheit RBG 1000 wird der sogenannte Dosierschlitten (2) von links in die Staubkammer eingefahren und an der Staubkammer selbst arretiert. Die Führungsschiene (5) mit passendem Führungsschlitten (6) ist mit dem Gerüst aus Aluminium-Profilschienen (3) auf einer Grundplatte (4) verbunden. Um den Messkopf des SKG (9) vertikal positionieren zu können, werden auf dem Führungsschlitten Halterungsplatten und Hubsäulen (7) zur Aufnahme (8) des Messkopfes angebracht. Die Säulen dienen zur Aufnahme von Stativstiften, die in verschiedenen Längen verfügbar sind. Der SKG-Messkopf (9) wird aufgrund seiner Größe von unten mit Hilfe einer Hubsäule an die Strahlachse herangeführt. Der Messsensor des LDA (10) ist über eine Halterung ebenfalls an einer Hubsäule befestigt und kann durch eine Führungsschiene an der Staubkammerdecke positioniert werden. Die technischen Zeichnungen des Versuchsaufbaus ist in weiteren Darstellungen in Anhang A hinterlegt.

### 3.2.1 Staubkammer

Das Gehäuse der Staubkammer besteht aus 3 mm starkem Edelstahl. Die Außenmaße betragen 785 mm x 610 mm x 715 mm. Eine gute Zugänglichkeit wird durch zwei große Türen auf der Vorderseite gewährleistet. Die Staubkammer stammt aus einer Vorgängerarbeit [12] und wurde für die vorliegende Arbeit modifiziert. Dazu wurden alle bestehenden Inneneinbauten entfernt, sowie alle vorhandenen Durchgangslöcher verschlossen bzw. abgedichtet, um eine Ausbreitung der Staubwolke außerhalb der Staubkammer zu verhindern. Abbildung 3.10 zeigt die Staubkammer in geschlossenem Zustand (links) und geöffneten Zustand ohne Inneneinbauten (rechts).



Abbildung 3.10: Staubkammer mit Dosierschlitten und Dosiereinheit RBG 1000 (links). Staubkammer geöffnet ohne Inneneinbauten (rechts).

### 3.2.2 Partikeldosierer RBG 1000

Mit dem Partikeldosierer RBG 1000 der Firma Palas ist es möglich, sowohl Pulver als auch Stäube nahezu als Einzelpartikel in einen luftgetragenen Zustand zu überführen. Dabei wird eine gleichmäßige, kontinuierliche Dispergierung von Partikeln in der Luft und eine genaue Dosierung des Stoffes erreicht. Für die Arbeit mit dem RBG 1000 eignen sich Stäube bzw. Pulver mit Partikeldurchmessern kleiner  $100 \mu\text{m}$ , diese sollten weiterhin nicht feucht, klebend und korrosiv gegenüber Edelstahl sein.

Das Kernstück des RBG 1000 bildet der Dispergierkopf, welcher aus einem Dispergierdeckel und einer rotierenden Dispergierbürste besteht. Unterhalb des Dispergierkopfes befindet sich ein Feststoffbehälter mit Transportkolben (Abb. 3.11). Der Feststoffzylinder wird durch mehrmaliges Einfüllen und Verdichten der Staubmasse befüllt. Aus der eingefüllten Staubmasse bezogen auf das Zylindervolumen des Feststoffbehälters resultiert die Stopfdichte  $q$ . Während des Dispergiervorganges wird kontinuierlich Staub mit Hilfe des Transportkolbens, der von unten auf die Staubsäule im Feststoffbehälter drückt, an die Dispergierbürste herangefördert. Die Vorschubgeschwindigkeit kann dabei genau eingestellt werden. Die rotierende Dispergierbürste transportiert den Staub

vom Feststoffbehälter in den Dispergierdeckel, durch den kontinuierlich Luft strömt und von wo die Staubpartikel durch den über die Bürste blasenden Luftstrom in den Innenraum der Staubkammer abtransportiert werden. Eine sogenannte Staubeintrittsdüse bildet die Verbindung zwischen dem RBG 1000 und der Staubkammer. Detaillierte Informationen zum RBG 1000 finden sich in [19].

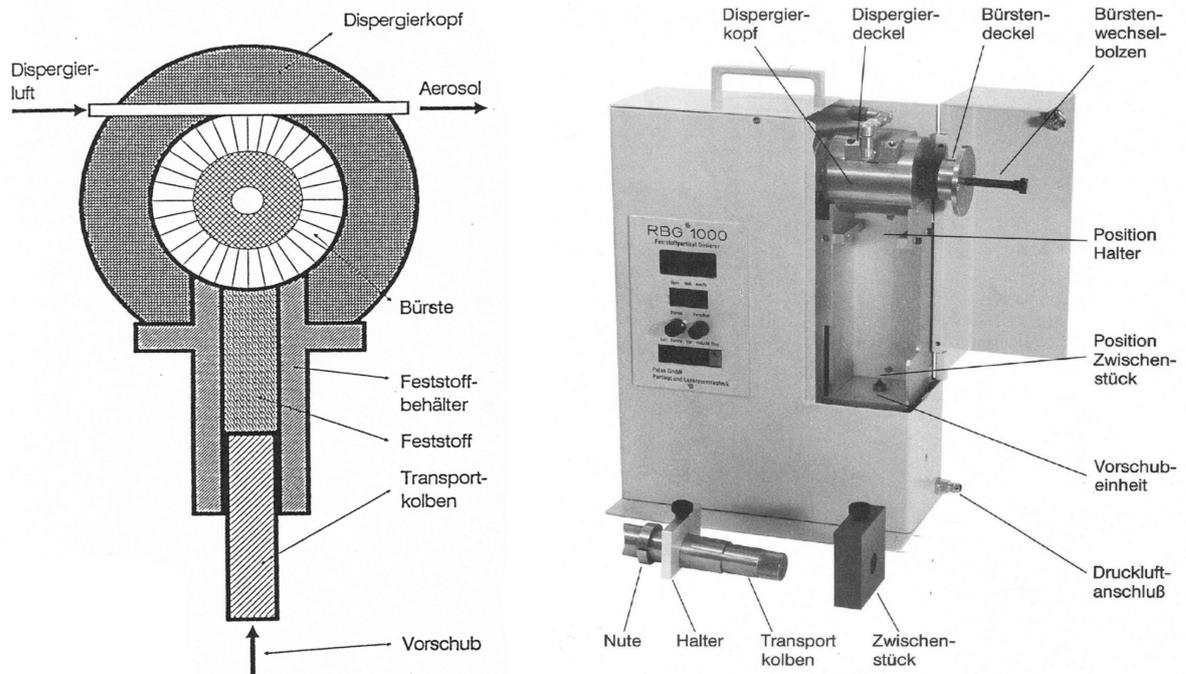


Abbildung 3.11: Schematisch dargestelltes Funktionsprinzip des Partikeldosierers (links), Foto des RBG 1000 mit Beschreibung diverser Baugruppen (rechts). Grafik entnommen aus [19].

### 3.2.3 Ringionisator

Durch Kollisionen der Staubpartikel lädt sich der Staub elektrostatisch auf. Um einer elektrostatischen Aufladung entgegen zu wirken, können Ionisatoren verwendet werden. Der Ionisator wird mit Wechselspannung betrieben und erzeugt im Takt der Netzspannung (50 Hz) abwechselnd positive oder negative freie Ionen zum Neutralisieren von elektrostatischen Flächenladungen. Der im Versuchsaufbau verwendete Ionisator ist als Ringelektrode (Außendurchmesser: 140 mm) ausgeführt. Im Ring sind zahlreiche Nadelelektroden so angeordnet, dass sie radial nach innen auf das Zentrum des Ringes zeigen, was zur Folge hat, dass sich freie Ionen im gesamten Ringquerschnitt befinden. Alle Staubpartikel, die sich durch die Ringelektrode bewegen, werden auf diese Art und Weise entladen [20].

# Kapitel 4

## Experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel werden zu Beginn in Abschnitt 4.1 die Randbedingungen untersucht. Des Weiteren wird in Abschnitt 4.2 das Versuchsprogramm vorgestellt und in Abschnitt 4.3 die Versuchsdurchführung beschrieben. Bei der Darstellung der Messwertergebnisse in Abschnitt 4.4 werden zuerst die Konzentrationsmesswerte und anschließend die Geschwindigkeitsmesswerten aufgeführt. In Abschnitt 4.5 erfolgt die Auswertung der Messwerte. Den Abschluss dieses Kapitels bildet in Abschnitt 4.6 eine Visualisierung des Strömungsfeldes innerhalb der Staubkammer.

### 4.1 Untersuchung der Randbedingungen

In diesem ersten Abschnitt werden Aspekte beschrieben, die vor der eigentlichen Untersuchung betrachtet werden müssen. Zum einen werden die Materialeigenschaften des untersuchten Probenmaterials genauer charakterisiert und der Einfluss der Umgebung betrachtet. Weiterhin soll eine erste visuelle Betrachtung Aufschluss über eine mögliche Agglomeratbildung der Staubpartikel im Staubkammerinneren geben.

#### 4.1.1 Staubeigenschaft

Bei dem verwendeten Staub handelt es sich um getrocknete Maisstärke mit einem massenbezogenen Restfeuchtegehalt von 4,3 %. Maisstärke ist nicht giftig, in großen Mengen verfügbar und ein typischer Vertreter der Nahrungsmittelindustrie. Die Partikelgrößenverteilung, kurz PGV, von Maisstärkepartikeln ist relativ eng verteilt. In Abbildung 4.1 ist die Verteilungsdichte  $q_3$  und die Verteilungssumme  $Q_3$  von der verwendeten getrockneten Maisstärke abgebildet. Die Verteilungsdichte  $q_3$  ist mit einer Häufigkeitsverteilung gleichzusetzen. Die Verteilungssumme  $Q_3$  beschreibt die kumulative Aufsummierung von  $q_3$ .

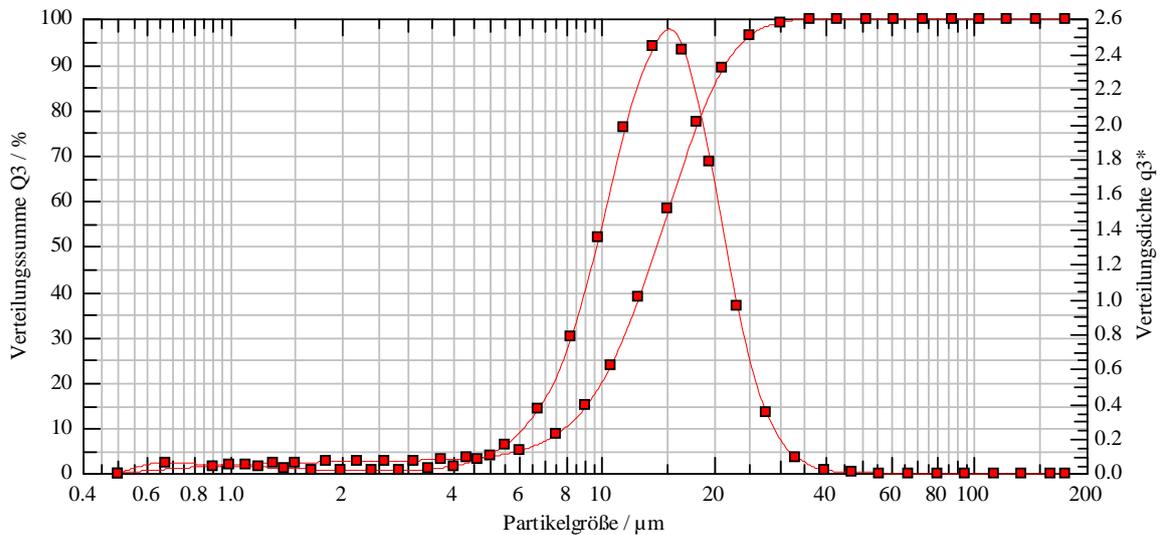


Abbildung 4.1: Partikelgrößenverteilung von getrockneter Maisstärke mit Verteilungsdichte  $q_3$  und Verteilungssumme  $Q_3$ .

Die Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V (FSA) bzw. die Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe (BGN) forschen seit vielen Jahren auf dem Gebiet des Explosionsschutzes. Maisstärke zählt dabei neben Weizenmehl und Kristallzucker zu den Standardstäuben in der experimentellen Explosionsforschung. Die gute Handhabbarkeit von Maisstärke sowie die vergleichsweise hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse prädestinieren den Staub als Probenmaterial für die nachfolgenden Versuche.

### 4.1.2 Umgebungsbedingung

Das Raumklima war aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht kontrolliert regelbar. Während der Messdatenerzeugung dieser Arbeit wurden die Einflussfaktoren Raumtemperatur sowie Raumfeuchte mit dem Feuchte- und Temperaturmessgerät Novasina ms1 der Firma ESZ AG Calibration & Metrology aufgenommen. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Minimal- bzw. Maximalwerte, sowie die Mittelwerte und deren Standardabweichung  $s$  wieder. In Kapitel 4.5.2 wird der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Versuchsergebnis untersucht.

Parameter	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabw.
Temperatur $T$ [°C]	23,3	27,5	25,3	1,0
Relative Feuchte $\varphi$ [%]	36,2	70,0	50,2	6,9

Tabelle 4.1: Daten der Temperatur- und relative Feuchtemessung im Versuchslabor. Zu jedem durchgeführten Versuch wird ein Temperatur-Luftfeuchtepaar aufgezeichnet.

### 4.1.3 Untersuchung der Agglomeratbildung

Bei der numerischen Simulation spielt die Partikelgröße bzw. die Partikelgrößenverteilung eine große Rolle. Als erste Annahme des Näherungsmodelles wird eine monodisperse Verteilung der Partikel angenommen. Als Teil dieser Arbeit soll daher die Agglomeratbildung innerhalb der Staubkammer untersucht werden. Um die Agglomeratbildung zu untersuchen, wurde ein Probenehmer in der Staubkammer angebracht. Der Probenehmer besteht aus einem 10 cm x 10 cm x 10 cm großen Aluminiumkasten, der mit der Unterseite an der Staubkammerdecke montiert ist. Abbildung 4.2 zeigt den Probenehmer in geschlossenem (links), sowie geöffnetem Zustand (rechts).



Abbildung 4.2: Probenehmer zur Aufnahme eines Partikelbildes zur visuellen Beurteilung der Agglomeratbildung innerhalb der Staubkammer.

Durch zwei Gewindestangen war es möglich eine Halterung in die Staubkammer herab zulassen, in dieser wird ein Objektträgers aus Glas durch zwei Schrauben fixiert. Um den Probenehmer zu verschließen, wird an die Objektträgerhalterung eine 10 cm x 10 cm große Platte verschraubt. Die Dosiereinheit RBG 1000 wurde gestartet und der Probenehmer in die Staubkammer herabgelassen. Die eintretenden Partikel bedecken den Objektträger mit einer dünnen Schicht, es entsteht ein Partikelbild. Die Partikelbilder wurden bei Referenzbedingungen<sup>1</sup> und unterschiedlicher Aufnahmedauer  $t_{\text{Probe}}$  erzeugt. Der Probenehmer war zu Beginn der Dosierung für 10 Sekunden geschlossen und wurde für die jeweilige Aufnahmedauer geöffnet und die Halterung herabgelassen. Die Objektträger wurden mit Hilfe des Axioplan 2 Mikroskop der Firma Zeiss in 5 facher bzw. 10 facher Vergrößerung mit eingebauter Kamera beurteilt und dokumentiert. Abbildung 4.3 zeigt die Partikelbilder bei verschiedener Aufnahmedauer  $t_{\text{Probe}}$  und Vergrößerungen.

Mit zunehmender Aufnahmedauer  $t_{\text{Probe}}$  konnte beobachtet werden, dass sich größer werdende Agglomerate auf dem Objektträger bilden. Die Beobachtung kann durch folgenden Ansatz erklärt werden: Die Bildung der Agglomerate ist auf eine elektrostatische Aufladung auf der Glasoberfläche zurückzuführen. Somit kann nicht differenziert werden, ob die Anordnung der einströmenden Partikel aufgrund des Strömungsfeldes oder der statischen Aufladung der Glasoberfläche geschieht.

<sup>1</sup> $p = 1,5 \text{ bar}$ ,  $n = 500 \text{ mm/h}$ ,  $N = 900 \text{ U/min}$ .

Eine verbesserte Versuchsdurchführung kann durch eine leitende Probenoberfläche erzielt werden. In Frage kommen sogenannte Patches, die mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop, kurz REM, untersucht werden. Dabei handelt es sich um dünne Metallplättchen mit einer adhäsiven Schicht. Diese werden nach Versuchsdurchführung in einem REM untersucht. REM-Aufnahmen aus Vorgängerarbeiten von getrockneter Maisstärke sind in Anhang B abgebildet. Dabei ist zu erwähnen, dass die Aufnahmen der Partikelverteilung nicht aus einer Strömung resultieren. Während des Bearbeitungszeitraumes dieser Arbeit stand das REM der FSA/BGN aufgrund von Umbauarbeiten nicht zur Verfügung. Eine rein objektive Bewertung der Partikelverteilung führt aufgrund der fehlerhaften Probenahme zu keinem Ergebnis.

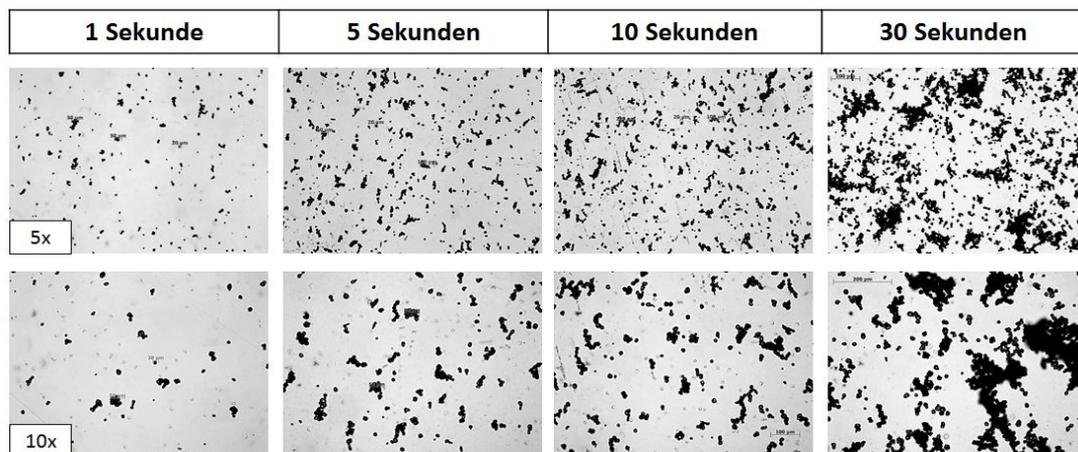


Abbildung 4.3: Aufnahme mit dem Durchlicht-Mikroskop Axioplan 2 der Firma Zeiss bei 5 facher bzw. 10 facher Vergrößerung bei verschiedenen Aufnahmedauer  $t_{\text{Probe}}$ .

## 4.2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm in Tabelle 4.2 soll einen Überblick über die geplante Versuchsdurchführung geben. Dabei wurden drei verschiedene Datenreihen mit der Bezeichnung *Referenz*, *Geschwindigkeit* und *Beladung* erzeugt. Jede Datenreihe umfasst fünf Datensätze, diese wurden bei gleichbleibenden Parametereinstellungen durch Wiederholungen der Messungen generiert. Hier sei erwähnt, dass die Auswertung der Messdaten mit der Datenreihe *Referenz* erfolgt. Im Anschluss wurden zwei Parametervariationen zur Einlassgeschwindigkeit und Partikelbeladung des Staub/Luft-Gemisches durchgeführt und deren Einfluss auf das Ergebnis untersucht.

Datensatz	Druck $p$ [bar]	Vorschub $n$ [mm/h]	Drehzahl $N$ [U/min]
Referenz 1-5	1,5	500	900
Geschwindigkeit 1-5	4,0	500	900
Beladung 1-5	1,5	250	900

Tabelle 4.2: Versuchsprogramm mit den Datenreihen *Referenz*, *Geschwindigkeit* und *Beladung*. Eine Datenreihe umfasst fünf Datensätze.

## 4.3 Versuchsbeschreibung

Der detaillierte Versuchsaufbau ist in Abschnitt 3.2 beschrieben und beinhaltet unter anderem einen LDA-Messkopf für die Geschwindigkeitsmessung und fünf SKG-Messköpfe zur Aufnahme der Staubkonzentrationsmesswerte. Um eine gleichbleibende Messumgebung zu schaffen, wurde die Position der verhältnismäßig großen SKG-Messköpfe über alle Versuche nicht verändert. Die Datenaufnahme der Staubkonzentrationen erfolgte über einen Datenlogger der Firma ALMEMO sowie einen Laptop zur Aufnahme und Speicherung der Messdaten. Abbildung 4.4 zeigt eine Schnittansicht ( $Z = 0$  cm) der Versuchsanordnung, wobei der Mittelpunkt der Staubaustrittsdüse des RBG 1000 auf der Schnittebene liegt, die von der  $X$ - und  $Y$ -Achse aufgespannt wird.

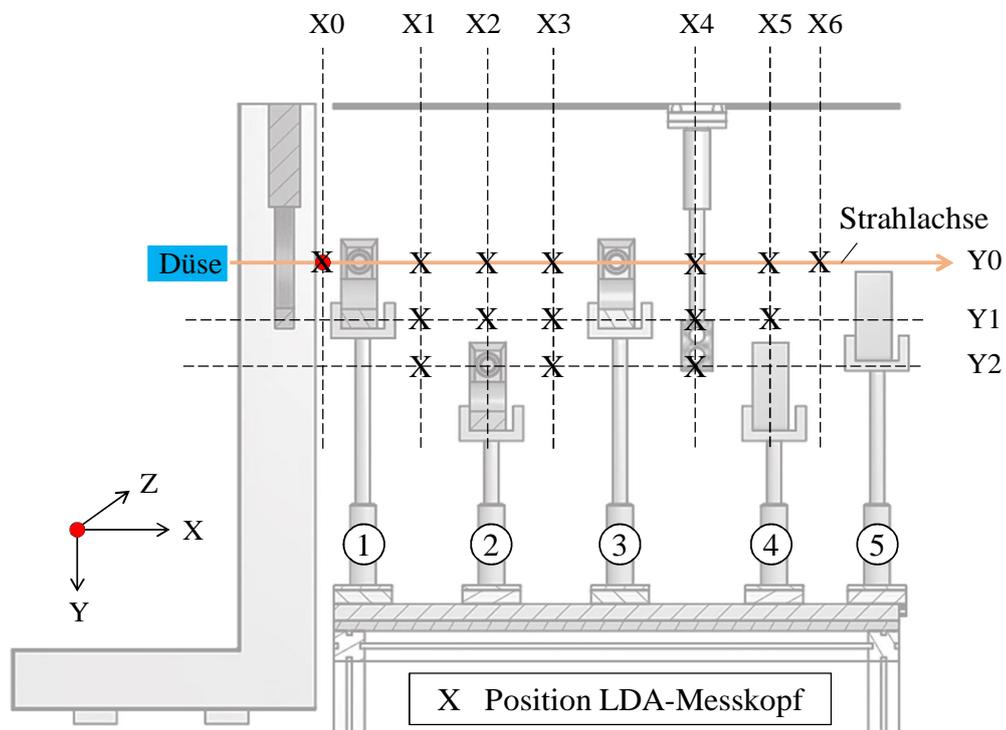


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung des Messgitters mit Blick in die Staubkammer. Die Messpunkte sind durch ein selbst festgelegtes Koordinatensystem ( $X, Y$ ) definiert. Die Kreuze symbolisieren die Messposition des LDA-Messkopfes. Dieser wird sukzessiv von der Position  $Y_0 X_0$  links oben bis auf Position  $Y_2 X_4$  bewegt. Im Hintergrund ist der Versuchsaufbau zu erkennen.

Die Staubaustrittsdüse der Dosiereinheit zum Befüllen der Staubkammer mit dem Staub/Luft-Gemisch ist auf der linken Seite in blau zu erkennen und definiert die Strahlachse  $Y_0$ . Weitere Messhöhen sind mit  $Y_1$  und  $Y_2$  bezeichnet.  $Y_0 X_0$  (roter Punkt) symbolisiert den Nullpunkt des Koordinatensystems. Die SKG-Messköpfe sind von 1 bis 5 nummeriert. Der Mittelpunkt des Strahlengangs zwischen Sender und Empfänger der Messköpfe SKG 1, SKG 2 und SKG 3 sind zur Strahlachse ausgerichtet ( $Z = 0$  cm). Die SKG-Messköpfe 4 und 5 sind in den hinteren Bereich des Staubkammerinneren gerichtet ( $Z = 42,5$  cm) und auf verschiedenen Höhen positioniert. Sie sollen das

Konzentrationsfeld abseits der Strahlachse auf verschiedenen Höhen erfassen. Der erste Messpunkt  $Y_0X_0$  befindet sich zwischen dem Ionisationsring und dem ersten SKG-Messkopf. Der Messdurchgang der SKG-Messköpfe 1 und 3 befindet sich auf der Strahlachse auf der Achsenhöhe  $Y_0$ . Eine detaillierte Beschreibung der Abstände ist in Anhang C aufgeführt. Der LDA-Messkopf wird über die obere Schiene mit Hilfe des Führungsschlittens auf die jeweilige Messposition positioniert. Die Brennweite der Linse im vorderen Teil des Messkopfes beträgt 50 mm. Daraus folgt, dass sich die Laserstrahlen 50 mm vor der Linse treffen und sich dort der Messpunkt befindet. Die Führungsschiene wurde so montiert, dass der Abstand zwischen Messkopf und Messebene der Brennweite der Linse entspricht. Die Messposition des LDA-Messkopfes ist nicht ortsfest und mit einem schwarzen Kreuz gekennzeichnet. Innerhalb des Datensatzes lassen sich auf jede Messposition die entsprechenden Geschwindigkeiten zuordnen. Messposition 1 beginnt links oben bei  $Y_0X_0$  und setzt sich von links nach rechts und von oben nach unten bis Position 15 zu  $Y_2X_4$  fort. Zusätzlich werden pro Messposition je fünf ortsabhängige Staubkonzentrationswerte aufgenommen, das ergibt pro SKG-Messkopf 15 Staubkonzentrationsmesswerte je Datensatz.

Über die Dosiereinheit RBG 1000 wurde der Feststoffbehälter nach jeder Neubefüllung auf eine noch vorhandene Feststofffüllhöhe angefahren ( $H = 60$  mm). Diese ist neben der Bürstendrehzahl  $N$  und dem Vorschub  $n$  an der Dosiereinheit ablesbar. Alle Messköpfe wurden gereinigt und ausgerichtet. Der LDA-Messkopf wurde für jede Messhöhe neu ausgerichtet, da eine Änderung des Ausrichtungswinkels bezüglich der Aufnahmeachse eine Verfälschung der Geschwindigkeitsmesswerte zur Folge hat. Auf der jeweiligen Messhöhe  $Y_0$ ,  $Y_1$  und  $Y_2$  wurde der LDA-Messkopf auf der  $X$ -Achse neu positioniert und nach jeder Messung gesäubert.

Zu Versuchsbeginn wurden die Steuergeräte der SKGs eingeschaltet und ein Nullabgleich an jedem Gerät durchgeführt, sodass die Anzeige 0 mV beträgt<sup>2</sup>. Der Datenlogger ALMEMO überträgt das Messsignal an die Software AMR WinControl 6 auf dem Messlaptop. Nach der Versuchsdurchführung wurden die Messdaten in einem Texteditorformat gespeichert und ausgewertet. Nach Start der Messwertaufnahme der SKGs wurde die Messsoftware FloWare der Firma Dantec des LDA-Sensors gestartet. Um die Messung zwischen SKG und LDA zu synchronisieren, wurde bei Start der LDA-Messung ein Kippschalter betätigt, der eine Signalfanke in der Auswertesoftware der SKG-Messdaten gibt. Nachdem die LDA-Messaufnahme begonnen hat, wurde die Dosiereinheit gestartet und nach  $t_D = 30$  s wieder gestoppt. Die Datenaufnahme der Geschwindigkeit stoppte automatisch nach  $t = 60$  s, die Datenaufnahme der Staubkonzentration wurde nach ca.  $t = 90$  s über die Software gestoppt und abgespeichert. Abschließend wurden die Messköpfe ausgebaut, gereinigt und erneut positioniert.

---

<sup>2</sup>Bei zwei der fünf SKG-Steuergeräte handelt es sich um Geräte der früheren Generation. Bei diesen Geräten ist eine Invertierung der Messaufnahme technisch nicht möglich, d.h. bei reiner Luft liegt ein Messsignal von 1000 mV an. Die Daten wurden im Anschluss invertiert und ausgewertet.

## 4.4 Messergebnisse

Bei der Auswertung der Messergebnisse wird zwischen den Daten der Staubkonzentrationsmessung und den Daten der Geschwindigkeitsmessung bzw. der daraus resultierenden Turbulenz differenziert. Im nach folgenden werden zuerst die Ergebnisse der Staubkonzentration dargestellt und im Anschluss die der Geschwindigkeitsmessung.

### 4.4.1 Staubkonzentrationsdaten

Zur Auswertung der Staubkonzentrationsdaten müssen diese aufgearbeitet werden. Zum einen war eine Korrektur der Messdaten notwendig und zum anderen war eine Umrechnung der Messdaten von der Messspannung in eine Staubkonzentration nötig. Während der Messwertaufnahme verschmutzen die Linsen der SKG-Messköpfe. Die Verschmutzungsproblematik der Linsen war vorab bekannt und wird in dieser Arbeit erörtert. Bevor eine Korrektur der SKG-Messdaten erfolgen konnte, galt es den Grad der Verschmutzung zu identifizieren. Die Korrektur der Messwerte soll im Folgenden exemplarisch anhand eines Beispiels gezeigt werden.

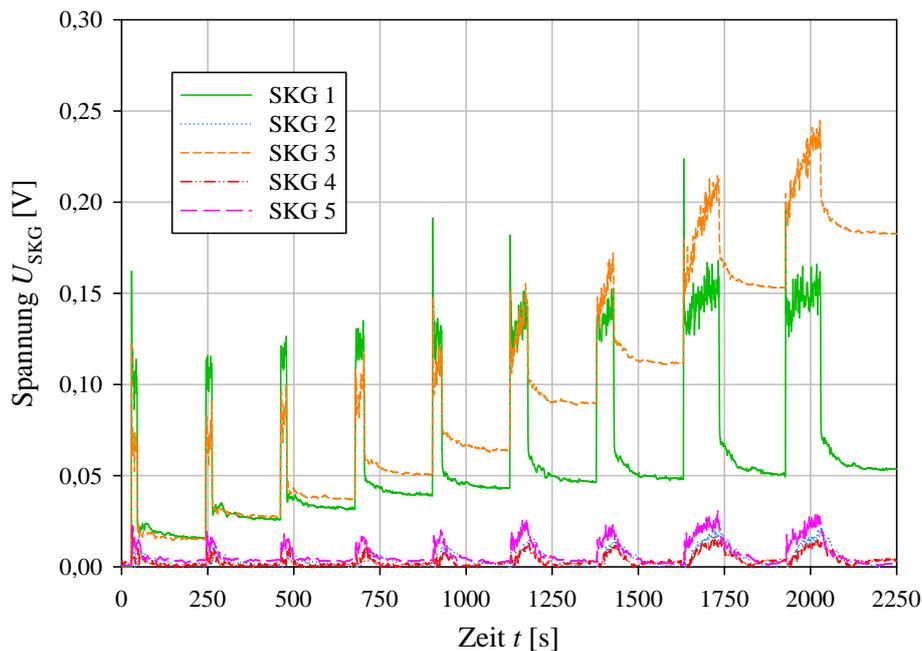


Abbildung 4.5: Anzeige der jeweiligen SKG-Messköpfe über die Dosierdauer  $t_D$ . Nach dem Betreiben der Dosiereinheit für eine bestimmte Dosierzeit  $t_D$ , wurde die Dosiereinheit abgeschaltet und die Sedimentation abgewartet.

Die fünf SKG-Messköpfe befinden sich an unterschiedlichen Positionen innerhalb der Staubkammer und werden daher nicht gleich stark mit Staub verschmutzt. Um den Grad der Verschmutzung über der Zeit zu ermitteln, wurden sukzessiv Spannungsverläufe über die Dosierdauer  $t_D$  gemessen, diese sind aus Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Dosierzyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dosierdauer $t_D$ [s]	10	10	10	15	15	30	30	60	60
Dosierdauer $t_{D,k}$ [s], kumulative	10	20	30	45	60	90	120	180	240

Tabelle 4.3: Dosierdauer  $t_D$  und kumulative Dosierdauer  $t_{D,k}$ .

Die Dosiereinheit RBG 1000 wurde gestartet und für die Dosierdauer  $t_D = 10$  s betrieben. Nach jeder Dosierdauer wurde für zwei Minuten abgewartet, bis der Staub sedimentiert ist. Anschließend wurde die Dosiereinheit erneut gestartet. Während der Aufnahme des Spannungsverlaufes wurde die Staubkammer nicht geöffnet und die Messköpfe wurden nicht gereinigt. Abbildung 4.5 zeigt den Spannungsverlauf der fünf SKG-Messköpfe über der Zeit  $t$  mit zunehmender Verschmutzung der Linsen. Der steile Anstieg bzw. Abfall der Spannung gibt den Betrieb der Dosiereinheit wieder. Nach Abschalten der Dosiereinheit stellt sich eine Plateauspannung  $U_p$  ein. Diese gibt den Grad der Verschmutzung der Linse für die jeweilige Dosierdauer an. Somit lässt sich jeder Dosierdauer  $t_D$  ein Spannungswert  $U_p$  zuweisen. Dieser Wert wird nun über die Anzahl der Dosierzyklen aufgetragen und ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

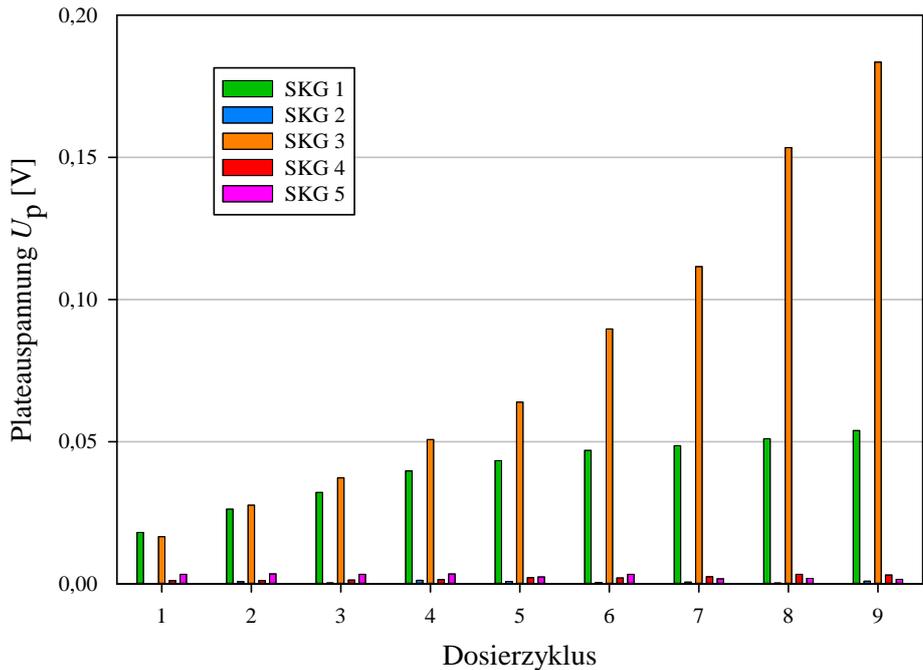


Abbildung 4.6: Plateauspannung  $U_p$ , aufgetragen über die Anzahl der Dosierzyklen. Die korrespondierende Dosierdauer kann aus Tabelle 4.3 entnommen werden.

Der Anstieg der Plateauspannung  $U_p$  über die Dosierdauer  $t_D$  ist bei SKG 1 und 3 deutlich zu erkennen. Die Messköpfe 2, 4 und 5 werden nur gering verschmutzt und benötigen daher keine Messwertkorrektur. Des Weiteren lässt sich festhalten, dass die Verschmutzung des SKG-Messkopfes 3 stärker ausgeprägt ist als bei Messkopf 1.

Der Grund hierfür, lässt sich mit Hilfe des Strömungsprofils erklären. Das Staub/Luft-Gemisch strömt mit einer hohen Geschwindigkeit in das Staubkammerinnere ein. Das Strömungsprofil des Strahles ist im Einlassbereich der Staubkammer noch kleiner als auf der Messposition des SKG 3. Mit zunehmendem Abstand von der Staubeintrittsdüse wächst der Strahlradius und das Strömungsprofil verbreitert sich. Abbildung 4.7 zeigt die schematische Darstellung des Staub/Luft-Gemisches bei der Ausbreitung des Strahles in das Staubkammerinnere. Messkopf 1 ist daher von der Verschmutzung der Linsen weniger betroffen, da der Strahl den Messbereich lediglich durchströmt und nicht in einer Staubwolke umhüllt. Wohingegen die Linsen des SKG 3 Messkopfes stärker verschmutzen.

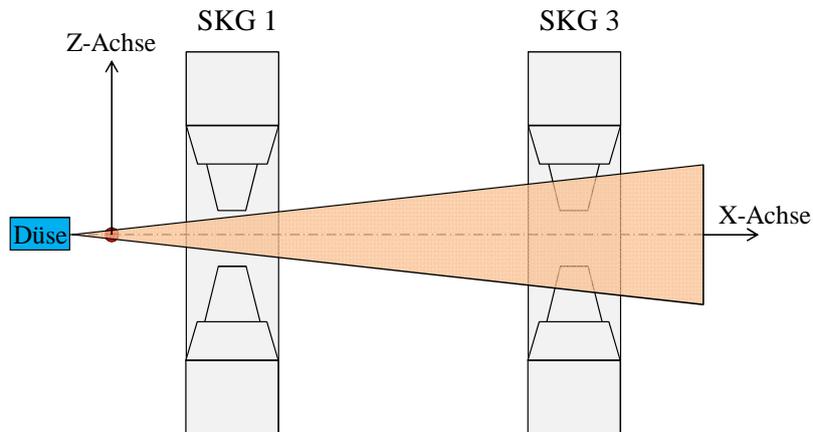


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des austretenden Staub/Luft-Gemisches in das Staubkammerinnere. Perspektive ist die Draufsicht von der Staubkammerdecke.

Abbildung 4.6 zeigt, dass die Plateauspannung  $U_p$  der Messköpfe 1 und 3 nicht linear über die Dosierdauer  $t_D$  von vier Minuten ansteigt. In dieser Arbeit wurde für alle Versuche eine Dosierdauer von  $t_D = 30$  s gewählt. In diesem Zeitfenster steigt die Plateauspannung näherungsweise linear an. Die durch die Verschmutzung entstehende Spannung wird als eine abschnittsdefinierte Funktion angenommen und als verschmutzungsinduzierte Spannung  $U_V$  bezeichnet. Der Zeitpunkt  $t_1$  beschreibt den Start der Dosierung,  $t_2$  den Endzeitpunkt und die sich nach der Sedimentation bildende Spannung bildet die Plateauspannung  $U_p$ .

$$U_V = \begin{cases} t \leq t_1 & 0 \\ t_1 < t < t_2 & \frac{t-t_1}{t_2-t_1} \cdot U_p \\ t \geq t_2 & U_p \end{cases} \quad (4.1)$$

Die Annahme, dass die verschmutzungsinduzierte Spannung der Linsen für das Zeitfenster von  $t_D = 30$  s proportional zur Messdauer  $t$  ist, wird in Abbildung 4.8 bestätigt. Zu sehen ist ein Spannungsverlauf  $U(t)$  des Messkopfes SKG 3. Bei  $t = 5$  s beginnt die Dosierung des Staub/Luft-Gemisches in die Staubkammer, nach  $t_D = 30$  s stoppt die Dosierung und die Sedimentation der Partikel beginnt.

Die verschmutzungsinduzierte Spannung  $U_V$  kann als zusätzlicher Betrag zu  $U_{SKG}$  betrachtet werden, die von dem erzeugten Messsignal  $U_{SKG}$  abgezogen werden muss. Die korrigierte Spannung  $U_{Korr}$  errechnet sich aus:

$$U_{Korr} = U_{SKG} - U_V \quad (4.2)$$

Abbildung 4.8 veranschaulicht die Gleichung (4.2). Darin ist die Messspannung  $U_{SKG}$  (orange) über der Zeit  $t$  dargestellt. Die verschmutzungsinduzierte Spannung  $U_V$  (rot) bildet die Grundlage zur Berechnung der korrigierten Messspannung  $U_{Korr}$  (schwarz).

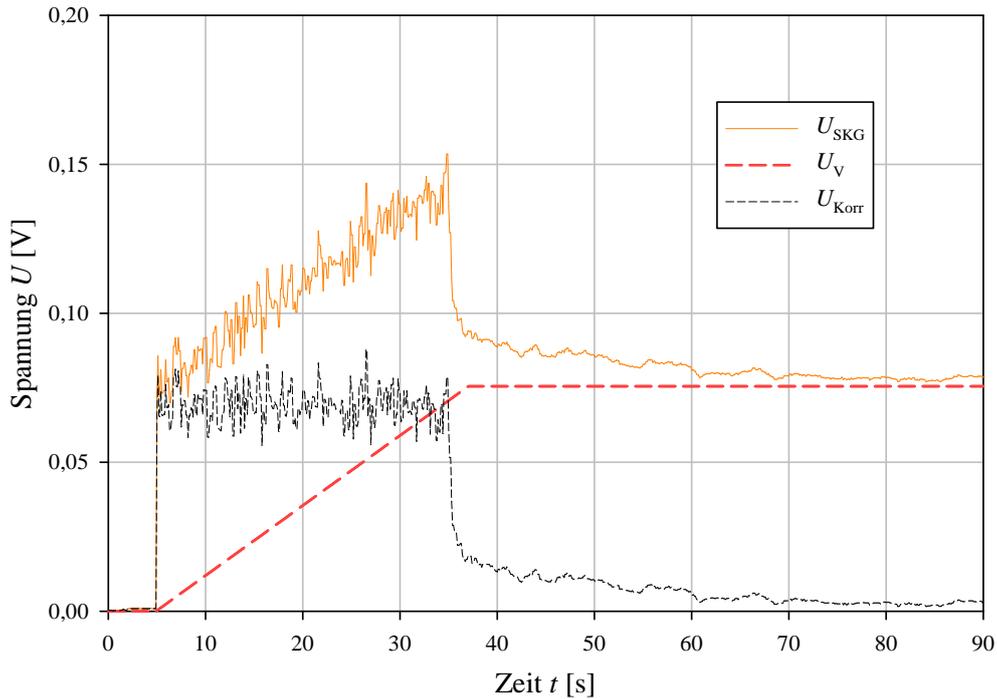


Abbildung 4.8: Messspannung  $U_{SKG}$  (orange), verschmutzungsinduzierte Spannung  $U_V$  (rot) und linear korrigierter Spannungsverlauf  $U_{Korr}$  (schwarz).

Das Beispiel soll nun auf reale Messwerte angewendet werden. Abbildung 4.9 zeigt das aufgenommene Messsignal  $U_{SKG}$  über der Zeit  $t$  der fünf SKG-Messköpfe. Nach Gleichung (4.2) werden die aufgenommenen Messwerte in die korrigierten Spannungswerte  $U_{Korr}$  umgerechnet. In Abbildung 4.10 sind die korrigierten Daten der fünf SKG-Messköpfe aufgezeigt. Der korrigierte Spannungsverlauf  $U_{Korr}$  bildet somit die Grundlage zur Datenauswertung, indem nun die daraus errechnete Staubkonzentration  $c$  über der Dosierdauer  $t_D$  ermittelt werden kann. Die Umrechnung der korrigierten Spannung  $U_{Korr}$  in die Staubkonzentration  $c$  erfolgt nach

$$c = \frac{1}{(-l \cdot \epsilon)} \cdot \ln \left( 1 - \frac{U_{Korr}}{1 \text{ V}} \right) \quad (4.3)$$

mit  $l$  als Länge der durchleuchteten Strecke und  $\epsilon$  als Extinktionskoeffizient.

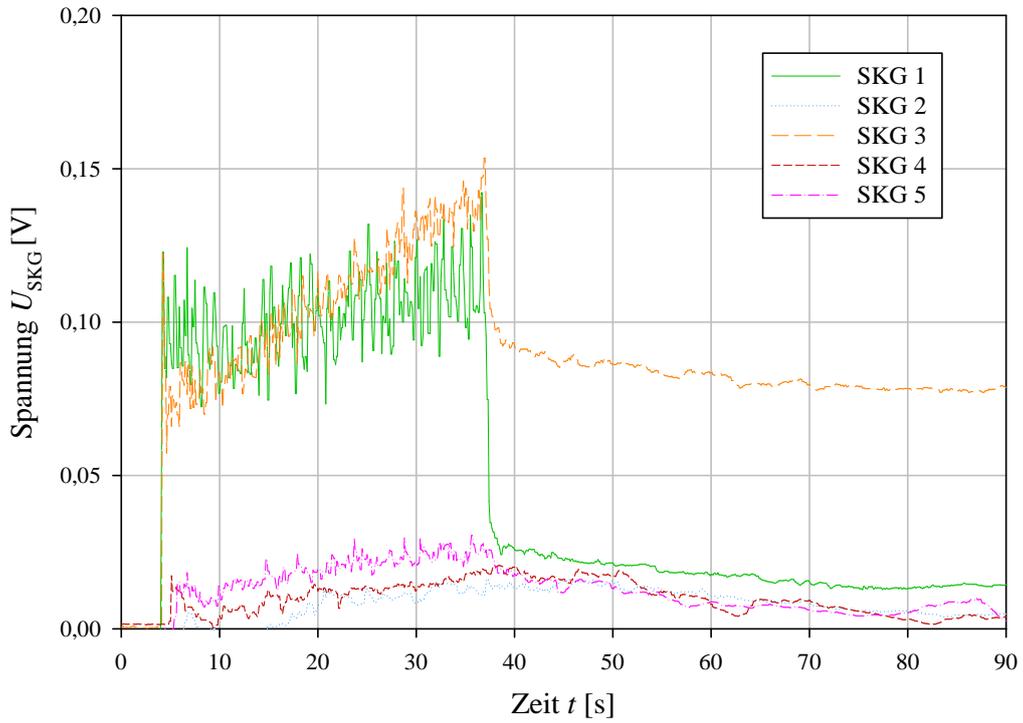


Abbildung 4.9: Aufnahme des Messsignals  $U_{\text{SKG}}$  über der Zeit  $t$ .

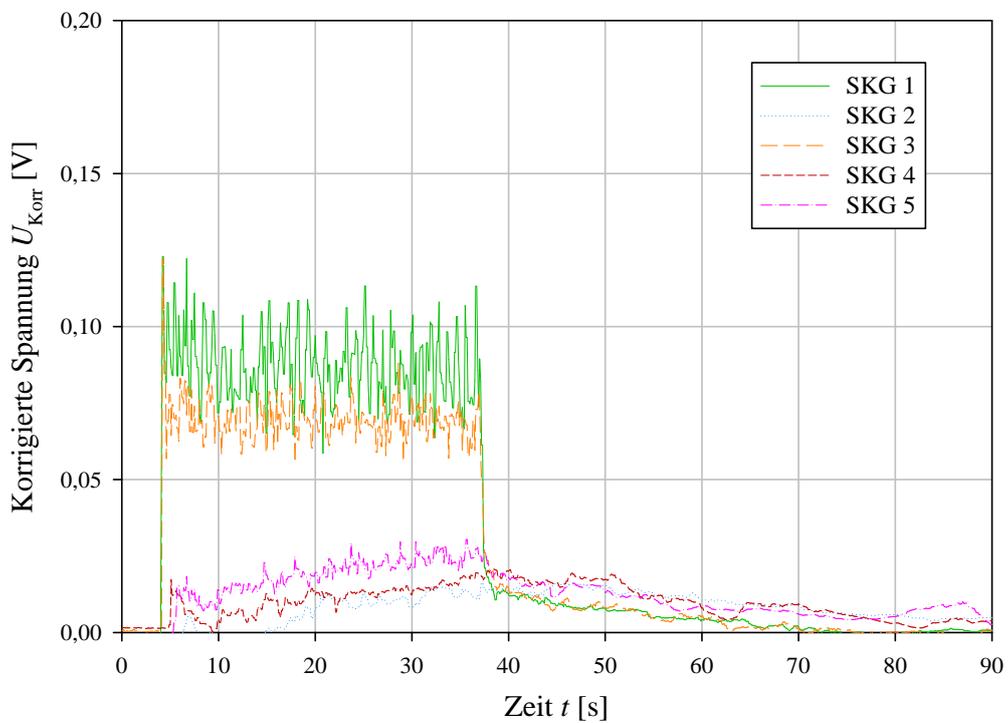


Abbildung 4.10: Darstellung der korrigierten Messspannung  $U_{\text{Korr}}$ .

Aus Kapitel 3.1.1 ist bekannt, dass sich die SKG-Messgeräte in ihrer Eigenschaft unterscheiden. Mit diesem Wissen erfolgt eine Anpassung der verwendeten Formel (4.3), indem jedem SKG-Messgerät der zugehörige Koeffizient  $\epsilon$  zugewiesen wird. In Abbildung 4.11 ist der Konzentrationsverlauf über der Zeit  $t$  der jeweiligen SKG-Messköpfe dargestellt. Der Staubkonzentrationsmesswert  $c$  berechnet sich aus dem zeitlichen Mittelwert der instantanen Staubkonzentration  $c_i$ . Die zeitliche Mittelung der Konzentration erfolgt über der Dosierdauer  $t_D$ . Die Konzentrationsmesswerte  $c$  dienen als Grundlage zur Versuchsauswertung in Kapitel 4.5 und sind in Anhang D hinterlegt.

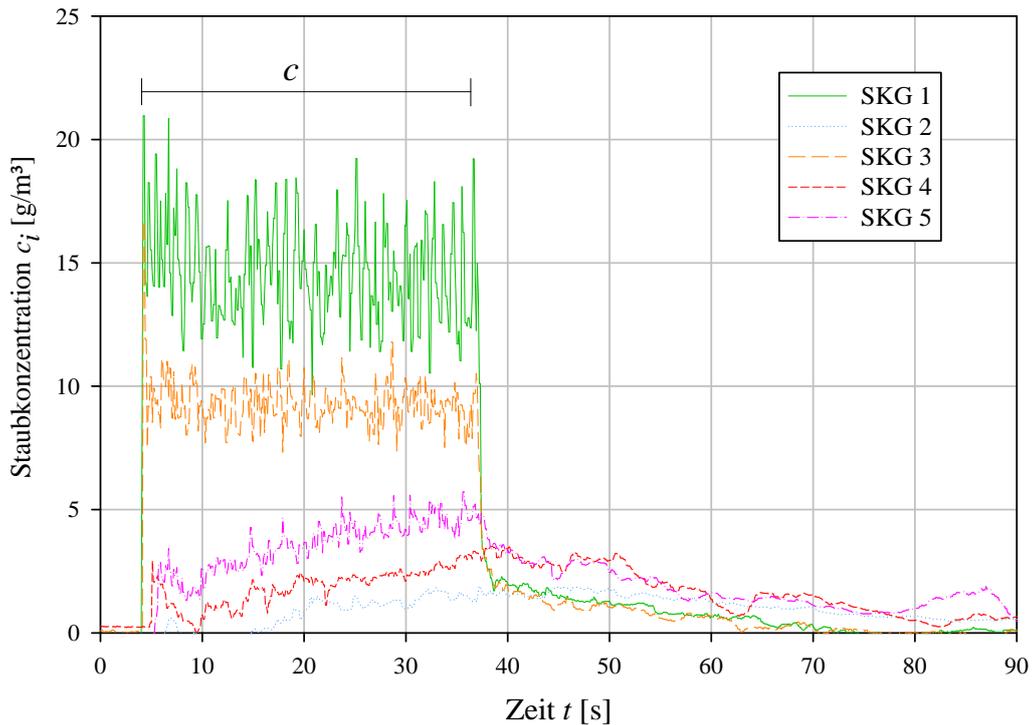


Abbildung 4.11: Konzentrationsverlauf aus dem korrigierten Messspannungen  $U_{\text{Korr}}$  nach Gleichung (4.3) berechneten Staubkonzentrationen. Die Mittelung der instantanen Konzentration  $c_i$  über die Dosierzeit  $t_D$  gibt den auszuwertenden Messwert  $c$  wieder.

#### 4.4.2 Geschwindigkeitsdaten

Die Software FloWare der Firma Dantec ist in der Lage neben der Aufnahme des Geschwindigkeitsverlaufes  $u(t)$  auch die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$ , die Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  sowie die daraus resultierende Turbulenz  $T$  zu errechnen. Die Turbulenz wird als Quotient der Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  zur mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$  definiert. Die Geschwindigkeitsmesswerte finden sich im Anhang E.

$$T = \left| \frac{u_{\text{RMS}}}{\bar{u}} \right| \quad (4.4)$$

## 4.5 Auswertung

Bei der Auswertung der Messwerte wurde die Messunsicherheit  $\sigma$  der einzelnen Messpositionen bestimmt. Zuerst galt es den Anteil des systematischen Fehlers  $w$  zu identifizieren. Der statistischen Anteil  $v$  wurde anhand einer Fehlerbetrachtung berechnet. Des Weiteren wurde durch die Variation zweier Parameter der Einfluss auf das Messergebnis untersucht.

### 4.5.1 Systematischer Fehler

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Ermittlung des systematischen Messfehlers  $w$ . Dabei wurden diejenigen Faktoren untersucht, bei denen ein systematischer Einfluss auf das Messergebnis erkennbar ist. Zuerst wurden die Einflussfaktoren der Konzentrationsmessung und im Anschluss die der Geschwindigkeitsmessung analysiert.

#### Staubkonzentrationsmessung

Um zu prüfen, ob die Verteilung der Konzentrationsmesswerte einer Normalverteilung nach Gauß entspricht, wurden die Messwerte in sogenannten Klassen mit konstanter Klassenbreite nach ihrer Häufigkeit eingeteilt. In Abbildung 4.12 ist eine Häufigkeitsverteilung dargestellt, welche einen Datensatz aus 75 Staubkonzentrationsmesswerten des Messkopfes SKG 1 zeigt, wobei die  $x$ -Achse den zeitlich gemittelten Konzentrationswerten  $c$  entspricht.

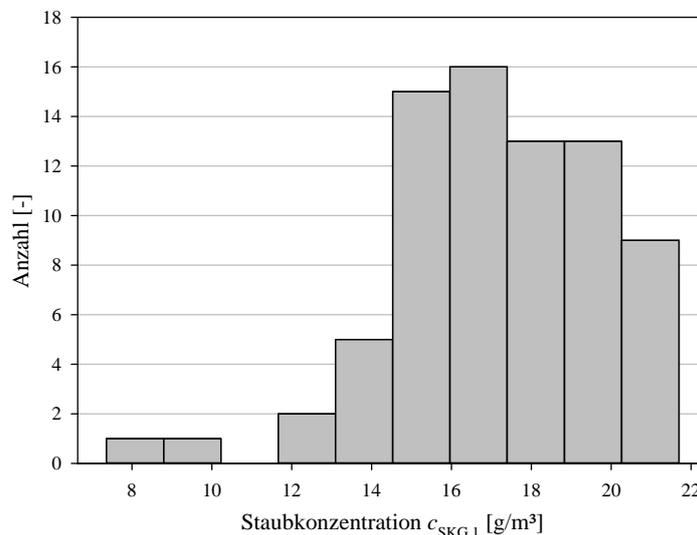


Abbildung 4.12: Häufigkeitsverteilung der Konzentrationsmesswerte (SKG 1).

Die Verteilung der Konzentrationsmesswerte des SKG-Messkopfes 1 ist linkschief. Die Messwerte sind nicht normal verteilt. Diese Verteilung wurde bei allen Messköpfen festgestellt. In Anhang F sind die Häufigkeitsverteilungen der Messköpfe SKG 2 bis SKG 5 abgebildet.

Bei allen Messpositionen SKG 1 bis SKG 5 sind Ausreißer der Konzentrationsmessdaten zu niedrigen Konzentrationen erkennbar. Die Überprüfung der Messdaten lässt auf folgende Hypothese schließen: Die geringsten Staubkonzentrationswerte konnten zu 68 % auf die Messposition  $Y_0X_0$  und  $Y_2X_4$  zurückgeführt werden. Bei der Dosierung des Staub/Luft-Gemisches in die Staubkammer wird der Feststoffbehälter von oben nach unten entleert. Für die Erzeugung eines Datensatzes ist genau ein befüllter Feststoffbehälter nötig. Die Versuchsdurchführung erfolgt von Position  $Y_0X_0$  bis  $Y_2X_4$ . Messposition  $Y_0X_0$  ist somit die erste und  $Y_2X_4$  die letzte Messung eines Datensatzes. Diese Beobachtung führt zu der Annahme, dass eine Inkonsistenz der Stopfdichte im Anfangs- und Endbereich des Feststoffbehälters zu den niedrigen Staubkonzentrationswerten führt. Zu diesem Zeitpunkt kann die Vermutung nicht bestätigt werden.

Für die weitere Auswertung werden die Messwerte der Konzentrationsmessung an  $Y_0X_0$  und  $Y_2X_4$  verworfen. Daraus resultiert ein reduzierter Stichprobenumfang von  $n = 13$  für einen Datensatz. Der systematische Anteil  $w$  der Messunsicherheit  $\sigma$  bei der Konzentrationsmessung wird eliminiert. Es gilt die Annahme, dass  $w = 0$ .

## Geschwindigkeitsmessung

Bei der Auswertung der Geschwindigkeitsdaten wurde lediglich der Messgerätefehler des Laser-Doppler-Anemometers selbst untersucht. Es bestand kein Hinweis auf einen Einfluss durch äußere Parameter. In dem Einstellungs Menü des Messprogrammes FloWare der Firma Dantec lässt sich der zu messende Geschwindigkeitsbereich über einen Frequenzbereich voreinstellen. Mit einem Frequenzbereich von z. B. 1,2 MHz lässt sich so ein Geschwindigkeitsbereich von - 2,38 m/s bis + 2,38 m/s erfassen. In Tabelle 4.4 sind die für diese Arbeit relevanten Messbereiche aufgelistet. Für jeden Messbereich lässt sich eine Frequenz einstellen, bei der ein zugewiesener Geschwindigkeitsbereich erfasst wird.

Messbereich	1	2	3
Frequenz $f$ [MHz]	1,2	4,0	12,0
Geschwindigkeit $u$ [m/s]	$\pm 2,38$	$\pm 7,94$	$\pm 12,81$

Tabelle 4.4: Übersicht der relevanten Messbereiche der Geschwindigkeitsmessung.

Es wurden Versuche durchgeführt, um den Einfluss des Messbereiches auf die Geschwindigkeitsmessung zu untersuchen. Dazu wurde ein Motor mit einer Drehscheibe über eine Spannungsquelle angesteuert und auf konstanter Frequenz  $f$  betrieben. Die Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  der Drehscheibe an dem Messpunkt wurde über

$$\omega = 2 \pi r f \quad (4.5)$$

berechnet, wobei  $r$  dem Abstand des Messpunktes zu der Drehachse entspricht.

Es wurden je fünf Geschwindigkeitsmessungen bei konstanter Motordrehzahl für drei verschiedene Messbereiche erstellt. In Abbildung 4.13 ist die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$  und die mittlere Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  über dem Messbereich der Messsoftware bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  dargestellt. Wie zu erwarten, bleibt die gemessene mittlere Geschwindigkeit  $\bar{u}$  über alle Messungen konstant. Es ist kein systematischer Einfluss des Messgerätes auf die Messung der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$  erkennbar, sodass der systematische Messfehler  $w = 0$  ist. Hier sei erwähnt, dass der Einfluss des Messaufbaus auf die Messung nicht weiter untersucht wurde.

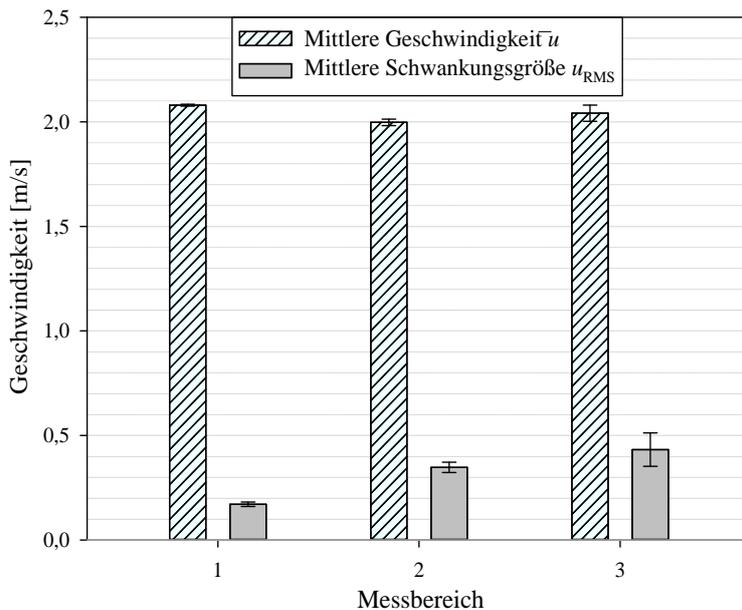


Abbildung 4.13: Geschwindigkeitsmessung bei konstanter Geschwindigkeit  $\omega = 2,0$  m/s bei verschiedenen Frequenzbereichen mit einer Stichprobenanzahl von  $n = 5$ .

Allerdings zeigt sich, dass die Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  der gemessene Geschwindigkeit von dem gewählten Messbereich abhängig ist. Somit ergibt sich eine messbereichsabhängiger systematischer Messfehler  $w_f$  für  $u_{\text{RMS}}$  von:

$$w_f = \begin{cases} 0,171 \text{ m/s} & \text{bei } f_1 = 1,2 \text{ MHz} \\ 0,347 \text{ m/s} & \text{bei } f_2 = 4 \text{ MHz} \\ 0,432 \text{ m/s} & \text{bei } f_3 = 12 \text{ MHz} \end{cases} \quad (4.6)$$

Bei der Versuchsdurchführung der Datenreihen *Referenz*, *Geschwindigkeit* und *Belastung* wurde der Messbereich der zu messenden Geschwindigkeit angepasst.

## 4.5.2 Statistischer Messfehler

Weiterhin wird der statistische Anteil  $v$  der Messwerte anhand einer Messfehlerrechnung ermittelt. Es wurden zuerst die Staubkonzentrationsmesswerte und anschließend die Geschwindigkeitsmesswerte betrachtet.

## Staubkonzentrationsdaten

In diesem Abschnitt werden verschiedene Aspekte der Messdatenauswertung untersucht. Zum einen sollen die fünf Datensätze einzeln ausgewertet und deren Vertrauensbereich  $v_{\text{Ref},1-5}$  ermittelt werden. Weiterhin ist von Interesse, ob durch die Versuchsdurchführung reproduzierbare Messergebnisse erzeugt worden sind. Die Konzentrationsmesswerte der fünf Datensätze werden über alle Messpositionen gemittelt und miteinander verglichen. Daraus errechnet sich ein Vertrauensbereich  $v_{\text{Rep}}$ . Zuletzt soll anhand einer Auswertung aller erzeugten Messwerte das gesamte Vertrauensintervall der Messung  $v_{\text{Mess}}$  berechnet werden. Über den statistischen Anteil lässt sich anschließend die Messunsicherheit  $\sigma$  der Staubkonzentrationsmessung bestimmen.

In Tabelle 4.5 sind die Ergebnisse der einzelnen Datensätze der Datenreihe *Referenz* aufgelistet. Darin wurden die Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  mit einem Stichprobenumfang von  $n = 13$  für jeden Datensatz, sowie die Standardabweichung  $s$ , der Vertrauensbereich  $v_{\text{Ref}} = 3 m$  nach Gleichung (2.5) und (2.6) berechnet. Des Weiteren wird die prozentuale Abweichung  $v_{\text{Ref}}$  bezogen auf  $\bar{c}$  ermittelt.

<b>Referenz 1 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_1$	25,045	1,546	11,916	2,077	2,733
Standardabweichung $s$	0,634	0,106	0,833	0,110	0,122
Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},1}$	0,527	0,088	0,693	0,091	0,102
Abweichung $v_{\text{Ref},1}/\bar{c}_1$ [%]	2,11	5,72	5,82	4,40	3,72

<b>Referenz 2 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_2$	19,364	1,531	10,509	1,780	2,969
Standardabweichung $s$	1,585	0,124	0,714	0,164	0,152
Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},2}$	1,319	0,103	0,594	0,137	0,126
Abweichung $v_{\text{Ref},2}/\bar{c}_2$ [%]	6,81	6,74	5,65	7,69	4,26

<b>Referenz 3 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_3$	24,182	1,516	11,098	1,934	2,571
Standardabweichung $s$	1,344	0,145	0,635	0,138	0,163
Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},3}$	1,118	0,121	0,528	0,114	0,135
Abweichung $v_{\text{Ref},3}/\bar{c}_3$ [%]	4,62	7,98	4,76	5,92	5,26

<b>Referenz 4 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_4$	20,141	1,323	11,611	2,174	3,402
Standardabweichung $s$	1,287	0,162	0,425	0,178	0,156
Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},4}$	1,071	0,135	0,354	0,148	0,129
Abweichung $v_{\text{Ref},4}/\bar{c}_4$ [%]	5,32	10,20	3,05	6,80	3,80

<b>Referenz 5 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_5$	18,500	1,353	10,755	2,145	3,343
Standardabweichung $s$	1,061	0,144	1,130	0,186	0,191
Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},5}$	0,883	0,120	0,941	0,155	0,159
Abweichung $v_{\text{Ref},5}/\bar{c}_5$ [%]	4,77	8,87	8,75	7,20	4,76

Tabelle 4.5: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Standardabweichung  $s$  und der Vertrauensbereich  $v_{\text{Ref},n}$ . Für jeden Datensatz der Datenreihe *Referenz* wurde ein Stichprobenumfang von  $n = 13$  ausgewertet.

Die Mittelwerte der Konzentrationsmesswerte, insbesondere der Messposition SKG 1, unterscheiden sich zwischen den Datensätzen. Es soll daher überprüft werden, ob durch die Versuchsdurchführung reproduzierbare Datensätze erzeugt worden sind. Reproduzierbarkeit bedeutet, dass unter gleichen Versuchsbedingungen im Rahmen eines einzukalkulierenden Messfehlers gleiche Ergebnisse erzielt werden [21]. Ein Maß der Reproduzierbarkeit ist die prozentuale Abweichung des Vertrauensbereiches  $v_{\text{Rep}}$  bezogen auf den Mittelwert mit der Annahme, dass kein systematischer Messfehler erkennbar ist. Jeder Datensatz  $i$  der Datenreihe *Referenz* wurde über einen Stichprobenumfang von  $n = 13$  pro Messkopf gemittelt, sodass sich ein mittlerer Konzentrationsmesswert  $\bar{c}$  ergibt. Die Daten können aus Tabelle 4.5 entnommen werden. Insgesamt wurden fünf Konzentrationsmittelwerte  $\bar{c}$  pro SKG-Messkopf erzeugt. Diese werden anschließend erneut gemittelt, sodass

$$\bar{\bar{c}} = \frac{\sum_{i=1}^5 \bar{c}_i}{5} = \frac{\bar{c}_1 + \bar{c}_2 + \bar{c}_3 + \bar{c}_4 + \bar{c}_5}{5} \quad (4.7)$$

für jeden SKG-Messkopf entsteht. In Tabelle 4.6 sind die Mittelwerte  $\bar{\bar{c}}$  der Datenreihe *Referenz* über den jeweiligen SKG-Messkopf aufgelistet. Weiterhin wurde die Standardabweichung  $s$ , der Vertrauensbereich  $v_{\text{Rep}} = 3m$  und die prozentuale Abweichung  $v_{\text{Rep}}/\bar{\bar{c}}$  ermittelt. Je geringer die Abweichung des Vertrauensbereich  $v_{\text{Rep}}$  bezogen auf  $\bar{\bar{c}}$ , desto höher ist die Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung.

<b>Staubkonzentration</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{\bar{c}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	2,651	0,095	0,522	0,147	0,327
Vertrauensbereich $v_{\text{Rep}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	3,557	0,128	0,701	0,197	0,439
Abweichung $v_{\text{Rep}}/\bar{\bar{c}}$ [%]	16,59	8,81	6,27	9,73	14,62

Tabelle 4.6: Mittelwerte, Standardabweichung und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe *Referenz* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$ .

Die Unsicherheit der Messdaten der Datenreihe *Referenz* ist mit durchschnittlich 11,2 % zufriedenstellend. Die Versuchsdurchführung zeigt reproduzierbare Ergebnisse.

Die Auswertung der Konzentrationsmessdaten zeigt, dass die Messung einer statistischen Streuung unterliegt. Im Nachfolgenden sollen zwei Parameter betrachtet werden um deren Einfluss auf die Messwertstreuung zu untersuchen. Zum einen die Stopfdichte  $q$ , die sich anhand der eingefüllten Staubmenge bezogen auf das Volumen des Feststoffbehälters berechnet. Zum anderen soll, wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, der Einfluss der Umgebungsbedingung auf das Messergebnis betrachtet werden.

Wie bereits erwähnt, ist für die Erzeugung eines Datensatzes genau ein befüllter Feststoffbehälter nötig. Für jeden Datensatz der Datenreihe *Referenz* ergibt sich eine eigene Stopfdichte  $q$ . Die Daten sind in Anhang I hinterlegt. In Abbildung 4.14 sind die mittleren Staubkonzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  der einzelnen Datensätze über der Stopfdichte  $q$  aufgetragen. Zusätzlich wurde der Vertrauensbereich  $v_{\text{Ref},n}$  als Fehlerbalken eingefügt.

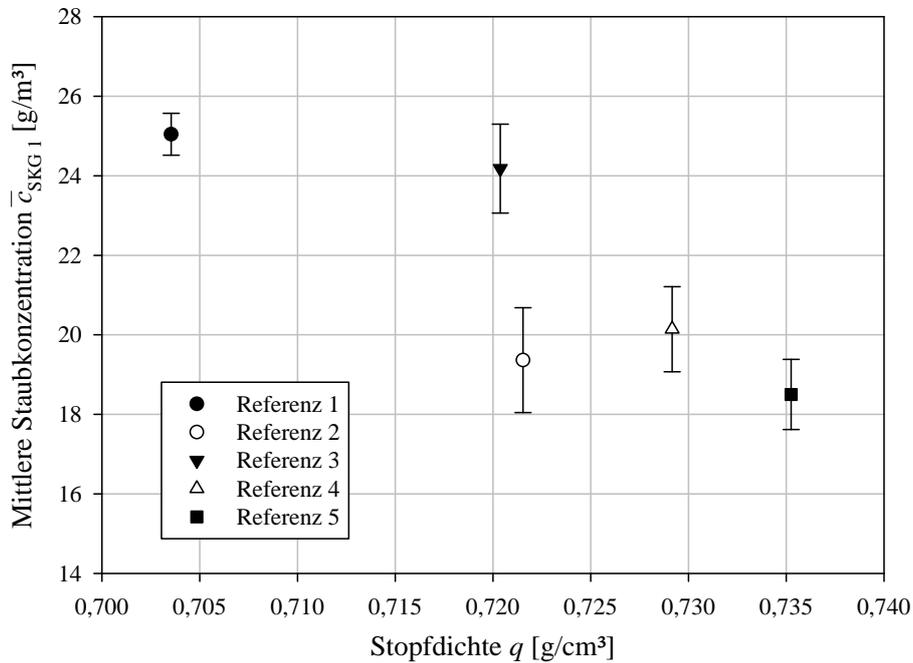


Abbildung 4.14: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* an dem SKG-Messkopf 1.

Es wird deutlich, dass mit Zunahme der Stopfdichte  $q$  der Konzentrationsmesswert sinkt. Diese Beobachtung lässt sich bei allen Messköpfen bis auf Messkopf SKG 4 und 5 feststellen. Diese Beobachtung führt zu der Hypothese, dass die Bildung von Agglomeraten zunimmt. Durch die Kompression der Staubmasse haften die Staubpartikel aneinander und es bilden sich Agglomerate. Der Partikeldurchmesser nimmt zu. Licht wird an großen Partikeln stärker gestreut, als an kleinen Partikeln. Unter der Annahme, dass ein großes Partikel die gleiche Dichte besitzt wie kleine Partikel, ergibt sich folgende Erklärung für die Beobachtung: Ein großes Partikel besitzt im Vergleich zu vielen kleinen Partikeln der Gesamtmasse des großen Partikels eine geringere massenbezogene Querschnittsfläche, das Licht wird geringer gestreut. Das SKG-Messgerät registriert eine geringere Staubkonzentration und der Messwert sinkt. Bei vielen kleinen Partikeln nimmt die Streuung des Lichtes zu und die Konzentration steigt.

Die Konzentration im Bereich der Strahlachse wird durch die Messköpfe 1 bis 3 erfasst und sinkt mit der Stopfdichte. Wohingegen die Staubkonzentration im hinteren Bereich der Staubkammer keinen Einfluss mit steigender Stopfdichte bzw. SKG 5 einen leichten Trend zu steigenden Konzentrationsmesswerten zeigt. In Abbildung 4.15 sind die mittleren Staubkonzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  der einzelnen Datensätze von SKG-Messkopf 4 über  $q$  aufgetragen.

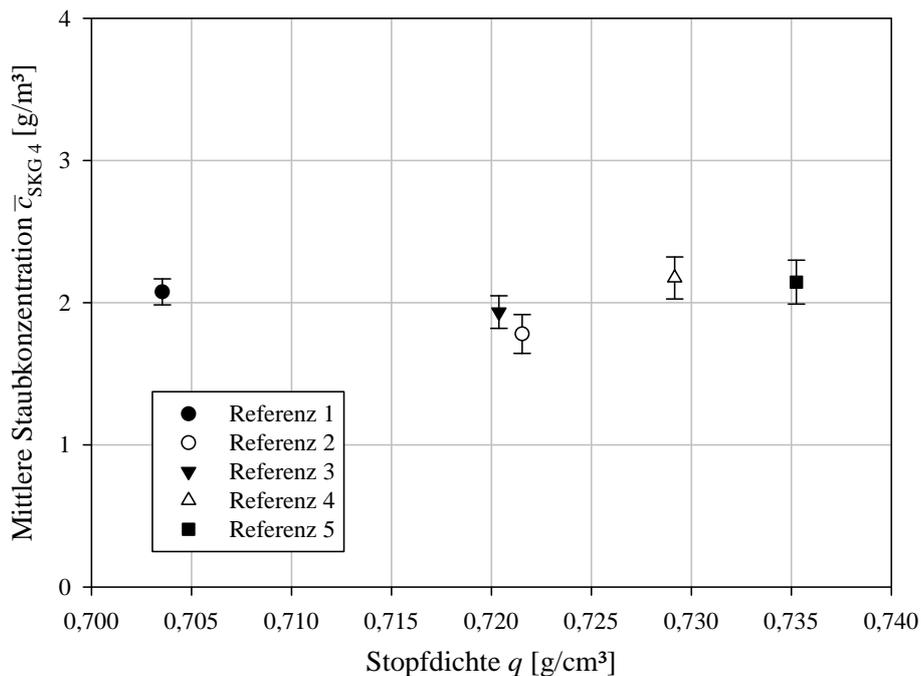


Abbildung 4.15: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* an dem SKG-Messkopf 4.

Der gegenläufige Trend der Messdatenauswertung weist darauf hin, dass sich die Messbereiche im Staubkammerinneren unterscheiden. So reagieren die Messköpfe im Bereich der Strahlausbreitung stärker auf Schwankungen der Stopfdichte  $q$ , als die SKG-Messköpfe im hinteren Bereich der Staubkammer. Im hinteren Bereich der Staubkammer beginnt die Sedimentation der Staubpartikel.

Aufgrund der verhältnismäßig hohen Temperaturen während der Versuchsdurchführung dieser Arbeit muss der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Versuchsergebnis betrachtet werden. Bei der Aufnahme der Staubkonzentrationsmesswerte ergab sich für jede Versuchsdurchführung ein Temperatur- und relativer Luftfeuchtemesswert. Zu jeder Messposition wurde das zugehörige Wertepaar der Laborumgebung erfasst. Messposition 1 und 15 wurden wie bereits zuvor erwähnt verworfen, somit ergeben sich 65 Temperatur- und Feuchtemesswerte für die Datenreihe *Referenz*. In Abbildung 4.16 sind die Staubkonzentrationsmesswerte  $c$  der einzelnen Datensätze der Datenreihe *Referenz* über der Temperatur  $T$  dargestellt.

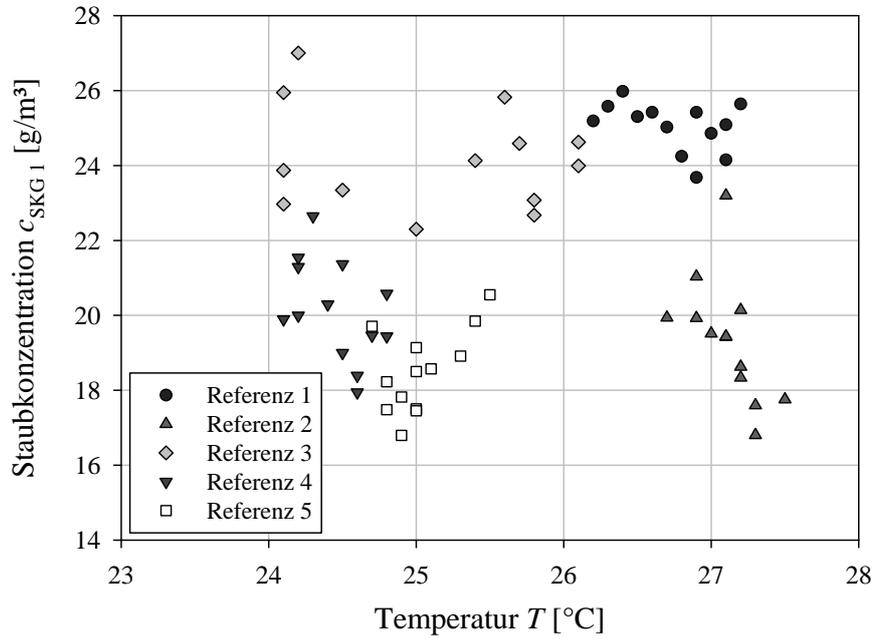


Abbildung 4.16: Darstellung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte  $c$  der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 1.

Im Rahmen der Messunsicherheit konnte ein Einfluss der Temperatur  $T$  auf die gemessene Staubkonzentration bei keinem der SKG-Messköpfe beobachtet werden. Die Auswertung der Messköpfe 2 bis 5 ist in Anhang J hinterlegt. Zusätzlich wurde die absolute Beladung  $x$  von Wasser in der Luft berechnet. Die Ergebnisse sind in Anhang K hinterlegt. Die Formel zur Berechnung sind im nach folgenden aufgeführt. Zur Ermittlung der absoluten Beladung  $x$  wird die Temperatur  $T$  sowie die relative Feuchte  $\varphi$  benötigt. Des Weiteren der Sättigungsdampfdruck  $p_s$  über Wasser, der Partialdruck  $p_{\text{Dampf}}$  von Wasserdampf, die Dichte  $\rho_{\text{Dampf}}$  des Wasserdampfes sowie die Dichte  $\rho_{\text{Luft,tr}}$  der trockenen Luft.

$$p_s = 6,112 \cdot e^{((17,62 \cdot T[^\circ\text{C}]) / (243,12 + T[^\circ\text{C}]})} \quad (4.8)$$

$$p_{\text{Dampf}} = p_s \cdot \varphi \quad (4.9)$$

$$\rho_{\text{Dampf}} = \frac{p_{\text{Dampf}}}{(461,51 \cdot (T[^\circ\text{C}] + 273,15[\text{K}]})} \quad (4.10)$$

$$\rho_{\text{Luft,tr}} = \frac{101325 \text{ Pa} - p_{\text{Dampf}}}{287,06 (T[^\circ\text{C}] + 273,15[\text{K}])} \quad (4.11)$$

$$x = \frac{\rho_{\text{Dampf}}}{\rho_{\text{Dampf}} + \rho_{\text{Luft,tr}}} \quad (4.12)$$

In Abbildung 4.17 sind die Staubkonzentrationsmesswerte  $c$  der fünf Datensätze der Datenreihe *Referenz* über der absoluten Beladung  $x$  dargestellt. Es zeigt sich, dass die absolute Wasserbeladung einen Einfluss auf die gemessenen Staubkonzentrationsmesswerte ausübt. Mit zunehmender Beladung  $x$  steigt die Staubkonzentration  $c$ . Die Vermutung liegt nahe, dass sich die Staubpartikel in trockener Luft elektrostatisch aufladen. Dadurch haften sie aneinander und bilden Agglomerate. Wie bereits bei der ersten Beobachtung sinkt der Konzentrationsmesswert mit der Zunahme des Partikeldurchmessers. Die Messabweichung stammt wie bereits zuvor von einer veränderten Lichtstreuung aufgrund der wachsenden Querschnittsfläche. Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass nicht bewiesen werden kann, ob und welchen Einfluss die beiden untersuchten Parameter auf die Konzentrationsmessung ausüben. Die aufgestellten Hypothesen konnten nicht bewiesen werden.

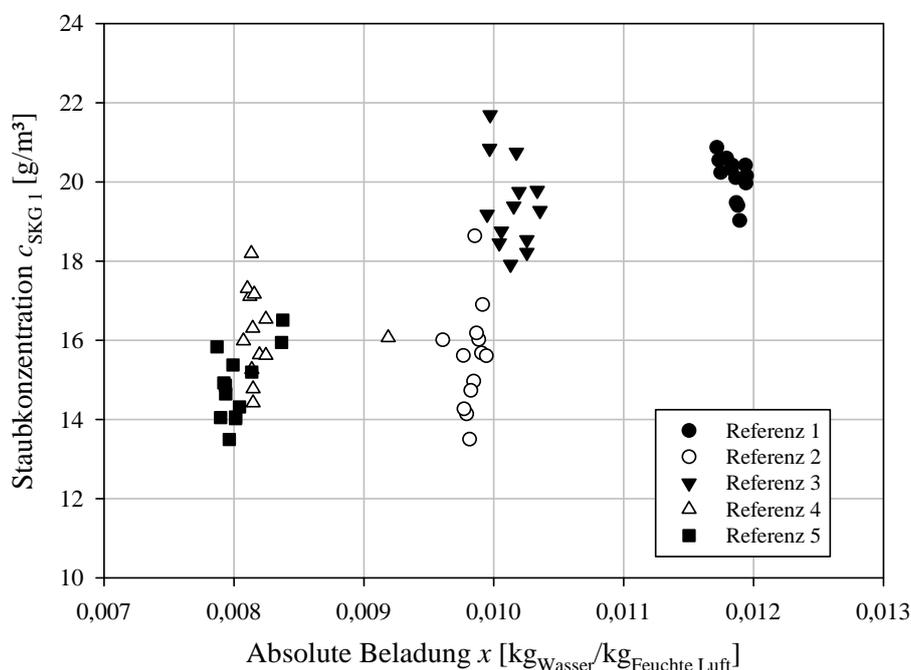


Abbildung 4.17: Darstellung der absoluten Beladung  $x$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 1.

Hier sei erwähnt, dass der Einfluss des LDA-Messkopfes auf die Konzentrationsmessung nicht bekannt ist. Durch das Umpositionieren des LDA-Messkopfes nach jeder Versuchsdurchführung ist das Strömungsfeld nicht gleichbleibend.

In Kapitel 3.1 wurde bereits der statistische Messfehler  $v_{c,\epsilon}$  der Kalibrierung bestimmt. Im nachfolgenden wurde der statistische Messfehler  $v_{\text{Mess}}$  über alle erzeugten Messwerte der Datenreihe *Referenz* ermittelt. Der Vertrauensbereich  $v$  setzt sich in dieser Arbeit demnach aus zwei statistischen Anteilen zusammen. Für die Datenreihe *Referenz* ergibt sich ein Stichprobenumfang  $n$  von 65 Messwerten je Messkopf. Der Mittelwert  $\bar{c}_{\text{Ref}}$ , die Standardabweichung  $s$  und der Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}} = 3 m$  über alle 65 Messwerte der Datenreihe sind in Tabelle 4.7 aufgelistet.

<b>Referenz</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Ref}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	2,921	0,168	0,941	0,215	0,364
Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,087	0,062	0,350	0,080	0,135
Abweichung $v_{\text{Mess}}/\bar{c}_{\text{Ref}}$ [%]	5,07	4,29	3,13	3,96	4,50

Tabelle 4.7: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Referenz* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 65$  ausgewertet.

Nach Gleichung (2.4) setzt sich die Messunsicherheit  $\sigma$  aus dem abgeschätzten systematischen Anteil  $w$  und dem statistisch berechneten Vertrauensintervall  $v$  zusammen.

$$\sigma = |v| + |w|$$

Der Vertrauensanteil  $v$  berechnet sich aus den ermittelten Vertrauensbereichen  $v_{c,\epsilon}$  aus Tabelle 3.1 und  $v_{\text{Mess}}$  aus Tabelle 4.7. Daraus ergibt sich eine Messunsicherheit  $\sigma$  für die Staubkonzentrationsmessung mit der Annahme, dass  $w = 0$  von:

$$\sigma = |v_{c,\epsilon}| + |v_{\text{Mess}}| \quad (4.13)$$

Für die jeweilige Messposition des SKG-Messkopfes ergibt sich so ein positionsabhängiger Staubkonzentrationsmesswert  $c_{\text{SKG}}$  mit einer Messunsicherheit  $\sigma$  von:

$$c_{\text{SKG}} = \bar{c} \pm \sigma \quad (4.14)$$

$$c_{\text{SKG}} = \bar{c}_{\text{Ref}} \pm v_{c,\epsilon} \pm v_{\text{Mess}} \quad (4.15)$$

In Tabelle 4.8 sind die Mittelwerte  $\bar{c}_{\text{Ref}}$  der Datenreihe *Referenz* sowie die Vertrauensbereiche  $v_{c,\epsilon}$  und  $v_{\text{Mess}}$  aufgelistet.  $v_{c,\epsilon}$  berechnet sich aus dem relativen Größtfehler  $v_{\epsilon}/\bar{c}$ , multipliziert mit dem mittleren Konzentrationswert  $\bar{c}$ . Die Messunsicherheit  $\sigma$  setzt sich aus den beiden Anteilen der statisch ermittelten Vertrauensbereiche zusammen.

<b>Staubkonzentration</b> [g/m <sup>3</sup> ]	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Ref}}$	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Vertrauensbereich $v_{c,\epsilon}$	0,148	0,076	0,301	0,050	0,055
Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$	1,087	0,062	0,350	0,080	0,135
Messunsicherheit $\sigma$	1,235	0,138	0,651	0,130	0,190

Tabelle 4.8: Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* und *Geschwindigkeit* an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Köpfe.

## Geschwindigkeitsdaten

Für einen Datensatz wird für jeden Messpunkt genau ein mittlerer Geschwindigkeitsmesswert  $\bar{u}$ , sowie eine Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  gemessen. Somit ergeben sich für die Datenreihe *Referenz* fünf mittlere Geschwindigkeiten  $\bar{u}$  für jede Messposition. In Tabelle 4.9 sind die Geschwindigkeitsmesswerte aufgelistet. Es wurde der Mittelwert  $\bar{\bar{u}}$  der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$ , deren Standardabweichung  $s$  und der statistische Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}} = 3 s$  sowie die prozentuale Messunsicherheit  $v_{\text{Mess}}/\bar{\bar{u}}$  berechnet. Die mittleren Geschwindigkeiten  $\bar{u}$  der einzelnen Datensätze können aus dem Anhang E entnommen werden.

Referenz				
	$\bar{u}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{\bar{u}}$ [%]
Y0X0	5,77	0,80	1,07	19
Y0X1	3,66	0,18	0,24	7
Y0X2	2,87	0,06	0,08	3
Y0X3	2,37	0,06	0,08	3
Y0X4	1,65	0,03	0,04	2
Y0X5	1,40	0,02	0,03	2
Y0X6	1,26	0,03	0,04	3
Y1X1	0,68	0,20	0,27	40
Y1X2	1,14	0,17	0,23	20
Y1X3	1,31	0,16	0,22	16
Y1X4	1,32	0,10	0,14	11
Y1X5	1,18	0,20	0,26	22
Y2X1	-0,05	0,12	0,16	343
Y2X3	0,01	0,03	0,04	330
Y2X4	0,07	0,03	0,04	62

Tabelle 4.9: Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{\bar{u}}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Referenz* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

Bei der mittleren Geschwindigkeit  $\bar{u}$  wurde kein systematischer Messfehler  $w$  identifiziert. Somit entspricht der berechnete Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$  der Messunsicherheit  $\sigma$ . Die positionsabhängigen Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  berechnen sich aus dem Mittelwert der Geschwindigkeitsdaten und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Die Daten können aus Tabelle 4.9 entnommen werden.

$$\bar{u} = \bar{\bar{u}} \pm v_{\text{Mess}} \quad (4.16)$$

In Tabelle 4.10 sind die Mittelwert  $\bar{u}_{\text{RMS}}$  der Schwankungsgrößen  $u_{\text{RMS}}$ , deren Standardabweichung  $s$ , der Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ , die prozentuale Abweichung  $v_{\text{Mess}}/\bar{u}_{\text{RMS}}$  sowie der messbereichsabhängige systematische Messfehler  $w_f$  aufgelistet. In diesem Geschwindigkeitsbereich beträgt  $w_f = 0,171$  m/s. Die Schwankungsgrößen  $u_{\text{RMS}}$  der einzelnen Datensätze können aus dem Anhang E entnommen werden.

Referenz					
	$\bar{u}_{\text{RMS}}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{u}_{\text{RMS}}$ [%]	$w_f$ [m/s]
Y0X0	1,73	0,14	0,19	11	0,171
Y0X1	0,98	0,03	0,04	4	0,171
Y0X2	0,75	0,01	0,02	2	0,171
Y0X3	0,61	0,01	0,02	2	0,171
Y0X4	0,43	0,02	0,02	5	0,171
Y0X5	0,37	0,01	0,02	5	0,171
Y0X6	0,34	0,02	0,02	7	0,171
Y1X1	0,54	0,05	0,07	13	0,171
Y1X2	0,59	0,02	0,03	5	0,171
Y1X3	0,55	0,02	0,03	5	0,171
Y1X4	0,43	0,01	0,01	2	0,171
Y1X5	0,37	0,03	0,04	10	0,171
Y2X1	0,32	0,55	0,74	232	0,171
Y2X3	0,05	0,01	0,01	27	0,171
Y2X4	0,06	0,01	0,01	25	0,171

Tabelle 4.10: Mittelwerte der Schwankungsgröße  $\bar{u}_{\text{RMS}}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Messung}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Referenz* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

Aus einem systematischen Messfehler  $w_f$  und einem statistischen Messfehler  $v_{\text{Mess}}$  ergibt sich eine positionsabhängige Größe  $u_{\text{RMS}}$  mit einer Messunsicherheit von:

$$u_{\text{RMS}} = \bar{u}_{\text{RMS}} \pm v_{\text{Mess}} \pm w_f \quad (4.17)$$

Bei der Auswertung der Daten aus Tabelle 4.9 und Tabelle 4.10 fällt auf, dass die prozentuale Messunsicherheit auf der Messachse  $Y_2$  besonders hoch ist. Es zeigt sich, dass die Turbulenz in diesem Bereich bei allen Datensätzen der Datenreihe *Referenz* sehr hoch ist (siehe Anhang E). Nach Gleichung (2.1) ist bei sinkender Geschwindigkeit mit einer Abnahme der Turbulenz zu rechnen. Die Beobachtung widerspricht der theoretischen Erwartung. Nach Gleichung (4.4) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen  $u_{\text{RMS}}$  und der Turbulenz  $T$ . Die Ergebnisse in Tabelle 4.10 zeigen, dass der systematischen Messfehlers  $w_f$  größer als der Anteil des statistischen Messfehler  $v_{\text{Mess}}$  ist. Die Messunsicherheit  $\sigma$  wird von dem systematischen Messfehler  $w_f$  dominiert.

Aus der Auswertung der Rohdaten lässt sich außerdem folgende Vermutung aufstellen: Bei der Messung der Geschwindigkeitsverlaufes  $u(t)$  wird unter anderem die Anzahl der Partikeldurchläufe durch den Messpunkt erfasst. Pro Durchgang eines Partikels wird ein Geschwindigkeitswert  $u$  erfasst. Dabei lässt sich sagen, dass die Anzahl der Partikeldurchläufe auf der Strahlachse  $Y_0$  und auf der Messachse  $Y_1$  einige tausend bis zehntausend umfasst. Auf der unteren Messachse  $Y_2$  liegt die Partikelanzahl lediglich bei einigen hundert. Die Messwerte dieser Messebene sind demnach statistisch weniger aussagekräftig.

### 4.5.3 Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden verschiedene Parameter variiert und der Einfluss dieser Variation auf die Messungen im Vergleich zu der Datenreihe *Referenz* untersucht. Um unterschiedliche Befüllvorgänge analysieren zu können, wurden ausgewählte Parameter verändert. Dazu wurde in dem Datensatz *Geschwindigkeit* die Einlassgeschwindigkeit und dem Datensatz *Beladung* die Partikelbeladung des Staub/Luft-Gemisches variiert.

Die Versuchsdurchführung bzw. Erzeugung der Daten ist von einer Vielzahl von Parametern, u.a. der Einlassgeschwindigkeit  $v$ , der Partikelbeladung  $c_m$  der Stopfdichte  $q$  und der relativen Feststofffeuchte abhängig. Die beiden Parameter Stopfdichte und Feststofffeuchte sollen über die Versuchsdurchführung konstant gehalten werden. In dieser Arbeit wurde eine mittlere Stopfdichte  $\bar{q}$  von  $0,72 \text{ g/m}^3$  der Datenreihe *Referenz* ermittelt. Aus Abschnitt 4.5.2 ist bereits bekannt, dass die Stopfdichte einen erkennbaren Einfluss auf das Messergebnis ausübt. In Kapitel 5 wird die Schwankung der Stopfdichte  $q$  und die Auswirkung auf das Messergebnis diskutiert und eine Maßnahme zu deren Begrenzung beschrieben. Die relative Feststofffeuchte unterliegt den örtlichen Umgebungseinflüssen und soll ebenfalls konstant gehalten werden. Sie wurde in regelmäßigen Abständen mittels eines Restfeuchtemessgerätes MA100Q der Firma Sartorius bestimmt. Um einer Variation der Produkteigenschaft entgegen zu wirken, wurden alle Datensätze mit Maisstärke aus einer Produktcharge erzeugt.

Die mittlere Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  des Staub/Luft-Gemisches in die Staubkammer lässt sich über den Volumenstrom  $\dot{V}$  bzw. durch den Vordruck  $p$  an dem Partikeldosierer RBG 1000 regulieren. Die trockene, kondensatfreie Druckluft (8 bar abs.) wird über ein Druckregelventil mit Manometer (0 – 10 bar) reduziert. Um die mittlere Geschwindigkeit  $\bar{v}$  beim Austritt der Düse bestimmen zu können, wurde eine Volumenstrom-Druck-Kurve mit einem Durchflussschwebekörper der Firma Rota GmbH aufgenommen und der Volumenstrom  $\dot{V}$  über die Düsenfläche  $A$  mit Hilfe der Gleichung

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}(p)}{A} \quad (4.18)$$

in die Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  des Staub/Luft-Gemisches an der Staubaustrittsdüse umgerechnet. Einen Überblick über die in der Versuchsanordnung möglichen Einlassgeschwindigkeiten  $\bar{v}$  in Abhängigkeit des Vordruckes  $p$  zeigt Abbildung 4.18. Zusätzlich zu dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und der Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  wurden die dazu gehörigen Reynoldszahlen  $Re$  nach Gleichung (2.1) aus Kapitel 2.2 berechnet. Die charakteristische Länge ist in diesem Fall der Düsendurchmesser  $d$  mit 4 mm. Es wird deutlich, dass der in dieser Arbeit untersuchte Strömungsbereich stets turbulent ist, da  $Re \geq Re_{\text{krit}} \approx 2300$ .

Druck [bar]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	Geschwindigkeit [m/s]	Re-Zahl [-]
5,0	3,57	50,45	13.865
4,0	2,83	39,99	12.523
3,5	2,50	35,34	10.958
3,0	2,18	30,86	9.393
2,5	1,80	25,46	7.603
2,0	1,57	22,28	6.262
1,5	1,35	19,10	5.367
1,0	1,05	14,85	3.891
0,5	0,65	9,20	2.684

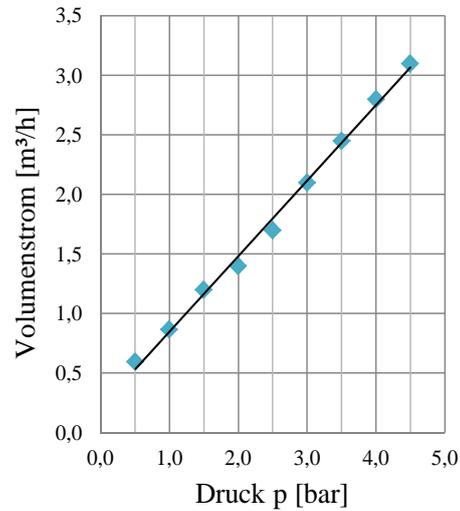


Abbildung 4.18: Darstellung der aufgenommenen Volumenströme  $\dot{V}$  über den Vordruck  $p$  in einer Volumenstrom-Druck-Kurve (rechts) und die dazugehörigen Messwerte.

Die Feststoffbeladung wurde in dieser Arbeit über die Vorschubgeschwindigkeit  $n$  der Dosiereinheit variiert. Die Drehzahl der Bürste  $N$ , sowie die Befüllung des Feststoffbehälters und die daraus resultierende Stopfdichte  $q$  wurden über alle Versuche konstant gehalten. Der Massenstrom  $\dot{m}$  berechnet sich aus dem Durchmesser des Feststoffbehälters  $d = 2,8$  cm, der Vorschubgeschwindigkeit  $n$  und der Stopfdichte  $q$ .

$$\dot{m}_{\text{Ref}} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n \cdot q = \frac{\pi}{4} \cdot (2,8 \text{ cm})^2 \cdot 50 \frac{\text{cm}}{\text{h}} \cdot 0,72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 221,7 \frac{\text{g}}{\text{h}} \quad (4.19)$$

Die Partikelbeladung  $c_m$  der einströmenden Luft berechnet sich anschließend über den Massenstrom  $\dot{m}$  sowie den Luftvolumenstrom  $\dot{V}$ :

$$c_{m, \text{Ref}} = \frac{\dot{m}_{\text{Ref}}}{\dot{V}_{\text{Ref}}} = \frac{221,7 \text{ g/h}}{1,35 \text{ m}^3/\text{h}} = 164,2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (4.20)$$

Tabelle 4.11 gibt einen Überblick der Luftvolumenströme  $\dot{V}$ , der Massenströme  $\dot{m}$  und daraus resultierenden Massenkonzentrationen  $c_m$  am Einlass für die jeweilige Versuchsreihe wieder.

Datenreihe	Luftvolumenstrom $\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /h]	Massenstrom $\dot{m}$ [g/h]	Konzentration $c_m$ [g/m <sup>3</sup> ]
Referenz	1,35	221,7	164,2
Geschwindigkeit	1,83	221,7	78,3
Beladung	1,35	110,8	82,1

Tabelle 4.11: Übersicht der Volumenströme  $\dot{V}$ , der Massenströme  $\dot{m}$  und der Massenkonzentration  $c_m$  der jeweiligen Datenreihen an der Staubaustrittsdüse.

In Abschnitt 4.5.2 wurde die Messunsicherheiten  $\sigma$  der Datenreihe *Referenz* berechnet. Die Mittelwerte  $\bar{c}_{\text{Ref}}$ , sowie die nach Gleichung (4.15) errechnete Gesamtmessunsicherheit  $\sigma$  sind in Tabelle 4.12 aufgelistet.

<b>Referenz</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Ref}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Messunsicherheit $\sigma$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,235	0,138	0,651	0,130	0,190
Abweichung $\sigma/\bar{c}_{\text{Ref}}$ [%]	5,8	9,5	5,8	6,4	6,3

Tabelle 4.12: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit  $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Referenz* mit einem Stichprobenumfang  $n = 65$  ausgewertet.

Im Nachfolgenden wurden die Messdaten der Datenreihen *Geschwindigkeit* und *Beladung* nach demselben Vorgehen ausgewertet. Auch hier wurde die erste und letzte Messposition verworfen, sodass ein Stichprobenumfang von  $n = 65$  untersucht wurde. Die entsprechende Auswertung ist im jeweiligen Unterkapitel zu finden. In den Tabellen 4.13 und 4.15 sind die Mittelwerte  $\bar{c}$  der Staubkonzentrationsmessdaten aller Messköpfe und die Messunsicherheit  $\sigma$  aufgelistet. Die Messunsicherheit  $\sigma$  setzt sich dabei aus dem Vertrauensbereich der Kalibrierung  $v_{c,\epsilon}$  sowie dem Vertrauensbereich der Messung  $v_{\text{Mess}}$  der Datenreihen *Geschwindigkeit* und *Beladung* zusammen. Die Auswertung der einzelnen Datensätze findet sich in Anhang G.

Die mittleren Messwerte  $\bar{u}$  der Geschwindigkeitsmessung und deren Messunsicherheit sind in Anhang H aufgelistet. In den nächsten Abschnitten wurden der Parameter Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  in der Datenreihe *Geschwindigkeit* und der Parameter Partikelbeladung in der Datenreihe *Beladung* genau untersucht. Es werden zuerst die Staubkonzentrationsmesswerte und anschließend die Geschwindigkeitsmesswerte mit den Messwerten der Datenreihe *Referenz* verglichen.

#### 4.5.3.1 Datenreihe Geschwindigkeit

Die Mittelwerte  $\bar{c}_{\text{Gesch}}$ , sowie die Messunsicherheit  $\sigma$  sind in Tabelle 4.13 aufgelistet.

<b>Geschwindigkeit</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Gesch}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	11,927	1,294	7,706	1,612	2,349
Messunsicherheit $\sigma$ [g/m <sup>3</sup> ]	0,514	0,116	0,596	0,162	0,098
Abweichung $\sigma/\bar{c}_{\text{Gesch}}$ [%]	4,3	9,0	7,7	10,1	4,2

Tabelle 4.13: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit  $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Geschwindigkeit* mit  $n = 65$  ausgewertet.

Wie bereits zuvor in Tabelle 4.11 dargestellt, wird der Volumenstrom  $\dot{V}$  bei gleichbleibendem Massenstrom  $\dot{m}$  erhöht. Nach Gleichung (4.20) reduziert sich so die Massen-

konzentration  $c_m$ . In Abbildung 4.19 sind die mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der jeweiligen Datenreihe über die einzelnen SKG-Messköpfe aufgetragen. Wie zu erwarten, sinken die mittleren Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Geschwindigkeit*.

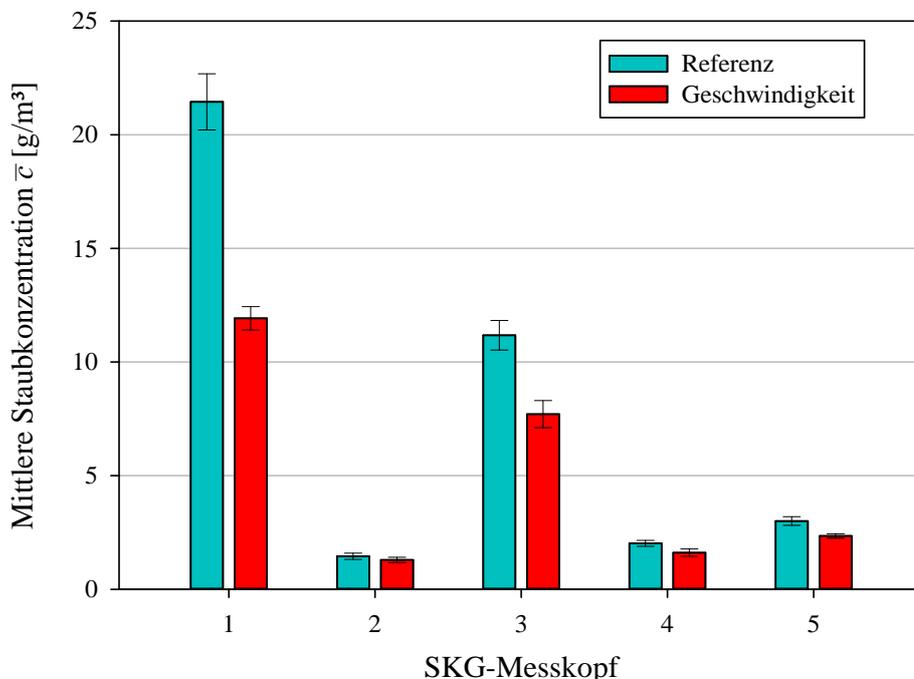


Abbildung 4.19: Vergleich der mittleren Konzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* und *Geschwindigkeit*. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit  $\sigma$ .

Die Massenkonzentration  $c_m$  der Datenreihe *Geschwindigkeit* sinkt an der Staubaustrittsdüse um den Faktor

$$F_1 = \frac{c_{m,Ref}}{c_{m,Gesch}} = \frac{164,2 \text{ g/m}^3}{78,3 \text{ g/m}^3} = 2,1 \quad (4.21)$$

Dieser berechnet sich aus den Messwerten aus Tabelle 4.11. In Tabelle 4.14 sind die mittleren Staubkonzentrationswerte  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* und *Geschwindigkeit* an den jeweiligen Messpositionen aufgelistet. Das Verhältnis der Konzentrationsmesswerte wird mit dem Faktor  $F_1$  an der Staubaustrittsdüse verglichen.

<b>Staubkonzentration</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{Ref}$ [g/m³]	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Mittelwert $\bar{c}_{Gesch}$ [g/m³]	11,927	1,294	7,706	1,612	2,349
Verhältnis $\bar{c}_{Ref}/\bar{c}_{Gesch}$ [-]	1,8	1,1	1,5	1,3	1,3

Tabelle 4.14: Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* und *Geschwindigkeit* an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Messköpfe.

An der Messposition SKG 1 ist der Einfluss der Geschwindigkeitserhöhung am deutlichsten zu erkennen, ebenso an der Messposition SKG 3, wenn auch etwas schwächer. Die Daten außerhalb der Strahlachse, wie SKG 2, sowie der hinteren Positionen SKG 4 und 5 weichen dagegen um bis zu 48 % von dem zu erwartenden Ergebnis ab. Dieses Erkenntnis deckt sich mit der theoretischen Erwartung aus Kapitel 2.2, dass sich der Geschwindigkeitseinfluss am stärksten auf der Strahlachse nachweisen lässt. Die Mittengeschwindigkeit des Freistrahles steigt mit Zunahme der Einlassgeschwindigkeit, wobei sich die Ausbreitung des Strahlprofils nicht verändert. Abseits der Strahlachse treten zwei Effekte auf: Einerseits die Rezirkulation des Staub/Luft-Gemisches und andererseits die Sedimentation der Partikel. Die SKGs abseits der Strahlachse bleiben von dem Strahl unberührt. Die Strahlgeschwindigkeit übt scheinbar keinen Einfluss auf die Sedimentation in diesem Bereich aus.

In Abbildung 4.20 sind die mittleren Geschwindigkeitsmessdaten der Datenreihen *Referenz* und *Geschwindigkeit* dargestellt.

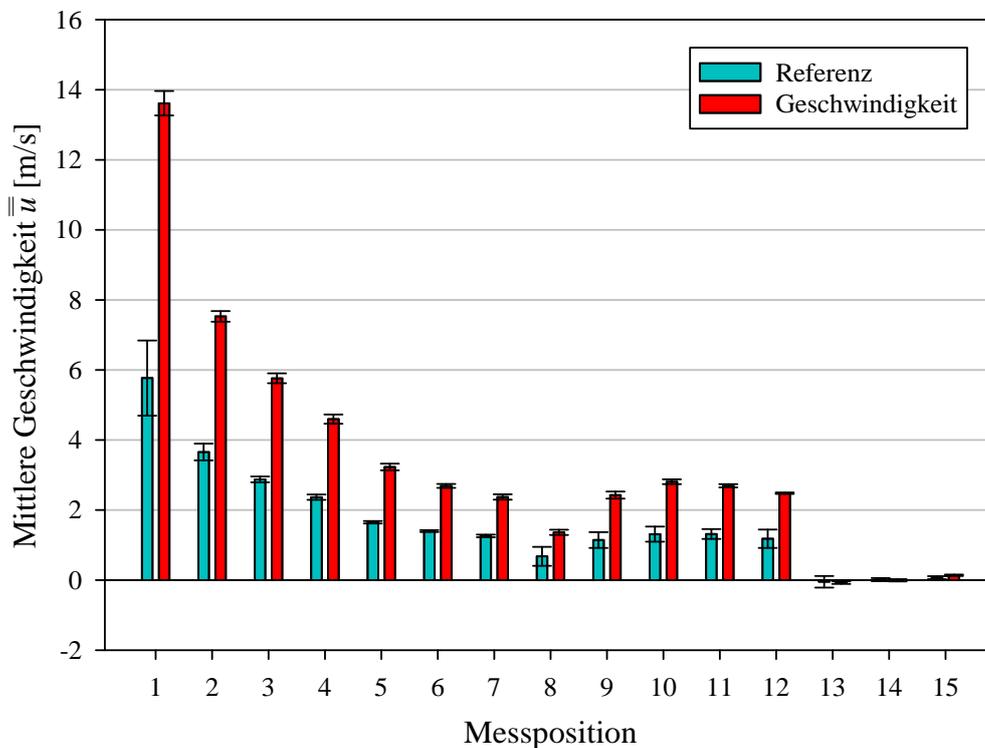


Abbildung 4.20: Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  der Datenreihe *Referenz* und *Geschwindigkeit*, dargestellt über die einzelnen Messpositionen. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit  $\sigma$ .

Bei einer Erhöhung der Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  wird mit einer Erhöhung der mittleren Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  gerechnet. Die Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  an der Stau-  
baustrittsdüse wird um den Faktor  $F_2$  erhöht.

$$F_2 = \frac{v_{\text{Geschw}}}{v_{\text{Ref}}} = \frac{v(p = 4 \text{ bar})}{v(p = 1,5 \text{ bar})} = \frac{39,99 \text{ m/s}}{19,10 \text{ m/s}} = 2,1 \quad (4.22)$$

Der Faktor errechnet sich aus dem jeweiligen Druck-Geschwindigkeits-Paar aus Abbildung 4.18. Es soll nun überprüft werden, ob sich dieser Faktor in den Messdaten der jeweiligen Messposition widerspiegelt.

Nach Kapitel 2.2 wird der Einfluss der Geschwindigkeit lediglich auf der Strahlachse erwartet. Daher werden im Nachfolgenden nur die Messpositionen  $Y_0X_0$  bis  $Y_0X_6$  der Strahlachse betrachtet. Dazu wurden die mittleren Geschwindigkeiten  $\bar{u}$  der Datenreihe *Geschwindigkeit* mit dem Faktor  $F_2$  dividiert und über die Messpositionen der Strahlachse aufgetragen. In Abbildung 4.21 sind die Geschwindigkeitsverläufe der Datenreihe *Referenz*, *Geschwindigkeit* sowie der normierte Verlauf der Datenreihe *Geschwindigkeit* über den Abstand zur Staubeintrittsdüse auf der Strahlachse dargestellt.

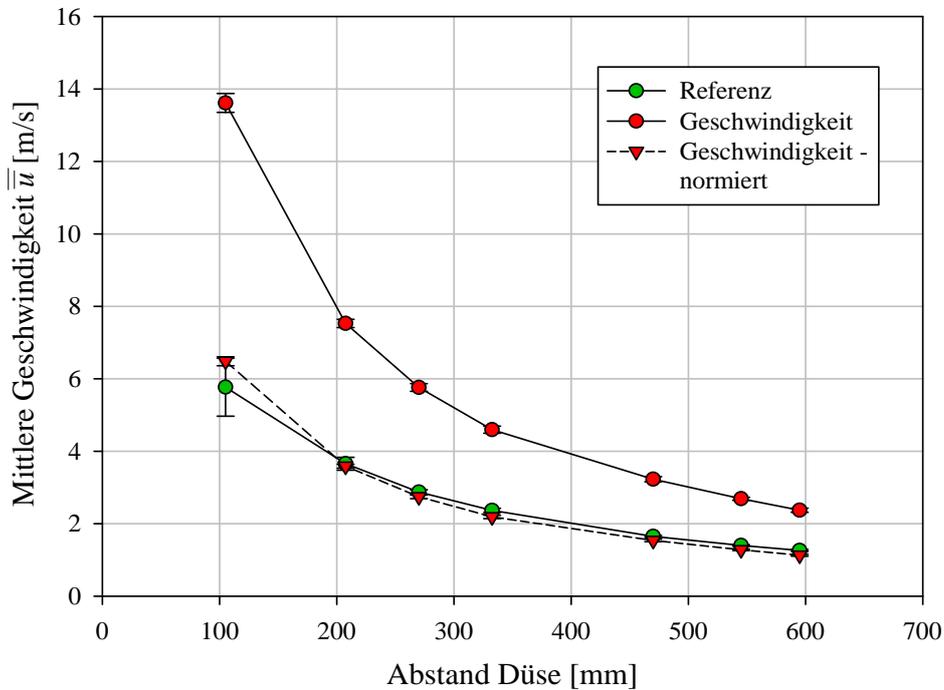


Abbildung 4.21: Darstellung der mittleren Geschwindigkeitsmessdaten  $\bar{u}$  über den Düsenabstand auf der Strahlachse. Zu sehen sind die Messpunkte  $Y_0X_0$  bis  $Y_0X_6$  der Datenreihe *Referenz* und der Datenreihe *Geschwindigkeit*, sowie die normierte Geschwindigkeit. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit  $\sigma$ .

Die Geschwindigkeitsmesswerte der Datenreihe *Geschwindigkeit* (rot) sind höher als die Messdaten der Datenreihe *Referenz* (grün). Die Kurve der normierten Geschwindigkeitsmessdaten (rote Dreiecke) beinhaltet die Messwerte der Datenreihe *Geschwindigkeit* dividiert durch den Faktor  $F_2$ . Bis auf die Messposition nahe der Staubaustrittsdüse liegen die beiden Kurven innerhalb des Fehlerintervalls. Auch hier deckt sich die theoretische Erwartung mit der Erkenntnis der Auswertung. Die Strömungsgeschwindigkeit des Freistrahls lässt sich somit gut über die am Auslass herrschende Geschwindigkeit regeln.

### 4.5.3.2 Datenreihe Beladung

Die Mittelwerte  $\bar{c}_{\text{Belad}}$ , sowie die Messunsicherheit  $\sigma$  sind in Tabelle 4.15 aufgelistet.

Beladung	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Bela}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	10,714	0,760	5,977	1,257	1,977
Messunsicherheit $\sigma$ [g/m <sup>3</sup> ]	0,480	0,088	0,339	0,114	0,085
Abweichung $\sigma/\bar{c}_{\text{Bela}}$ [%]	4,5	11,6	5,7	9,0	4,3

Tabelle 4.15: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit  $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Beladung* mit  $n = 65$  ausgewertet.

Die Partikelbeladung des Staub/Luft-Gemisches wird über die Vorschubgeschwindigkeit  $n$  variiert. Bei der Datenreihe *Beladung* wurde die Vorschubgeschwindigkeit der Dosiereinheit verringert. Nach Gleichung (4.20) sinkt bei gleichbleibenden Volumenstrom  $\dot{V}$  der Massenstrom  $\dot{m}$ .

In Abbildung 4.22 sind die mittleren Konzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  der beiden Datenreihe *Referenz* und *Beladung* über die einzelnen SKG-Messköpfe aufgetragen.

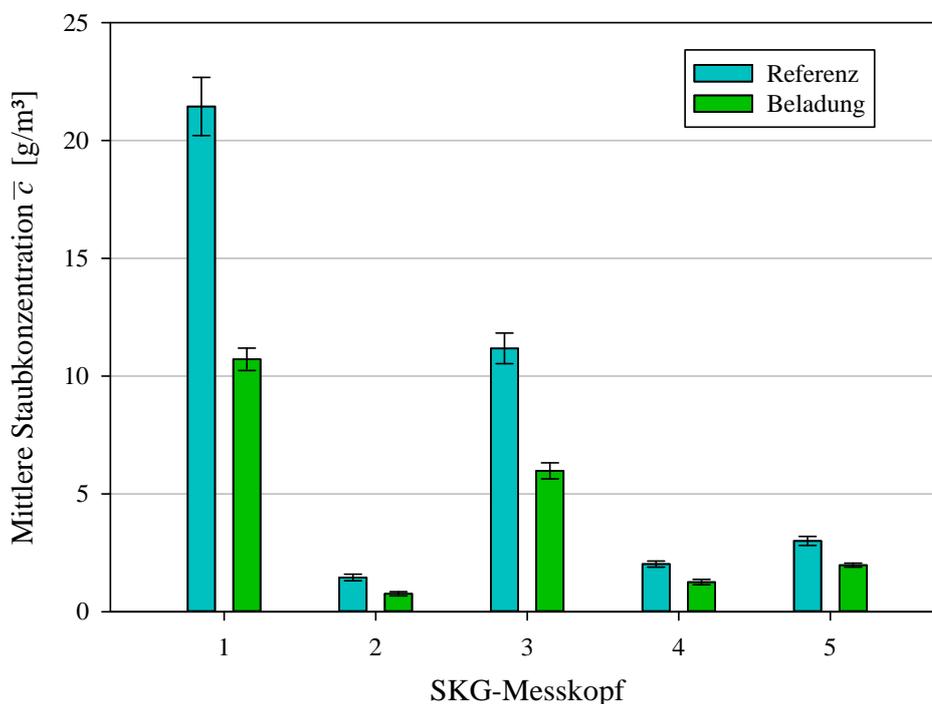


Abbildung 4.22: Vergleich der mittleren Konzentrationsmesswerte  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* und *Beladung*. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit  $\sigma$ .

Aus Tabelle 4.11 kann entnommen werden, dass sich daraus die Massenkonzentration  $c_m$  an der Staubaustrittsdüse um den Faktor  $F_3$  reduziert.

$$F_3 = \frac{c_{m,Ref}}{c_{m,Belad}} = \frac{164,2 \text{ g/m}^3}{82,1 \text{ g/m}^3} = 2,0 \quad (4.23)$$

<b>Staubkonzentration</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{Ref}$ [g/m <sup>3</sup> ]	21,446	1,454	11,178	2,022	3,003
Mittelwert $\bar{c}_{Bela}$ [g/m <sup>3</sup> ]	10,714	0,760	5,977	1,257	1,977
$\bar{c}_{Ref}/\bar{c}_{Belad}$ [-]	2,0	1,9	1,9	1,6	1,5

Tabelle 4.16: Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* und *Beladung* an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Messköpfe.

Nach Tabelle 4.16 zeigt sich, dass es bei den Konzentrationsmesswerten der Messgeräten im Bereich der Strahlausbreitung (SKG 1 bis 3) eine gute Übereinstimmung mit dem zuvor berechneten Faktor gibt. Die Konzentrationen im Bereich der beiden hinteren Positionen SKG 4 und 5 weichen dagegen um 20 bzw. 25 % von dem zu erwartenden Ergebnis ab. Die Partikel werden mit der Strömung in das Staubkammerinnere transportiert und sedimentieren. Auch hier ist die Hypothese, dass die Sedimentation in diesem Bereich einen stärkeren Einfluss auf das Messergebnis ausübt, als im Bereich der Strahlabbildung bzw. der Strahlachse.

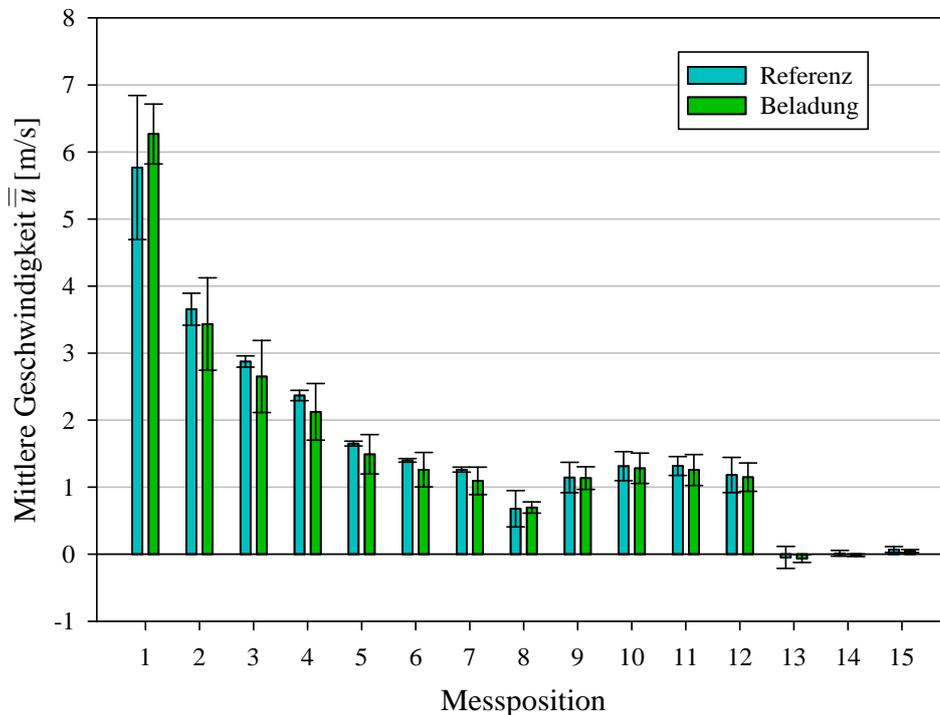


Abbildung 4.23: Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  der Datenreihe *Referenz* und *Beladung*, dargestellt über die einzelnen Messpositionen. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit  $\sigma$ .

In Abbildung 4.23 sind die mittleren Geschwindigkeitsmessdaten der Datenreihen *Referenz* und *Beladung* dargestellt. Bei beiden Datenreihen wurde die gleiche Einlassgeschwindigkeit  $\bar{v}$  über das Druckregelventil der Dosiereinheit RBG 1000 eingestellt. Im Rahmen der Messunsicherheit der Datenreihe *Referenz* und der Datenreihe *Beladung* lässt sich kein Unterschied zwischen den mittleren Geschwindigkeitsmessdaten erkennen. Aufgrund dessen, kann folgende Aussage getroffen werden: Die Partikelbeladung der Datenreihe *Referenz* übt keinen erkennbaren Einfluss auf die Strömung aus.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die theoretischen Erwartungen erfüllt wurden. Der Einfluss der Geschwindigkeitsvariation zeigt sich deutlich auf der Strahlachse. An den Positionen abseits der Strahlachse zeigt sich kein Einfluss der Geschwindigkeit, da diese Bereiche vermutlich von zwei Effekten dominiert werden. Einerseits die Rezirkulation des Staub/Luft-Gemisches und andererseits die Sedimentation der Partikel. Der Einfluss der Beladungsvariation zeigt sich ebenfalls deutlich im Bereich der Strahlausbreitung, sprich Position SKG 1 bis 3. In den hinteren Bereichen weichen die Messwerte von dem zu erwartenden Ergebnis ab.

## 4.6 Visualisierung und Vergleich mit der numerischen Simulation

Eine Visualisierung des Staub/Luft-Gemisches soll Aufschluss über die zeitliche Ausbreitung der Staubwolke innerhalb der Staubkammer geben. Ziel ist es, die zeitliche Entwicklung der Strömung in sehr kleinen Zeitintervallen darzustellen. Eine Möglichkeit die Ausbreitung des Strömungsprofils experimentell zu bestimmen, liefert ein laseroptischer Versuchsaufbau. In Abbildung 4.24 ist der schematische Aufbau dargestellt.

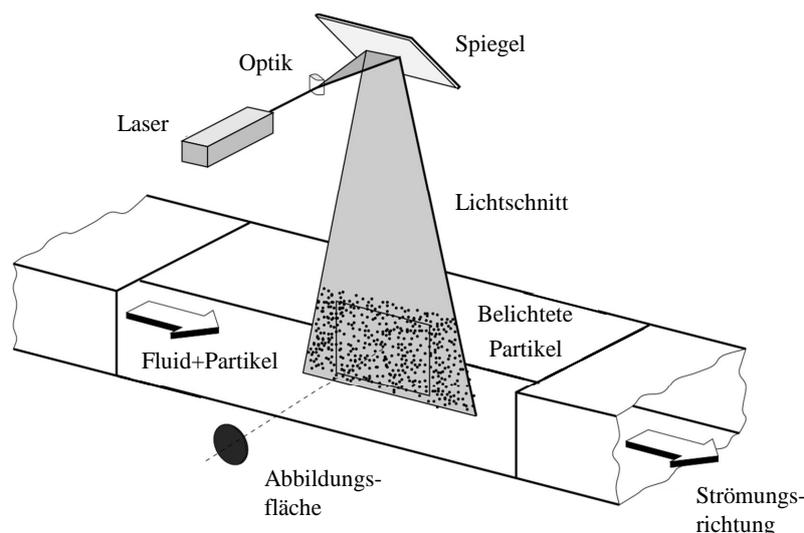


Abbildung 4.24: Schematische Darstellung des laseroptischen Messaufbaus in einem Windkanal, entnommen aus [22].

Dabei strömt das Staub/Luft-Gemisch in das Staubkammerinnere und wird in kurzen zeitlichen Abständen fotografiert. Ein Laserstrahl wird mittels einer Optik zu einem Lichtschnitt aufgespannt, so dass das Staub/Luft-Gemisch von einer 2-dimensionalen Fläche durchstrahlt wird. Das von den Partikeln gestreute Licht wird mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und kann anschließend ausgewertet werden. Der Messaufbau in dieser Arbeit umfasst einen grünen Nd:YAG-Laser mit einer Leistung von 30 mW und einer Powell-Linse. Diese dient zur Strahlteilung des Laserstrahls in einen ebenen Lichtschnitt. Durchlaufen die Partikel diesen Lichtschnitt, streuen sie das Licht und werden für den Beobachter sichtbar. Im Vergleich zu einer zylinderförmigen Linse kann die Powell-Linse einen schmalen Laserstrahl in gleichmäßig beleuchtete gerade Linie strecken. Es entsteht kein Strahlmaximum in der Mitte des Lichtschnittes.

Die einzelnen Komponenten wurden mit Hilfe von Rohrschellen und Halterungen in dem Schienensystem montiert und ausgerichtet. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Strahlmitte des Lasers sehr präzise auf die Powell-Linse ausgerichtet wird. Abbildung 4.25 zeigt den Versuchsaufbau des Messsystems auf der Staubkammer.

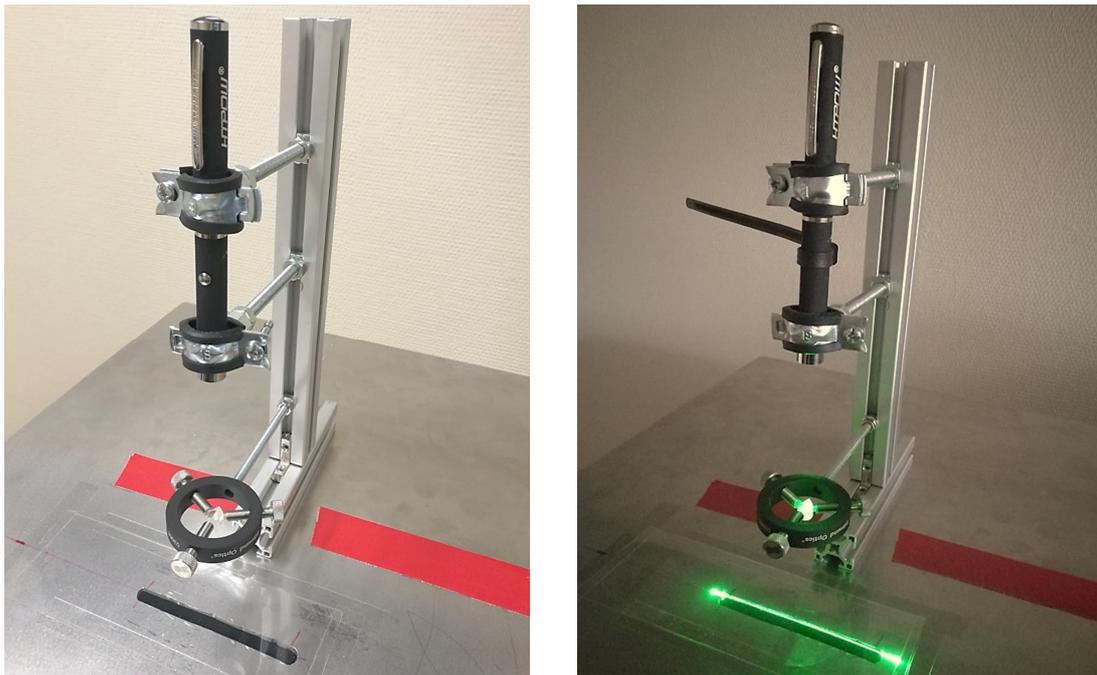


Abbildung 4.25: Messaufbau bestehend aus einem grünen Laser und der Powell-Linse.

Der Laserschnitt durchstrahlt ein Langloch in der Staubkammerdecke. Dieses wurde mit einer transparenten Folie abgedeckt, damit sich die Staubwolke nicht außerhalb der Staubkammer ausbreiten kann. Zur Bildaufnahme wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera der Firma High Speed Vision GmbH verwendet. Mit dieser Kamera wurden Aufnahmen mit einer Framerate von 50 Bildern pro Sekunde erzeugt. Um den Lichtschnitt innerhalb der Staubkammer fotografieren zu können wurde eine Plexiglasscheibe auf der Vorderseite der geöffneten Staubkammer angebracht. Der Füllzylinder der Do-

siereinheit RBG 1000 wurde mit getrockneter Maisstärke befüllt und bei geschlossener Staubkammer angefahren<sup>3</sup>. Der Innenraum wurde gereinigt und die Plexiglasscheibe an die Staubkammer angebracht. Der Laser wurde eingeschaltet, der Laborraum verdunkelt und die Kamera gestartet. Die Dosiereinheit wurde für wenige Sekunden betrieben. In Abbildung 4.26 ist die zeitliche Entwicklung der Strahlausbreitung des Staub/Luft-Gemisches in das Staubkammerinnere zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.

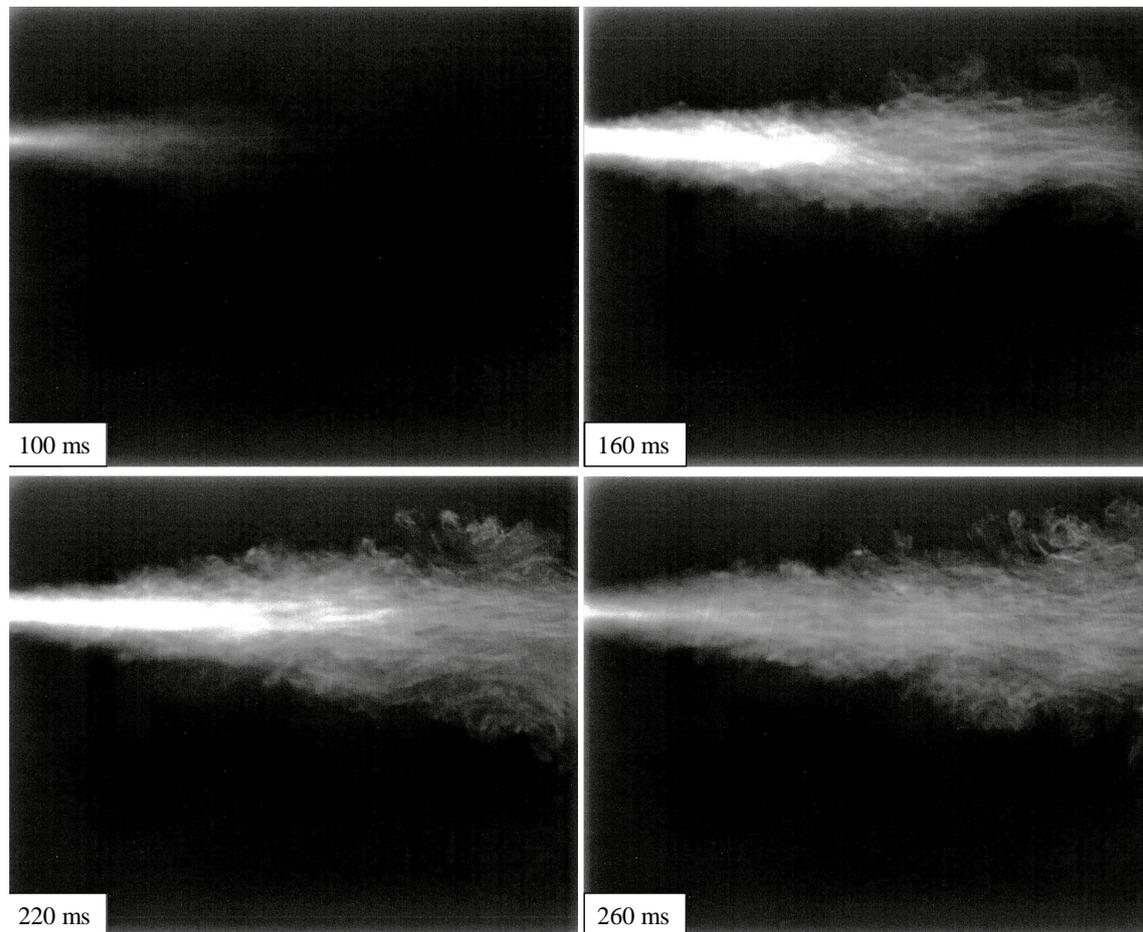


Abbildung 4.26: Bilderstrecke der Hochgeschwindigkeitskamera. Die Aufnahmen zeigen die Ausbreitung der Staubwolke zu den Zeitpunkten 100, 160, 220 und 260 ms.

Zum Zeitpunkt der Beendigung dieser Arbeit, war die numerische Simulation der Staubkammer noch nicht vollständig ausgereift. Es war möglich, einen Befüllvorgang der Staubkammer von wenigen Sekunden zu simulieren. Abbildung 4.27 gibt einen Überblick der aktuellen Modellierung, wobei das Staub/Luft-Gemisch unter Referenzbedingungen in das Staubkammerinnere strömt. Zur besseren Übersicht sind die Staubpartikel nach ihrer Verweilzeit im Kammerinneren eingefärbt. In Abbildung 4.28 wurde der Bildausschnitt der Visualisierung in der numerischen Simulation betrachtet. Auf der linken Seite ist die instantane Staubkonzentration dargestellt. Auf der rechten Seite ist die zeitlich gemittelte Staubkonzentration abgebildet.

<sup>3</sup> $p = 1,5 \text{ bar}$ ,  $n = 700 \text{ mm/h}$ ,  $N = 900 \text{ U/min}$

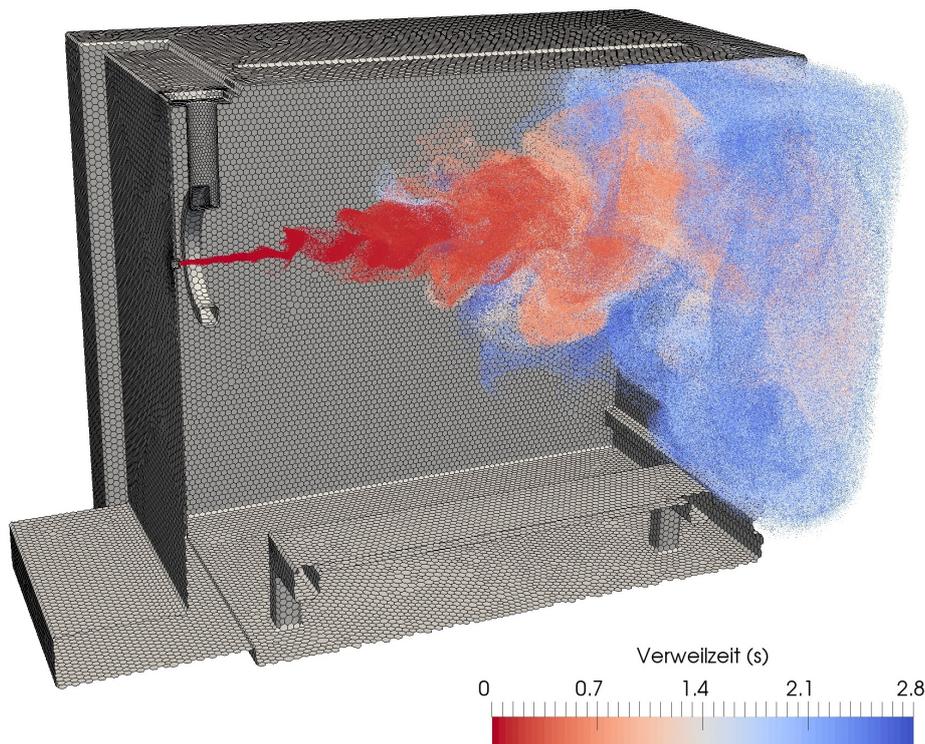


Abbildung 4.27: Ansicht der numerischen Simulation zur Modellierung von Konzentrationsverteilungen innerhalb der Staubkammer. Darstellung der Verweilzeit der einzelnen Partikel zu einem Zeitpunkt von  $t = 2,8$  s ab Start der Dosierung.

Die mittlere Staubkonzentration (rechts) stimmt gut mit der Visualisierung überein. Bei der Darstellung der instantanen Staubkonzentration (links) werden die Schwächen der Modellierung deutlich. Das Berechnungsgitter ist gerade im Einlassbereich des Staub/Luft-Gemisches zu grob, um die kleinskaligen Wirbel darstellen zu können. Die Wirbelstrukturen werden daher nicht korrekt dargestellt.

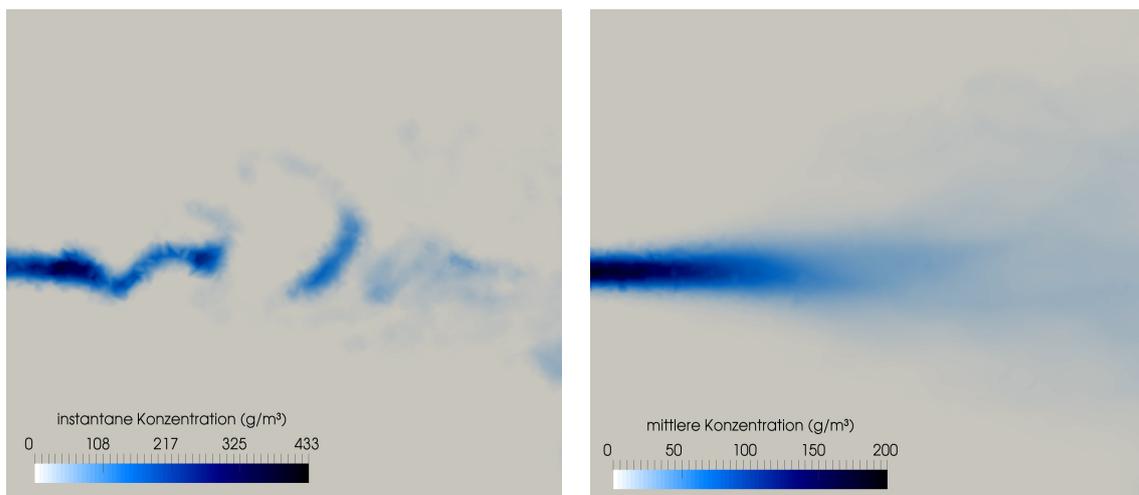


Abbildung 4.28: Darstellung der instantanen (links) und zeitlich gemittelten (rechts) Staubkonzentration nach  $t = 2,8$  s ab Start der Dosierung.

# Kapitel 5

## Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Erzeugung statistisch abgesicherter Messdaten unter definierten Randbedingungen. Die Anforderungen wurden erfüllt:

- Der statistische und der systematische Messfehler wurden identifiziert.
- Die Messunsicherheit wurde für jede Messposition der drei Datenreihen bestimmt.
- Die Reproduzierbarkeit wurde durch Wiederholungen der Messung verifiziert.
- Die theoretische Erwartung deckt sich mit dem Resultat der Parametervariation.

Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert und ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten gegeben.

### 5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Entwicklung und der Aufbau eines geeigneten Versuchsstandes konnten in dieser Arbeit erfolgreich umgesetzt werden. Die Auswertung der Messdaten ergab eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit von 11,2 % der Datenreihen *Referenz*, sodass die Anforderung an die Konzeptionierung erfüllt wurde.

Es wurden Konzentrationsmesswerte von 0,47 bis 27,0 g/m<sup>3</sup> in den Datenreihen *Referenz*, *Geschwindigkeit* und *Beladung* gemessen. Die untere Explosionsgrenze von getrockneter Maisstärke liegt bei 100 g/m<sup>3</sup>. Eine sichere Versuchsdurchführung war somit zu jedem Zeitpunkt gewährleistet. Die relative Messunsicherheit  $\sigma$  bezogen auf die mittlere Konzentration der Messwerte beträgt bei der niedrigsten Konzentration 9,5 %. Bei der höchsten Konzentration beträgt die relative Messunsicherheit 5,6 %.

Bei der Geschwindigkeitserfassung wurden Messwerte von 0,9 bis 13,9 m/s mit einer Turbulenz von ca. 30 % auf den Messebenen  $Y_0$  und  $Y_1$  erfasst. Die Messwerte auf der untersten Messebene  $Y_2$  befinden sich im Bereich  $\pm 0,1$  m/s mit einer Turbulenz von über 100 %. Die hohe Turbulenz resultiert aus dem messbereichsabhängigen systematischen Fehler, der sich auf die Schwankungsgröße und somit direkt auf die Turbulenz auswirkt.

Die Beobachtungen und Ergebnissen aus früheren Arbeiten konnten bereits zeigen, dass die Erstellung der Kalibrierkurven der SKGs fehlerbehaftet ist. Die Qualität der aufgenommenen Kalibrierpunkte ist stark anwender- und staubmaterialabhängig. Die Eigenschaft des Staubes, unter anderem sein Auflöseverhalten in Flüssigkeit und sein Sedimentationsverhalten, beeinflussen die Kalibrierung. Zusätzlich unterscheiden sich die Konzentrationsmessgeräte in ihren Eigenschaften. So können sich verschiedene Extinktionskoeffizienten für ein und denselben Staub je nach Messgerät ergeben. In dieser Arbeit wurde der gerätebedingte Messfehler durch mehrmalige Bestimmung der Kalibrierkurve an jedem der fünf Messgeräte ermittelt und ein statistischer Vertrauensbereich  $v_{c,\epsilon}$  berechnet. So konnte der statistische Anteil des Messfehlers, den die Kalibrierung auf die Berechnung des Staubkonzentrationsmesswertes ausübt, in der Messunsicherheit  $\sigma$  der Konzentrationsmessung berücksichtigt werden.

Kapitel 4 beschreibt die Erzeugung und Aufarbeitung der Messdaten der Konzentrations- und Geschwindigkeitsmessung. Anschließend erfolgte die Auswertung der erzeugten Messdaten. Es wurden insgesamt drei Datenreihen mit je fünf Datensätzen erzeugt. Ein Datensatz umfasst 15 Messpositionen. Somit ergeben sich insgesamt 225 durchgeführte Versuche. Im nachfolgenden sind die Resultate dieser Arbeit aufgelistet.

- a Ein systematischer Einfluss bei der Konzentrationsmessung wurde beobachtet. Die Beobachtung lässt darauf schließen, dass es sich um einen systematischen Fehler bei der Befüllung des Feststoffbehälters handelt. Bei den Konzentrationsmesswerten wurde für die Auswertung der Daten daher die erste und letzte Messposition verworfen, sodass die Annahme gilt:  $w = 0$ .
- b Die Auswertung der Geschwindigkeitsdaten ergab einen messbereichsabhängigen systematischen Messfehler  $w_f$ . Der Messfehler wirkt sich lediglich auf die Messwertaufnahme der Schwankungsgröße  $u_{\text{RMS}}$  aus.
- c Der Vertrauensbereich  $v$  der Messunsicherheit der Konzentrationsmessung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Zum einen dem Vertrauensbereich der Kalibrierung  $v_{c,\epsilon}$ , sowie dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$  der Messung selbst.
- d Der Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ , der aus der Messung resultiert liegt bis auf Messposition SKG 1 in derselben Größenordnung wie der Vertrauensbereich  $v_{c,\epsilon}$ , der aus der Erstellung der Kalibrierkurven entsteht.
- e Der Einfluss der Stopfdichte  $q$  sowie der absoluten Beladung  $x$  sind im Bereich der Strahlausbreitung bei SKG 1 bis 3 erkennbar. In diesem Bereich reagiert die Messdatenerfassung sensibel auf Schwankungen der Dosiereinstellungen.

- f Anhand einer Variation der Einlassgeschwindigkeit sowie der Partikelbeladung wurden drei verschiedene Befüllvorgänge untersucht.
- g Bei der Variation der Einlassgeschwindigkeit konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse mit den theoretischen Vorhersagen der Freistrahlausbildung übereinstimmen.
- h Die Messwerterfassung auf der Strahlachse bzw. im Strahlbereich reagiert sensibler auf eine Variation der Parameter. Die Messwerte in den Bereichen abseits der Strahlachse weichen von dem zu erwartenden Ergebnis ab.
- i Durch eine laseroptische Messmethode wurde eine Visualisierung des Staub/Luft-Gemisches im Einlassbereich der Staubkammer erreicht.
- j Ein Vergleich mit ersten Simulationsergebnissen zeigt bereits Ähnlichkeit zwischen numerische Vorhersage und experimenteller Beobachtung.

## 5.2 Ausblick

Die Aufnahme der Kalibrierpunkte bzw. die Erstellung der Kalibrierkurve der Staubkonzentrationsgeräte bedarf einer Verbesserung. Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass der Vertrauensbereich  $v_{c,\epsilon}$  der Kalibrierung ca. 50 % der Messunsicherheit  $\sigma$  in der Konzentrationsmessung beträgt. Der Messfehler der Kalibrierung beruht auf der Erstellung der Kalibrierpunkte in Ethanol. Die Untersuchung der vorhandenen Problematik bzw. deren Lösung wurde bereits in mehreren Arbeiten betrachtet [12, 23]. Bisher konnte keine geeignete Maßnahme ermittelt werden, daher muss auch in Zukunft weiter an der Problemstellung geforscht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass trotz einer geringen Schwankung der Stopfdichte  $q$  während der Versuchsdurchführung, ein Einfluss auf das Messergebnis der Konzentrationsmessung zu erkennen ist. Der Feststoffbehälter der Dosiereinheit RBG 1000 sollte zukünftig nach einer standardisierten Methode befüllt werden. Eine mögliche Befüllmethode ist die Entwicklung einer Stopfvorrichtung, die mit einer konstanten mechanischen Kraft die abgewogene Staubportion verdichtet. So erfolgt eine konstante Kompression des Staubes über die gesamte Füllhöhe des Behälters.

Die Visualisierung der Staubwolkenentwicklung zeigt gute Ergebnisse. Eine Verbesserung der Aufnahmequalität kann durch eine entsprechend intensivere Lichtquelle bzw. eine Erhöhung der Aufnahmesensitivität erzeugt werden.

Der nächste Schritt wird ein Vergleich der numerischen Simulation mit den experimentell erzeugten Daten sein. Dazu ist es nötig, die Dosierdauer der Simulation der Versuchsdurchführung anzugleichen. Eine Anpassung des Berechnungsgitters ist zu erwarten, da die ersten Simulationsergebnisse darauf hinweisen, dass gerade im Strahlbereich die Turbulenzzustände nicht ausreichend genau dargestellt werden können.

# Literaturverzeichnis

- [1] W. Bartknecht. *Explosionsschutz: Grundlagen und Anwendung*. Springer Verlag, 1993.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 3673 - Druckentlastung von Staubexplosionen*. 2002.
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 14491: Schutzsysteme zur Druckentlastung von Staubexplosionen*. Deutsche Norm, 2012.
- [4] T. Kasch. *Untersuchung zum Einfluss der Strömung auf Flammenausbreitungsvorgänge in Staub/Luft-Gemischen*. 2000.
- [5] W. Diewald. *Strömungsmechanik*. HS Mannheim, 2019.
- [6] S. B. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [7] D. Stubbe. *Drucksondenmessung in Strömungsfeldern*. Technische Universität Dresden, 2006.
- [8] F. Richter. *Wechselwirkung runder Düsenfreistrahlen mit ebenen Wänden*. Universität Rostock, 2006.
- [9] J. H. Ferziger. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Verlag, 2002.
- [10] S. Hickel. *Angewandte Strömungssimulation*. Universität Stuttgart, 2015.
- [11] W. Walcher. *Praktikum der Physik*. Teubner Studienbücher, 1979.
- [12] M. Niklisch. *Verbesserung des Staubkonzentrationsmessgerätes SKG 5*. Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe, 2005.
- [13] *Benutzerhandbuch Staubmessgerät SKG5*. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 2006.
- [14] J. Wiedemann. *Laser-Doppler-Anemometrie*. Springer Verlag, 1984.
- [15] M. Seithel. *Bedienungsanleitung Staubkonzentrationsmessgerät*. Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe, 2006.
- [16] D. Lorenz. *Persönliche Mitteilung*. Berufsgenossenschaft für Nahrungsmittel und Gastgewerbe, 2019.

- [17] A. Gadowski. *Messung von Fließgeschwindigkeiten mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie*. 2013.
- [18] V. Hartmann. *Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen in eingeschlossenen Diffusionsflammen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie*. Universität Stuttgart, 1983.
- [19] Palas GmbH. *Benutzerhandbuch Feststoffdosierer RGB 1000*. 2006.
- [20] Haug GmbH. *Elektrostatik entfernen*. <https://www.haug.de/index/static-line-ionisationsgeraete/ionisationsgeraet-ei-re.html>, 2019.
- [21] G. Fischer. *Qualitätsmanagement*. Europa-Lehrmittel, 2017.
- [22] M. Raffel. *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*. Springer Verlag Berlin, 2007.
- [23] I. Kukujzev. *Entwicklung einer neuen Kalibriermethode für das Staubkonzentrationsmessgerät SKG 5*. Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin, 2008.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Bildliche Darstellung des Gefahendreiecks. Grafik eigene Darstellung. . . . .	5
2.1	Schematische Darstellung des Explosionsbereiches und der unteren bzw. oberen Explosionsgrenzen. Dazwischen befindet sich die explosionsfähige Atmosphäre. . . . .	9
2.2	Definition des zeitlichen Druckanstieges einer Staubexplosion. Die Druckdifferenz $\Delta p$ beschreibt den maximal auftretenden Explosionsdruck $p_{\max}$ im Verhältnis zur Zeit $\Delta t$ . Grafik entnommen aus [1]. . . . .	9
2.3	Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung. Bei der laminaren Strömung lässt sich die Ausbildung eines gleichförmigen Strömungsprofils erkennen, die Strömungsschichten verlaufen parallel zueinander. Wohingegen sich bei der turbulenten Strömung eine starke Verwirbelung zeigt. Grafik entnommen aus [5]. . . . .	11
2.4	Der zeitliche Verlauf einer Geschwindigkeitskomponente $u(t)$ in einer turbulenten Strömung mit der mittleren Geschwindigkeit $\bar{u}$ , sowie deren Schwankungsgröße $u_{\text{RMS}}$ . Grafik entnommen aus [6]. . . . .	11
2.5	Ausbreitung eines Freistahls in die freie Umgebung aus einer Düse mit dem Durchmesser $d_0$ , der Maximalgeschwindigkeit $v_0$ und der Mittengeschwindigkeit $v_x$ . Der Kernbereich endet bei einem Abstand von $x_0$ . Grafik entnommen aus [7]. . . . .	12
2.6	Der Grad der Modellierung, dargestellt über den Rechenaufwand. Grafik entnommen aus [10]. . . . .	13
2.7	Überblick der verschiedenen Berechnungsmethoden. Die Darstellung einer stationären Rohrströmung (links) zeigt den Unterschied zwischen LES und DNS. Ein Geschwindigkeitsverlauf (rechts) vergleicht den Näherungsansatz der drei beschriebenen Modelle. Grafik entnommen aus [10]. . . . .	14
3.1	Schematisch dargestelltes Messprinzip der Staubkonzentrationsmessung. Durch Absorption und Lichtstreuung an den Staubpartikeln wird die Intensität des Lichtstrahls $I_0$ reduziert. Grafik entnommen aus [13]. . . . .	17
3.2	Das SKG der fünften Generation der FSA, bestehend aus Anzeigeeinheit (hinten) und optoelektronischer Messeinheit (vorne rechts). Grafik entnommen aus [12]. . . . .	18

3.3	Aufbauskizze eines SKG-Messkopfes. Grafik entnommen aus [13]. . . .	18
3.4	Vorrichtung zur Erfassung der Kalibrierkurve des SKG. Der Messkopf durchleuchtet ein mit Ethanol gefülltes Kalibriergefäß. Eine Rührplattform sorgt für eine ausreichende Durchmischung des Feststoffes in der Kalibrierflüssigkeit. . . . .	19
3.5	Kalibrierpunkte des SKG für Maisstärke. . . . .	20
3.6	Schematische Darstellung des Interferenzmusters am Messpunkt zweier Laserstrahlen der Wellenlänge $\lambda$ . Grafik entnommen aus [17]. . . . .	21
3.7	Prinzip der optischen Anordnung für Rückstremessungen mit dem Zweistrahl-Anemometer. Grafik entnommen aus [18]. . . . .	22
3.8	Messgerätschaften bestehend aus FlowLite (links, oben) und Flow Velocity Analyzer (links, unten) sowie der Messsonde FiberFlow (rechts). .	23
3.9	Das 3D-Modell des Messaufbaus zeigt alle Einbauten. Die Einbauten sind nummeriert und in der Legende beschrieben. . . . .	24
3.10	Staubkammer mit Dosierschlitten und Dosiereinheit RBG 1000 (links). Staubkammer geöffnet ohne Inneneinbauten (rechts). . . . .	25
3.11	Schematisch dargestelltes Funktionsprinzip des Partikeldosierers (links), Foto des RBG 1000 mit Beschreibung diverser Baugruppen (rechts). Grafik entnommen aus [19]. . . . .	26
4.1	Partikelgrößenverteilung von getrockneter Maisstärke mit Verteilungsdichte $q_3$ und Verteilungssumme $Q_3$ . . . . .	28
4.2	Probenehmer zur Aufnahme eines Partikelbildes zur visuellen Beurteilung der Agglomeratbildung innerhalb der Staubkammer. . . . .	29
4.3	Aufnahme mit dem Durchlicht-Mikroskop Axioplan 2 der Firma Zeiss bei 5 facher bzw. 10 facher Vergrößerung bei verschiedenen Aufnahmedauer $t_{\text{Probe}}$ . . . . .	30
4.4	Schematische Darstellung des Messgitters mit Blick in die Staubkammer. Die Messpunkte sind durch ein selbst festgelegtes Koordinatensystem $(X,Y)$ definiert. Die Kreuze symbolisieren die Messposition des LDA-Messkopfes. Dieser wird sukzessiv von der Position $Y_0X_0$ links oben bis auf Position $Y_2X_4$ bewegt. Im Hintergrund ist der Versuchsaufbau zu erkennen. . . . .	31
4.5	Anzeige der jeweiligen SKG-Messköpfe über die Dosierdauer $t_D$ . Nach dem Betreiben der Dosiereinheit für eine bestimmte Dosierzeit $t_D$ , wurde die Dosiereinheit abgeschaltet und die Sedimentation abgewartet. . . .	33
4.6	Plateauspannung $U_p$ , aufgetragen über die Anzahl der Dosierzyklen. Die korrespondierende Dosierdauer kann aus Tabelle 4.3 entnommen werden.	34
4.7	Schematische Darstellung des austretenden Staub/Luft-Gemisches in das Staubkammerinnere. Perspektive ist die Draufsicht von der Staubkammerdecke. . . . .	35

4.8	Messspannung $U_{\text{SKG}}$ (orange), verschmutzungsinduzierte Spannung $U_V$ (rot) und linear korrigierter Spannungsverlauf $U_{\text{Korr}}$ (schwarz). . . . .	36
4.9	Aufnahme des Messsignals $U_{\text{SKG}}$ über der Zeit $t$ . . . . .	37
4.10	Darstellung der korrigierten Messspannung $U_{\text{Korr}}$ . . . . .	37
4.11	Konzentrationsverlauf aus dem korrigierten Messspannungen $U_{\text{Korr}}$ nach Gleichung (4.3) berechneten Staubkonzentrationen. Die Mittelung der instantanen Konzentration $c_i$ über die Dosierzeit $t_D$ gibt den auszuwertenden Messwert $c$ wieder. . . . .	38
4.12	Häufigkeitsverteilung der Konzentrationsmesswerte (SKG 1). . . . .	39
4.13	Geschwindigkeitsmessung bei konstanter Geschwindigkeit $\omega = 2,0$ m/s bei verschiedenen Frequenzbereichen mit einer Stichprobenanzahl von $n = 5$ . . . . .	41
4.14	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert $\bar{c}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> an dem SKG-Messkopf 1. . . . .	44
4.15	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert $\bar{c}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> an dem SKG-Messkopf 4. . . . .	45
4.16	Darstellung der Temperatur $T$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte $c$ der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 1. . . . .	46
4.17	Darstellung der absoluten Beladung $x$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 1. . . . .	47
4.18	Darstellung der aufgenommenen Volumenströme $\dot{V}$ über den Vordruck $p$ in einer Volumenstrom-Druck-Kurve (rechts) und die dazugehörigen Messwerte. . . . .	52
4.19	Vergleich der mittleren Konzentrationsmesswerte $\bar{c}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Geschwindigkeit</i> . Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit $\sigma$ . . . . .	54
4.20	Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Geschwindigkeit</i> , dargestellt über die einzelnen Messpositionen. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit $\sigma$ . . . . .	55
4.21	Darstellung der mittleren Geschwindigkeitsmessdaten $\bar{u}$ über den Düsenabstand auf der Strahlachse. Zu sehen sind die Messpunkte $Y_0X_0$ bis $Y_0X_6$ der Datenreihe <i>Referenz</i> und der Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> , sowie die normierte Geschwindigkeit. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit $\sigma$ . . . . .	56
4.22	Vergleich der mittleren Konzentrationsmesswerte $\bar{c}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Beladung</i> . Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit $\sigma$ . . . . .	57
4.23	Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Beladung</i> , dargestellt über die einzelnen Messpositionen. Der Fehlerbalken entspricht der Messunsicherheit $\sigma$ . . . . .	58

4.24	Schematische Darstellung des laseroptischen Messaufbaus in einem Windkanal, entnommen aus [22]. . . . .	59
4.25	Messaufbau bestehend aus einem grünen Laser und der Powell-Linse. .	60
4.26	Bilderstrecke der Hochgeschwindigkeitskamera. Die Aufnahmen zeigen die Ausbreitung der Staubwolke zu den Zeitpunkten 100, 160, 220 und 260 ms. . . . .	61
4.27	Ansicht der numerischen Simulation zur Modellierung von Konzentrationsverteilungen innerhalb der Staubkammer. Darstellung der Verweilzeit der einzelnen Partikel zu einem Zeitpunkt von $t = 2,8$ s ab Start der Dosierung. . . . .	62
4.28	Darstellung der instantanen (links) und zeitlich gemittelten (rechts) Staubkonzentration nach $t = 2,8$ s ab Start der Dosierung. . . . .	62
A.1	Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus. Darstellung der Messpositionen der SKG-Messköpfe. Die Position des LDA-Messkopfes ist nicht stetig und dient in dieser Darstellung nur als Beispiel. . . . .	77
A.2	Verschiedene Ansichten des Versuchsaufbaus. . . . .	78
A.3	Darstellung der Messebene und der Strahlachse $Y_0$ . . . . .	79
B.1	Rasterelektronen Mikroskop Aufnahmen, 200 fache (links) und 500 fache Vergrößerung von Maisstärke. . . . .	80
B.2	Rasterelektronen Mikroskop Aufnahmen, 1000 fache Vergrößerung von Maisstärke. . . . .	80
C.1	Alle Messpositionen der fünf SKG-Messköpfe und des LDA-Messkopfes. Selbst gewähltes Koordinatensystem für das Messgitter. . . . .	81
F.1	Darstellung der statistische Verteilung der Konzentrationsmesswerte für die Datenreihe <i>Referenz</i> der Messköpfe 2, 3, 4 und 5. . . . .	95
I.1	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert $\bar{c}$ der Datenreihe <i>Referenz</i> an dem SKG-Messkopf 1. . . . .	105
I.2	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 2) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	105
I.3	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 3) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	106
I.4	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 4) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	106
I.5	Einfluss der Stopfdichte $q$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 5) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	107
J.1	Darstellung der Temperatur $T$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 2. . . . .	108

J.2	Darstellung der Temperatur $T$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 3. . . . .	109
J.3	Darstellung der Temperatur $T$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 4. . . . .	109
J.4	Darstellung der Temperatur $T$ in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> für den SKG-Messkopf 5. . . . .	110
K.1	Einfluss der absoluten Wasserbeladung $x$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 2) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	111
K.2	Einfluss der absoluten Wasserbeladung $x$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 3) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	112
K.3	Einfluss der absoluten Wasserbeladung $x$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 4) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	112
K.4	Einfluss der absoluten Wasserbeladung $x$ auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 5) der Datenreihe <i>Referenz</i> . . . . .	113

# Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der mittleren Extinktionskoeffizienten $\bar{\epsilon}$ der fünf SKG-Messgeräte mit $n = 5$ , dem Vertrauensbereich $v_{\epsilon}$ , sowie der Abweichung $v_{\epsilon}/\bar{\epsilon}$ . . . . .	21
4.1	Daten der Temperatur- und relative Feuchtemessung im Versuchslabor. Zu jedem durchgeführten Versuch wird ein Temperatur-Luftfeuchtepaar aufgezeichnet. . . . .	28
4.2	Versuchsprogramm mit den Datenreihen <i>Referenz</i> , <i>Geschwindigkeit</i> und <i>Beladung</i> . Eine Datenreihe umfasst fünf Datensätze. . . . .	30
4.3	Dosierdauer $t_D$ und kumulative Dosierdauer $t_{D,k}$ . . . . .	34
4.4	Übersicht der relevanten Messbereiche der Geschwindigkeitsmessung. . . . .	40
4.5	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Standardabweichung $s$ und der Vertrauensbereich $v_{\text{Ref},n}$ . Für jeden Datensatz der Datenreihe <i>Referenz</i> wurde ein Stichprobenumfang von $n = 13$ ausgewertet. . . . .	43
4.6	Mittelwerte, Standardabweichung und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe <i>Referenz</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ . . . . .	43
4.7	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Referenz</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 65$ ausgewertet. . . . .	48
4.8	Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Geschwindigkeit</i> an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Köpfe. . . . .	48
4.9	Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Referenz</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	49
4.10	Mittelwerte der Schwankungsgröße $\bar{u}_{\text{RMS}}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Messung}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Referenz</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	50

4.11	Übersicht der Volumenströme $\dot{V}$ , der Massenströme $\dot{m}$ und der Massenkonzentration $c_m$ der jeweiligen Datenreihen an der Staubaustrittsdüse.	52
4.12	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Referenz</i> mit einem Stichprobenumfang $n = 65$ ausgewertet. . . .	53
4.13	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> mit $n = 65$ ausgewertet. . . . .	53
4.14	Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Geschwindigkeit</i> an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Messköpfe. . . . .	54
4.15	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Messunsicherheit $\sigma$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Beladung</i> mit $n = 65$ ausgewertet. . . . .	57
4.16	Vergleich der mittleren Staubkonzentrationsmesswerte der Datenreihe <i>Referenz</i> und <i>Beladung</i> an den jeweiligen Messpositionen der SKG-Messköpfe. . . . .	58
D.1	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Referenz</i> 1. . . . .	82
D.2	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Referenz</i> 2. . . . .	83
D.3	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Referenz</i> 3. . . . .	83
D.4	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Referenz</i> 4. . . . .	84
D.5	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Referenz</i> 5. . . . .	84
D.6	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Geschwindigkeit</i> 1. . . . .	85
D.7	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Geschwindigkeit</i> 2. . . . .	85
D.8	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Geschwindigkeit</i> 3. . . . .	86
D.9	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Geschwindigkeit</i> 4. . . . .	86
D.10	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Geschwindigkeit</i> 5. . . . .	87
D.11	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Beladung</i> 1. . . . .	87

D.12	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Beladung 2</i> . . . . .	88
D.13	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Beladung 3</i> . . . . .	88
D.14	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Beladung 4</i> . . . . .	89
D.15	Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes <i>Beladung 5</i> . . . . .	89
E.1	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Referenz 1</i> und <i>Referenz 2</i> . . . . .	90
E.2	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Referenz 3</i> und <i>Referenz 4</i> . . . . .	91
E.3	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ des Datensatzes <i>Referenz 5</i> . . . . .	91
E.4	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Geschwindigkeit 1</i> und <i>Geschwindigkeit 2</i> . . . . .	92
E.5	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Geschwindigkeit 3</i> und <i>Geschwindigkeit 4</i> . . . . .	92
E.6	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ des Datensatzes <i>Geschwindigkeit 5</i> . . . . .	93
E.7	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Beladung 1</i> und <i>Beladung 2</i> . . . . .	93
E.8	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ der Datensätze <i>Beladung 3</i> und <i>Beladung 4</i> . . . . .	94
E.9	Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ , $u_{\text{RMS}}$ und die daraus resultierende Turbulenz $T$ des Datensatzes <i>Beladung 5</i> . . . . .	94
G.1	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch}}$ . Hierbei wurde für jeden Datensatz der Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> Stichprobenumfang von $n = 13$ ausgewertet. . . . .	97
G.2	Mittelwerte, Standardabweichung, der Vertrauensbereich und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit. . . . .	97
G.3	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> mit einem Stichprobenumfang $n = 65$ ausgewertet. . . . .	97

G.4	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Bela}}$ . Hierbei wurde für jeden Datensatz der Datenreihe <i>Beladung</i> Stichprobenumfang von $n = 13$ ausgewertet. . . . .	98
G.5	Mittelwerte, Standardabweichung, Vertrauensbereich und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe <i>Beladung</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit. . . . .	98
G.6	Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Beladung</i> mit einem Stichprobenumfang $n = 65$ ausgewertet. . . . .	99
H.1	Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	100
H.2	Mittelwerte der Schwankungsgröße $\bar{u}_{\text{RMS}}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Geschwindigkeit</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	101
H.3	Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte $\bar{u}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Messung}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Beladung</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	102
H.4	Mittelwerte der Schwankungsgröße $\bar{u}_{\text{RMS}}$ aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung $s$ und dem Vertrauensbereich $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe <i>Beladung</i> mit einem Stichprobenumfang von $n = 5$ ausgewertet. . . . .	103
I.1	Stopfdichte $q$ der einzelnen Datensätze der Datenreihen <i>Referenz</i> , <i>Geschwindigkeit</i> und <i>Beladung</i> . Aus den Messdaten wurde der Mittelwert $\bar{q}$ , die Standardabweichung $s$ , die Messunsicherheit $\sigma$ sowie die prozentuale Abweichung $\sigma/\bar{q}$ berechnet. . . . .	104

# Anhang A

## Technische Zeichnung

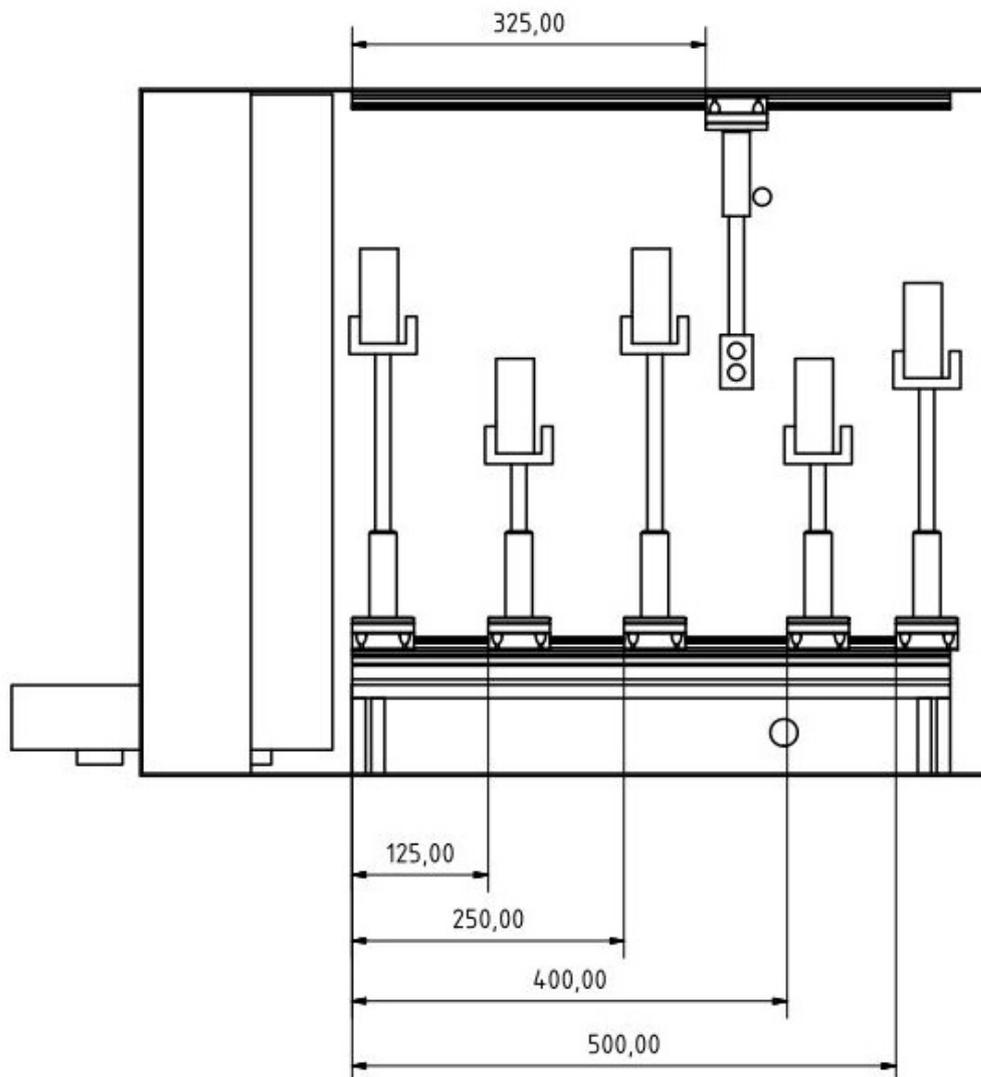


Abbildung A.1: Technische Zeichnung des Versuchsaufbaus. Darstellung der Messpositionen der SKG-Messköpfe. Die Position des LDA-Messkopfes ist nicht stetig und dient in dieser Darstellung nur als Beispiel.



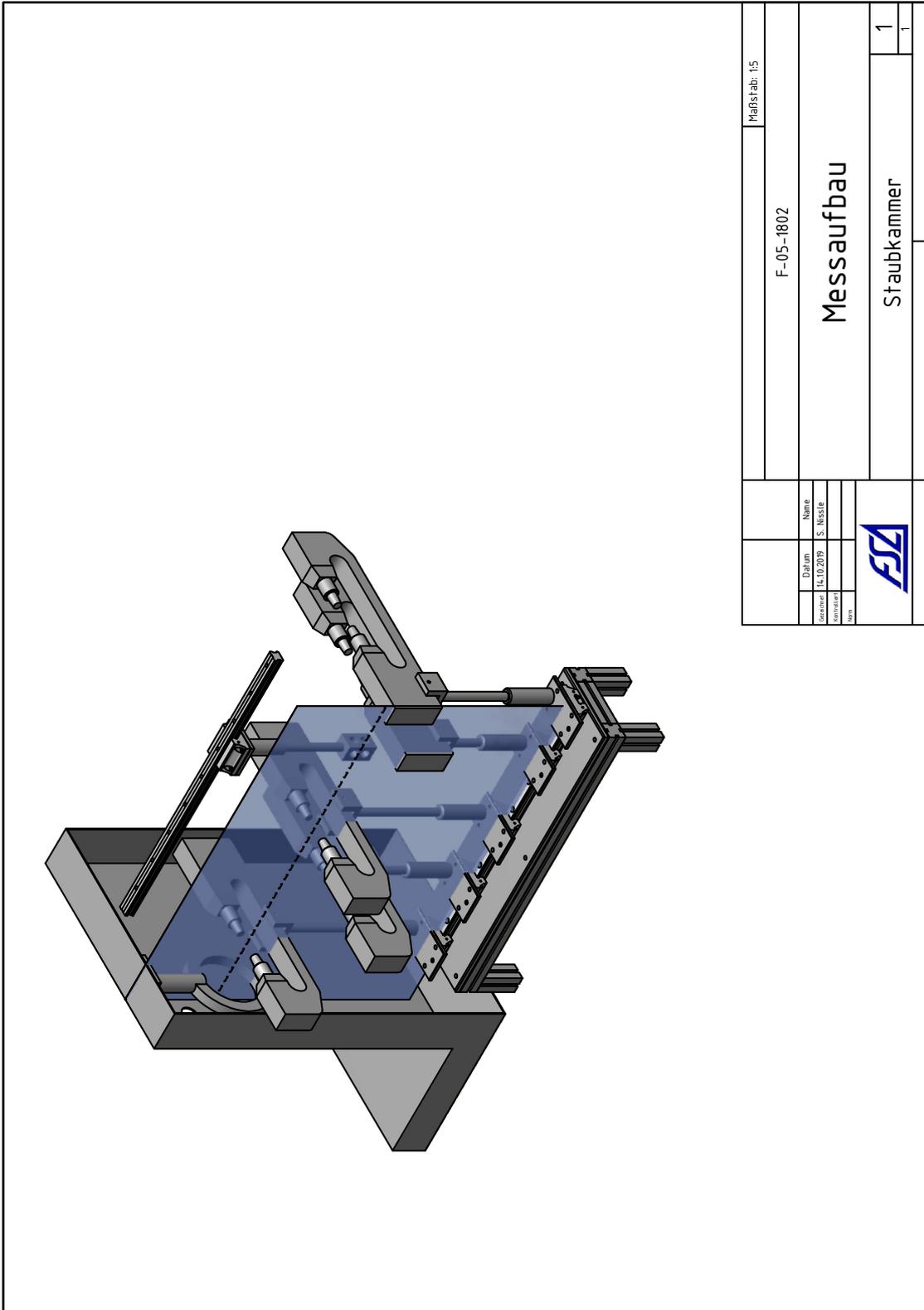


Abbildung A.3: Darstellung der Messebene und der Strahlachse  $Y_0$ .

# Anhang B

## REM Aufnahme Maisstärke

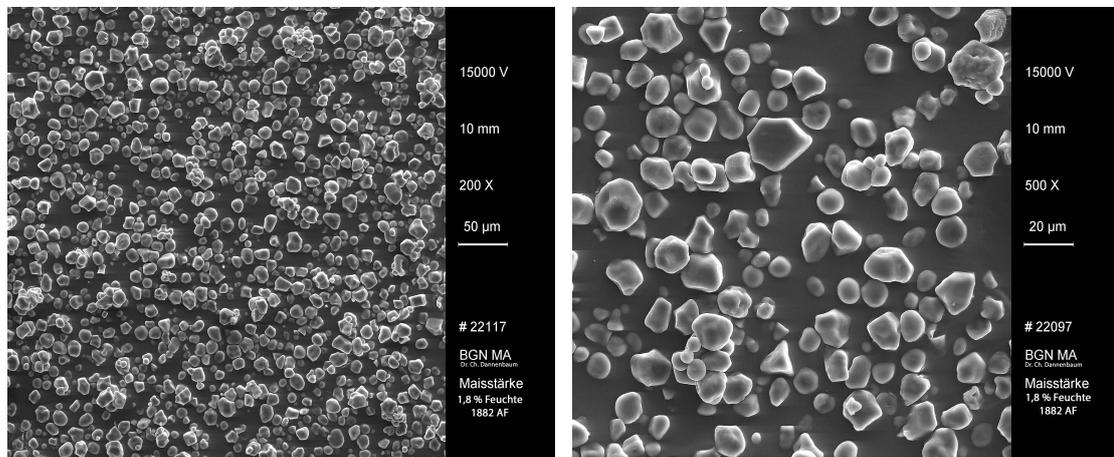


Abbildung B.1: Rasterelektronen Mikroskop Aufnahmen, 200 fache (links) und 500 fache Vergrößerung von Maisstärke.

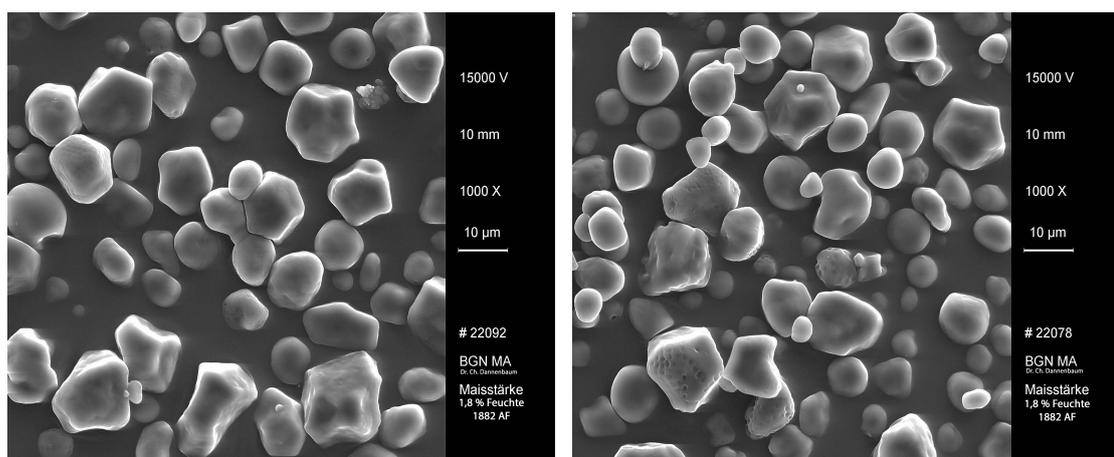


Abbildung B.2: Rasterelektronen Mikroskop Aufnahmen, 1000 fache Vergrößerung von Maisstärke.

# Anhang C

## Messgitter

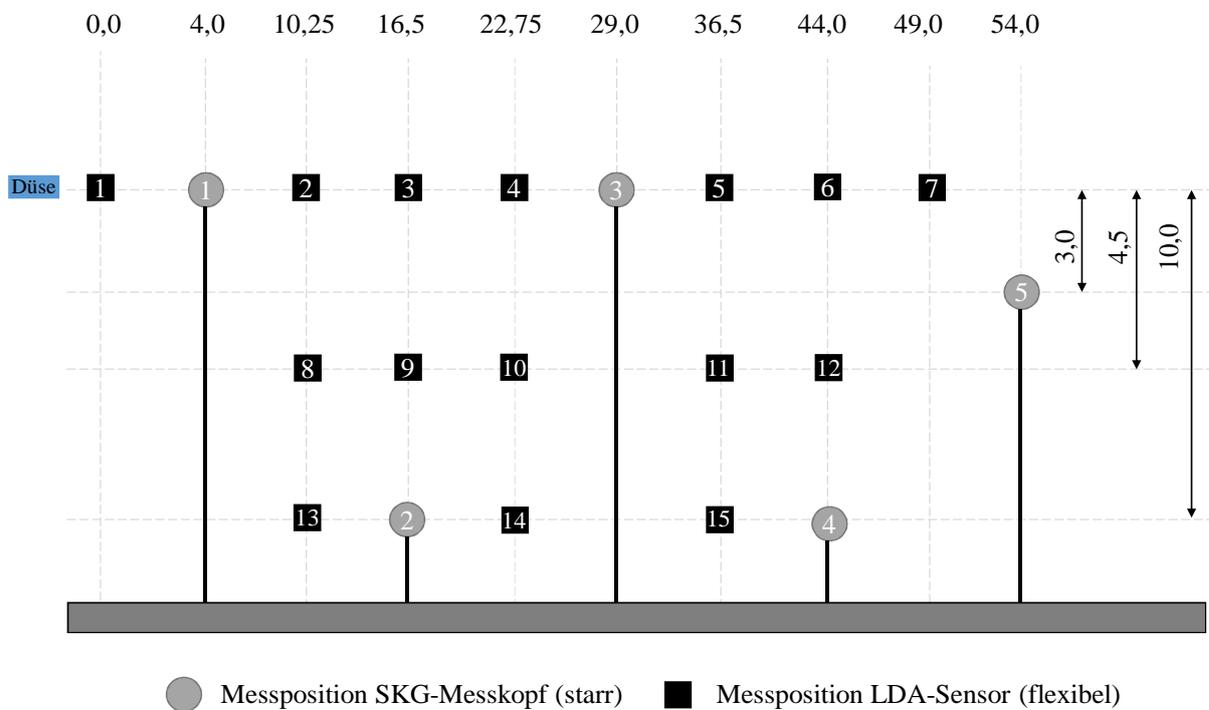


Abbildung C.1: Alle Messpositionen der fünf SKG-Messköpfe und des LDA-Messkopfes. Selbst gewähltes Koordinatensystem für das Messgitter.

# Anhang D

## Staubkonzentrationsmesswerte

### D.1 Referenz

Referenz 1							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	23,61	1,67	11,79	2,22	2,97	26,2	56,4
Y0X1	25,19	1,49	11,97	2,11	2,83	26,2	56,0
Y0X2	25,58	1,56	11,87	2,13	2,78	26,3	55,6
Y0X3	25,98	1,83	12,65	2,20	2,94	26,4	55,2
Y0X4	25,30	1,63	12,71	1,96	2,65	26,5	55,4
Y0X5	25,42	1,56	12,80	2,24	2,79	26,6	55,1
Y0X6	25,02	1,57	12,83	2,23	2,66	26,7	54,9
Y1X1	24,24	1,45	13,10	2,09	2,70	26,8	54,6
Y1X2	25,42	1,43	10,62	1,87	2,66	26,9	54,6
Y1X3	23,68	1,42	10,91	2,02	2,48	26,9	54,4
Y1X4	24,86	1,64	10,94	1,99	2,73	27,0	54,3
Y1X5	25,09	1,45	11,64	1,96	2,61	27,1	54,0
Y2X1	24,15	1,56	12,01	2,14	2,77	27,1	53,7
Y2X3	25,64	1,53	10,87	2,06	2,93	27,2	53,0
Y2X4	22,44	1,25	10,88	1,72	2,40	27,3	52,9

Tabelle D.1: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Referenz* 1.

Referenz 2							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	12,68	1,27	7,26	1,22	2,28	26,7	43,3
Y0X1	19,94	1,47	10,52	1,62	3,07	26,7	45,8
Y0X2	21,04	1,62	10,88	2,00	3,08	26,9	45,4
Y0X3	19,51	1,82	10,43	1,84	2,92	27,0	45,1
Y0X4	19,42	1,52	10,61	1,68	2,94	27,1	45,0
Y0X5	23,20	1,51	11,18	1,91	2,97	27,1	44,6
Y0X6	20,14	1,52	11,93	1,90	3,05	27,2	44,4
Y1X1	18,63	1,50	10,65	1,85	3,09	27,2	44,3
Y1X2	19,93	1,65	10,92	1,89	3,21	26,9	44,0
Y1X3	19,43	1,62	10,43	1,88	3,05	27,1	44,2
Y1X4	18,34	1,36	10,83	1,87	2,95	27,2	44,2
Y1X5	16,80	1,43	9,14	1,36	2,58	27,3	43,9
Y2X1	17,60	1,55	9,42	1,68	2,84	27,3	43,8
Y2X3	17,76	1,33	9,70	1,67	2,85	27,5	43,2
Y2X4	15,37	1,32	8,28	1,38	2,67	27,5	43,2

Tabelle D.2: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Referenz 2*.

Referenz 3							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	9,16	1,00	4,10	1,18	1,64	24,4	53,4
Y0X1	22,97	1,70	10,78	1,87	2,44	24,1	54,3
Y0X2	25,95	1,77	10,46	2,00	2,53	24,1	53,9
Y0X3	23,87	1,46	11,80	1,90	2,53	24,1	53,8
Y0X4	27,00	1,61	11,59	1,82	2,67	24,2	53,6
Y0X5	23,34	1,52	11,36	1,93	2,48	24,5	53,1
Y0X6	22,30	1,43	10,50	1,95	2,63	25,0	51,9
Y1X1	24,13	1,53	10,51	2,10	2,69	25,4	50,8
Y1X2	25,83	1,55	11,84	2,07	2,84	25,6	50,3
Y1X3	24,59	1,53	12,00	2,01	2,57	25,7	50,1
Y1X4	23,08	1,44	11,17	1,91	2,62	25,8	50,1
Y1X5	22,68	1,15	9,78	1,58	2,14	25,8	50,1
Y2X1	23,99	1,42	11,42	2,14	2,74	26,1	49,7
Y2X3	24,63	1,62	11,06	1,87	2,53	26,1	49,6
Y2X4	22,86	1,47	9,89	1,92	2,45	26,1	49,4

Tabelle D.3: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Referenz 3*.

Referenz 4							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	15,86	1,12	7,72	2,01	2,86	23,9	50,1
Y0X1	19,99	1,17	11,10	2,51	3,45	24,2	49,4
Y0X2	19,89	1,39	11,77	1,85	3,39	24,1	43,7
Y0X3	21,29	1,31	11,99	2,25	3,37	24,2	43,7
Y0X4	21,54	1,34	12,30	2,20	3,39	24,2	43,6
Y0X5	22,65	1,68	11,90	2,21	3,62	24,3	43,5
Y0X6	20,29	1,45	11,14	1,96	3,10	24,4	43,3
Y1X1	21,37	1,10	11,77	2,15	3,34	24,5	43,1
Y1X2	19,00	1,24	11,57	2,39	3,21	24,5	43,0
Y1X3	17,95	1,23	12,00	1,90	3,36	24,6	42,8
Y1X4	18,39	1,08	11,01	2,26	3,41	24,6	42,8
Y1X5	19,46	1,39	11,29	2,23	3,71	24,7	42,8
Y2X1	20,58	1,54	12,05	2,22	3,54	24,8	42,8
Y2X3	19,44	1,29	11,06	2,14	3,31	24,8	42,8
Y2X4	18,81	1,10	11,74	2,01	3,39	24,9	42,8

Tabelle D.4: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Referenz 4*.

Referenz 5							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	19,75	1,30	10,57	2,18	3,33	24,7	41,2
Y0X1	19,71	1,40	9,76	2,06	3,13	24,7	41,1
Y0X2	17,48	1,29	11,05	2,45	3,32	24,8	41,0
Y0X3	16,80	1,38	9,94	2,13	3,26	24,9	41,1
Y0X4	18,23	1,38	10,95	2,41	3,27	24,8	41,2
Y0X5	17,50	1,33	9,80	2,17	3,20	25,0	41,1
Y0X6	17,45	1,21	8,61	1,90	2,96	25,0	41,1
Y1X1	18,91	1,71	12,22	1,96	3,60	25,3	41,0
Y1X2	18,57	1,08	11,04	2,01	3,19	25,1	40,4
Y1X3	18,50	1,39	11,81	2,38	3,48	25,0	40,7
Y1X4	19,14	1,41	11,24	2,13	3,49	25,0	41,0
Y1X5	17,82	1,21	9,28	1,84	3,40	24,9	41,5
Y2X1	19,85	1,48	12,31	2,28	3,52	25,4	41,9
Y2X3	20,55	1,33	11,82	2,18	3,63	25,5	41,7
Y2X4	18,91	1,30	11,24	2,31	3,41	25,6	41,7

Tabelle D.5: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Referenz 5*.

## D.2 Geschwindigkeit

Geschwindigkeit 1							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	10,84	1,12	6,15	1,39	1,97	24,8	70,0
Y0X1	10,76	1,19	6,38	0,96	1,97	25,1	68,4
Y0X2	10,27	1,18	6,43	1,37	2,10	25,4	63,9
Y0X3	10,70	1,27	6,06	1,00	2,31	25,6	64,6
Y0X4	10,64	1,29	5,55	2,24	2,27	25,8	64,3
Y0X5	10,54	1,33	6,58	1,28	2,25	25,9	64,0
Y0X6	10,40	1,33	6,50	1,34	2,15	25,9	63,7
Y1X1	10,21	1,27	6,61	2,22	2,50	25,8	59,9
Y1X2	12,01	1,14	6,36	1,57	2,22	26,0	59,2
Y1X3	11,75	1,16	6,27	2,83	2,35	26,1	59,0
Y1X4	11,45	1,66	8,12	2,27	2,55	26,3	58,9
Y1X5	10,65	1,49	6,84	1,55	2,58	26,4	58,9
Y2X1	11,03	1,46	7,64	1,51	2,47	26,0	58,6
Y2X3	13,02	1,33	6,64	1,57	2,14	26,2	58,1
Y2X4	13,34	1,39	6,73	1,40	2,01	26,3	58,4

Tabelle D.6: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Geschwindigkeit 1*.

Geschwindigkeit 2							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	5,51	1,01	3,17	1,41	1,96	25,2	58,1
Y0X1	10,41	1,11	6,12	1,78	2,36	25,2	57,5
Y0X2	12,53	1,28	7,29	1,73	2,27	25,2	57,1
Y0X3	13,27	1,33	8,14	1,78	2,33	25,3	57,0
Y0X4	12,25	1,12	8,02	1,62	2,34	25,4	56,1
Y0X5	11,74	1,41	7,01	1,41	2,42	25,5	56,2
Y0X6	12,89	1,29	6,63	1,35	2,44	25,5	56,5
Y1X1	13,69	1,40	8,01	2,05	2,63	25,6	55,7
Y1X2	12,72	1,25	6,32	1,25	2,32	25,7	55,6
Y1X3	13,13	1,38	8,34	2,09	2,59	25,7	55,7
Y1X4	13,90	1,30	8,39	1,92	2,37	25,7	55,9
Y1X5	11,26	1,53	7,02	1,33	2,48	25,7	55,8
Y2X1	11,26	1,40	7,77	1,79	2,66	25,6	54,7
Y2X3	11,01	1,31	7,62	1,59	2,23	25,7	53,9
Y2X4	11,06	1,26	7,30	1,28	2,30	25,6	53,9

Tabelle D.7: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Geschwindigkeit 2*.

Geschwindigkeit 3							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	10,40	1,21	4,79	1,68	2,31	24,4	61,9
Y0X1	11,25	1,34	6,88	1,77	2,34	24,6	61,4
Y0X2	11,82	1,12	7,71	1,95	2,33	24,7	61,0
Y0X3	11,74	1,46	7,80	1,58	2,31	24,8	60,7
Y0X4	10,86	1,28	6,87	1,82	2,44	24,8	60,3
Y0X5	10,88	1,27	8,05	1,97	2,49	24,7	60,4
Y0X6	11,22	1,24	8,03	1,69	2,32	24,6	60,6
Y1X1	11,55	1,30	7,47	1,77	2,39	24,6	60,8
Y1X2	13,09	1,50	7,65	1,42	2,26	24,7	60,4
Y1X3	12,18	1,40	6,51	1,51	2,31	24,8	60,1
Y1X4	12,03	1,36	8,14	1,74	2,55	24,8	59,8
Y1X5	11,38	1,16	8,82	1,40	2,39	24,9	59,3
Y2X1	11,78	1,54	8,45	1,53	2,54	24,9	59,0
Y2X3	11,53	1,16	7,30	1,53	2,16	25,0	58,8
Y2X4	11,35	1,39	8,16	1,44	2,36	25,0	58,1

Tabelle D.8: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Geschwindigkeit 3*.

Geschwindigkeit 4							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	9,99	1,36	6,66	1,15	2,26	25,2	55,6
Y0X1	9,86	1,18	6,00	1,00	1,96	25,1	55,4
Y0X2	12,75	1,27	9,14	1,07	2,15	25,1	55,2
Y0X3	11,52	1,34	8,94	1,01	2,20	25,0	55,1
Y0X4	11,22	1,17	8,83	1,64	2,32	25,1	54,8
Y0X5	11,33	1,28	9,28	1,58	2,23	25,2	55,0
Y0X6	11,72	1,21	7,84	1,62	2,24	25,2	55,1
Y1X1	11,14	1,40	9,09	1,69	2,52	25,3	54,9
Y1X2	11,56	1,06	7,62	1,83	2,33	25,4	54,8
Y1X3	10,54	1,18	8,41	1,77	2,38	25,3	54,7
Y1X4	10,60	1,41	7,46	1,47	2,32	25,3	54,1
Y1X5	12,00	1,51	7,40	1,15	2,48	25,4	53,5
Y2X1	11,80	1,35	7,84	1,36	2,43	25,6	52,9
Y2X3	11,87	1,13	7,74	1,51	2,27	25,6	53,1
Y2X4	12,52	0,98	7,72	1,33	2,34	25,6	53,2

Tabelle D.9: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Geschwindigkeit 4*.

Geschwindigkeit 5							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	11,57	1,30	7,71	1,45	2,45	24,2	56,1
Y0X1	11,72	1,16	8,60	2,06	2,40	24,4	55,5
Y0X2	15,37	1,50	8,83	1,42	2,28	24,5	55,6
Y0X3	13,18	1,34	7,94	1,92	2,46	24,6	55,3
Y0X4	12,81	1,36	7,82	1,39	2,26	24,8	55,0
Y0X5	13,74	1,09	8,58	1,82	2,34	24,8	54,6
Y0X6	13,96	1,13	8,88	1,68	2,32	24,9	53,8
Y1X1	13,05	1,36	11,16	1,59	2,55	25,3	52,6
Y1X2	11,95	1,10	8,09	1,54	2,34	25,4	52,2
Y1X3	13,69	1,34	8,98	1,39	2,10	25,4	51,8
Y1X4	13,67	1,24	7,42	1,49	2,27	25,5	51,6
Y1X5	14,69	1,14	8,24	1,58	2,57	25,6	51,6
Y2X1	12,58	1,42	10,00	1,64	2,51	25,8	51,3
Y2X3	12,15	1,10	8,47	1,53	2,32	25,8	51,4
Y2X4	11,49	1,15	7,37	1,69	2,38	25,9	51,2

Tabelle D.10: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Geschwindigkeit 5*.

### D.3 Beladung

Beladung 1							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	8,65	0,61	4,70	1,17	1,87	24,0	53,7
Y0X1	13,03	0,62	5,76	1,48	2,00	24,2	53,2
Y0X2	13,95	0,55	6,72	1,39	2,17	24,4	53,1
Y0X3	13,23	0,94	6,51	1,41	2,28	24,7	52,4
Y0X4	12,88	0,83	6,51	1,50	2,27	24,8	52,2
Y0X5	13,00	0,65	6,63	1,24	2,03	24,8	52,0
Y0X6	13,14	0,83	6,24	1,05	2,01	24,9	51,6
Y1X1	11,99	0,67	5,97	1,32	1,99	25,1	51,3
Y1X2	12,05	0,80	6,08	1,22	2,09	25,2	51,2
Y1X3	12,49	0,88	6,15	1,30	2,05	25,3	51,1
Y1X4	12,16	0,79	6,31	1,30	2,18	25,3	50,5
Y1X5	13,00	1,04	6,46	1,13	2,16	25,4	50,6
Y2X1	12,17	0,95	6,24	1,64	2,14	25,5	50,4
Y2X3	11,95	0,85	6,02	1,41	2,16	25,6	50,5
Y2X4	13,74	0,64	6,42	1,57	2,09	25,6	50,0

Tabelle D.11: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Beladung 1*.

Beladung 2							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	9,91	1,00	6,06	1,18	2,22	25,5	47,3
Y0X1	9,74	0,69	5,88	1,17	1,82	25,3	47,2
Y0X2	9,65	0,59	6,10	1,28	1,99	25,3	47,9
Y0X3	9,92	0,68	6,63	1,33	1,85	25,2	48,0
Y0X4	10,78	0,71	6,24	1,10	1,88	25,2	48,4
Y0X5	10,05	0,73	6,73	0,90	1,85	25,2	48,2
Y0X6	10,13	0,82	6,26	1,25	1,96	25,1	48,2
Y1X1	10,05	0,85	5,39	1,67	2,21	25,3	48,7
Y1X2	9,57	0,73	5,32	1,21	1,87	25,4	48,8
Y1X3	10,19	0,77	5,57	1,11	1,92	25,5	48,8
Y1X4	9,68	0,74	5,97	0,96	1,84	25,6	48,8
Y1X5	9,76	0,89	5,81	0,96	2,04	25,6	48,8
Y2X1	9,69	0,72	5,74	1,53	1,81	25,7	48,8
Y2X3	10,24	0,83	5,77	1,47	1,82	25,8	48,9
Y2X4	9,61	0,47	6,30	1,11	1,87	25,8	48,7

Tabelle D.12: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Beladung 2*.

Beladung 3							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	10,02	0,75	5,81	1,32	1,97	26,1	48,2
Y0X1	10,57	0,76	6,34	1,10	1,96	26,1	48,3
Y0X2	10,52	0,68	6,12	1,21	1,78	26,2	48,4
Y0X3	9,88	0,51	6,44	1,34	1,88	26,3	48,3
Y0X4	10,55	0,79	5,43	1,14	1,73	26,3	48,2
Y0X5	10,26	0,84	5,44	1,25	1,85	26,4	48,2
Y0X6	10,10	0,78	4,86	1,30	1,80	26,4	48,1
Y1X1	10,89	1,09	5,38	0,83	2,04	26,4	44,0
Y1X2	10,61	0,73	6,06	1,13	1,88	26,3	42,1
Y1X3	9,53	0,66	5,94	1,28	1,89	26,3	41,3
Y1X4	9,45	0,77	5,79	1,10	1,95	26,4	40,7
Y1X5	9,70	0,75	5,89	1,03	2,00	26,4	40,7
Y2X1	9,96	0,64	6,44	1,24	1,91	26,4	40,0
Y2X3	10,21	0,61	5,77	1,18	1,83	26,4	39,0
Y2X4	9,77	0,81	5,25	0,96	1,86	26,4	38,1

Tabelle D.13: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Beladung 3*.

Beladung 4							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	10,13	0,90	4,97	1,08	2,09	23,3	51,0
Y0X1	10,11	0,75	4,94	1,78	2,16	23,4	50,6
Y0X2	10,36	1,03	5,84	1,74	2,13	23,6	50,2
Y0X3	10,19	0,65	5,47	1,10	2,00	23,7	49,9
Y0X4	10,39	1,03	5,52	1,22	2,06	23,9	49,5
Y0X5	10,11	0,81	6,03	1,33	2,02	23,9	49,1
Y0X6	10,05	0,88	5,93	1,35	2,05	24,0	48,8
Y1X1	9,75	0,61	5,85	1,68	2,04	24,2	48,3
Y1X2	11,04	0,97	6,92	1,43	2,00	24,3	47,9
Y1X3	10,57	0,84	6,22	1,40	1,92	24,4	47,8
Y1X4	10,15	0,73	6,87	1,18	2,12	24,4	47,7
Y1X5	11,00	0,87	6,72	1,41	2,10	24,5	47,5
Y2X1	10,73	0,80	7,03	1,60	2,22	24,6	46,7
Y2X3	10,72	0,78	5,83	1,42	2,07	24,7	46,6
Y2X4	10,08	0,67	5,77	1,40	1,73	24,7	46,5

Tabelle D.14: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Beladung 4*.

Beladung 5							
c [g/m <sup>3</sup> ]	SKG 1	SKG 2	SKG 3	SKG 4	SKG 5	T [°C]	r.F. [%]
Y0X0	11,13	0,83	6,88	0,88	1,99	23,5	38,6
Y0X1	10,43	0,69	5,67	1,24	1,87	23,6	38,6
Y0X2	10,69	0,72	5,76	0,83	1,94	23,4	38,4
Y0X3	10,37	0,57	5,65	0,76	1,80	23,5	37,8
Y0X4	9,99	0,66	5,19	1,19	1,92	23,6	37,8
Y0X5	10,47	0,82	5,88	0,89	1,93	23,5	37,7
Y0X6	9,75	0,56	5,09	1,43	1,99	23,4	36,2
Y1X1	10,12	0,63	6,60	1,02	1,96	23,8	39,5
Y1X2	10,76	0,50	5,88	1,27	1,80	23,8	39,8
Y1X3	10,40	0,86	5,37	1,05	1,85	23,7	39,9
Y1X4	10,41	0,84	6,22	1,05	1,87	23,6	38,6
Y1X5	9,56	0,51	5,84	1,03	2,02	23,5	38,8
Y2X1	10,63	0,86	5,55	1,57	2,02	23,7	39,3
Y2X3	10,93	0,68	5,76	1,26	1,76	23,7	39,3
Y2X4	10,63	0,86	5,28	1,06	1,78	23,7	39,3

Tabelle D.15: Staubkonzentrationsmittelwerte der einzelnen Messpositionen aller SKG-Messköpfe des Datensatzes *Beladung 5*.

# Anhang E

## Geschwindigkeitsmesswerte

### E.1 Referenz

	Referenz 1			Referenz 2		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	5,507	1,763	32	5,508	1,787	32
Y0X1	3,634	0,980	27	3,646	0,949	26
Y0X2	2,851	0,748	26	2,846	0,747	26
Y0X3	2,377	0,605	25	2,340	0,614	26
Y0X4	1,701	0,452	27	1,641	0,402	24
Y0X5	1,420	0,374	26	1,408	0,367	26
Y0X6	1,296	0,346	27	1,285	0,336	26
Y1X1	0,621	0,613	99	0,765	0,530	69
Y1X2	1,236	0,589	48	1,272	0,603	47
Y1X3	1,399	0,531	38	1,405	0,558	40
Y1X4	1,337	0,433	32	1,380	0,433	31
Y1X5	1,249	0,389	31	1,259	0,390	31
Y2X1	0,069	0,033	47	0,054	0,055	101
Y2X3	0,046	0,041	88	0,050	0,040	81
Y2X4	0,090	0,051	56	0,114	0,067	59

Tabelle E.1: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Referenz 1* und *Referenz 2*.

	Referenz 3			Referenz 4		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	6,487	1,809	28	6,795	1,846	27
Y0X1	3,792	1,003	26	3,861	1,026	27
Y0X2	2,985	0,766	26	2,888	0,772	27
Y0X3	2,475	0,589	24	2,320	0,622	27
Y0X4	1,637	0,434	26	1,645	0,429	26
Y0X5	1,383	0,376	27	1,370	0,392	29
Y0X6	1,234	0,366	30	1,227	0,344	28
Y1X1	0,943	0,464	49	0,729	0,587	81
Y1X2	1,237	0,608	49	1,162	0,581	50
Y1X3	1,402	0,580	41	1,368	0,559	41
Y1X4	1,371	0,427	31	1,381	0,427	31
Y1X5	1,302	0,390	30	1,305	0,379	29
Y2X1	-0,042	0,042	100	-0,047	0,044	94
Y2X3	-0,014	0,056	412	-0,031	0,053	172
Y2X4	0,041	0,064	154	0,026	0,063	242

Tabelle E.2: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Referenz 3* und *Referenz 4*.

	Referenz 5		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	4,543	1,460	32
Y0X1	3,344	0,957	29
Y0X2	2,800	0,735	26
Y0X3	2,324	0,612	26
Y0X4	1,626	0,424	26
Y0X5	1,418	0,352	25
Y0X6	1,266	0,313	25
Y1X1	0,331	0,504	152
Y1X2	0,815	0,546	67
Y1X3	0,992	0,526	53
Y1X4	1,108	0,441	40
Y1X5	0,792	0,321	40
Y2X1	-0,274	1,419	519
Y2X3	0,014	0,068	503
Y2X4	0,079	0,038	49

Tabelle E.3: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  des Datensatzes *Referenz 5*.

## E.2 Geschwindigkeit

	Geschwindigkeit 1			Geschwindigkeit 2		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	13,777	3,839	28	13,988	3,858	28
Y0X1	7,659	2,018	26	7,679	2,068	27
Y0X2	5,911	1,606	27	5,856	1,545	26
Y0X3	4,788	1,268	26	4,542	1,252	28
Y0X4	3,340	0,856	26	3,255	0,846	26
Y0X5	2,720	0,702	26	2,745	0,720	26
Y0X6	2,427	0,669	28	2,441	0,686	28
Y1X1	1,442	0,986	68	1,376	1,145	83
Y1X2	2,450	1,144	47	2,558	1,250	49
Y1X3	2,835	1,124	40	2,867	1,107	39
Y1X4	2,746	0,881	32	2,702	0,857	32
Y1X5	2,488	0,765	31	2,487	0,758	30
Y2X1	-0,072	0,087	121	-0,091	0,092	101
Y2X3	-0,004	0,107	2594	0,005	0,867	18769
Y2X4	0,152	0,149	99	0,125	0,136	109

Tabelle E.4: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Geschwindigkeit 1* und *Geschwindigkeit 2*.

	Geschwindigkeit 3			Geschwindigkeit 4		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	13,582	3,793	28	13,212	3,792	29
Y0X1	7,434	2,000	27	7,424	1,989	27
Y0X2	5,641	1,508	27	5,720	1,538	27
Y0X3	4,521	1,254	28	4,561	1,224	27
Y0X4	3,162	0,831	26	3,245	0,868	27
Y0X5	2,639	0,711	27	2,700	0,726	27
Y0X6	2,342	0,668	29	2,370	0,663	28
Y1X1	1,297	1,097	85	1,400	1,138	81
Y1X2	2,387	1,130	47	2,409	1,157	48
Y1X3	2,759	1,087	39	2,846	1,111	39
Y1X4	2,686	0,837	31	2,640	0,852	32
Y1X5	2,472	0,746	30	2,501	0,747	30
Y2X1	-0,086	0,088	102	-0,021	0,093	434
Y2X3	0,020	0,107	545	-0,052	0,173	330
Y2X4	0,162	0,131	81	0,125	0,147	117

Tabelle E.5: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Geschwindigkeit 3* und *Geschwindigkeit 4*.

	Geschwindigkeit 5		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	13,521	3,753	28
Y0X1	7,461	2,029	27
Y0X2	5,676	1,545	27
Y0X3	4,562	1,239	27
Y0X4	3,141	0,827	26
Y0X5	2,641	0,720	27
Y0X6	2,284	0,648	28
Y1X1	1,303	1,129	87
Y1X2	2,332	1,144	49
Y1X3	2,737	1,074	39
Y1X4	2,690	0,836	31
Y1X5	2,455	0,738	30
Y2X1	-0,094	0,094	99
Y2X3	-0,001	0,105	9324
Y2X4	0,125	0,139	111

Tabelle E.6: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  des Datensatzes *Geschwindigkeit 5*.

### E.3 Beladung

	Beladung 1			Beladung 2		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	5,629	1,877	33	6,428	1,743	27
Y0X1	2,407	0,596	25	3,675	0,957	26
Y0X2	1,853	0,475	26	2,852	0,730	26
Y0X3	1,497	0,405	27	2,243	0,586	26
Y0X4	1,055	0,303	29	1,589	0,432	27
Y0X5	0,878	0,238	27	1,358	0,362	27
Y0X6	0,790	0,222	28	1,170	0,318	27
Y1X1	0,582	0,394	68	0,684	0,544	80
Y1X2	0,885	0,463	52	1,214	0,582	48
Y1X3	0,946	0,385	41	1,325	0,555	42
Y1X4	0,913	0,327	36	1,323	0,407	31
Y1X5	0,835	0,295	35	1,232	0,386	31
Y2X1	-0,085	0,021	24	-0,141	0,000	0
Y2X3	0,002	0,045	2555	-0,011	0,054	516
Y2X4	0,018	0,053	300	0,060	0,054	90

Tabelle E.7: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Beladung 1* und *Beladung 2*.

	Beladung 3			Beladung 4		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	6,409	1,808	28	6,292	1,767	28
Y0X1	3,730	0,982	26	3,669	0,960	26
Y0X2	2,927	0,741	25	2,809	0,724	26
Y0X3	2,333	0,597	26	2,241	0,599	27
Y0X4	1,627	0,433	27	1,559	0,412	26
Y0X5	1,377	0,377	27	1,317	0,380	29
Y0X6	1,199	0,369	31	1,147	0,348	30
Y1X1	0,757	0,564	75	0,724	0,585	81
Y1X2	1,178	0,577	49	1,195	0,585	49
Y1X3	1,375	0,553	40	1,379	0,555	40
Y1X4	1,346	0,422	31	1,351	0,419	31
Y1X5	1,232	0,383	31	1,210	0,387	32
Y2X1	-0,022	0,051	232	-0,039	0,035	90
Y2X3	-0,022	0,057	262	-0,039	0,079	200
Y2X4	0,049	0,057	117	0,063	0,049	78

Tabelle E.8: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  der Datensätze *Beladung 3* und *Beladung 4*.

	Beladung 5		
	u_mittel [m/s]	u_RMS [m/s]	T [%]
Y0X0	6,584	1,789	27
Y0X1	3,689	0,956	26
Y0X2	2,813	0,745	26
Y0X3	2,301	0,605	26
Y0X4	1,621	0,413	25
Y0X5	1,368	0,380	28
Y0X6	1,162	0,320	28
Y1X1	0,738	0,573	78
Y1X2	1,205	0,581	48
Y1X3	1,382	0,562	41
Y1X4	1,347	0,432	32
Y1X5	1,238	0,386	31
Y2X1	-0,040	0,042	105
Y2X3	-0,009	0,060	688
Y2X4	0,045	0,077	172

Tabelle E.9: Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$ ,  $u_{\text{RMS}}$  und die daraus resultierende Turbulenz  $T$  des Datensatzes *Beladung 5*.

# Anhang F

## Häufigkeitsverteilung

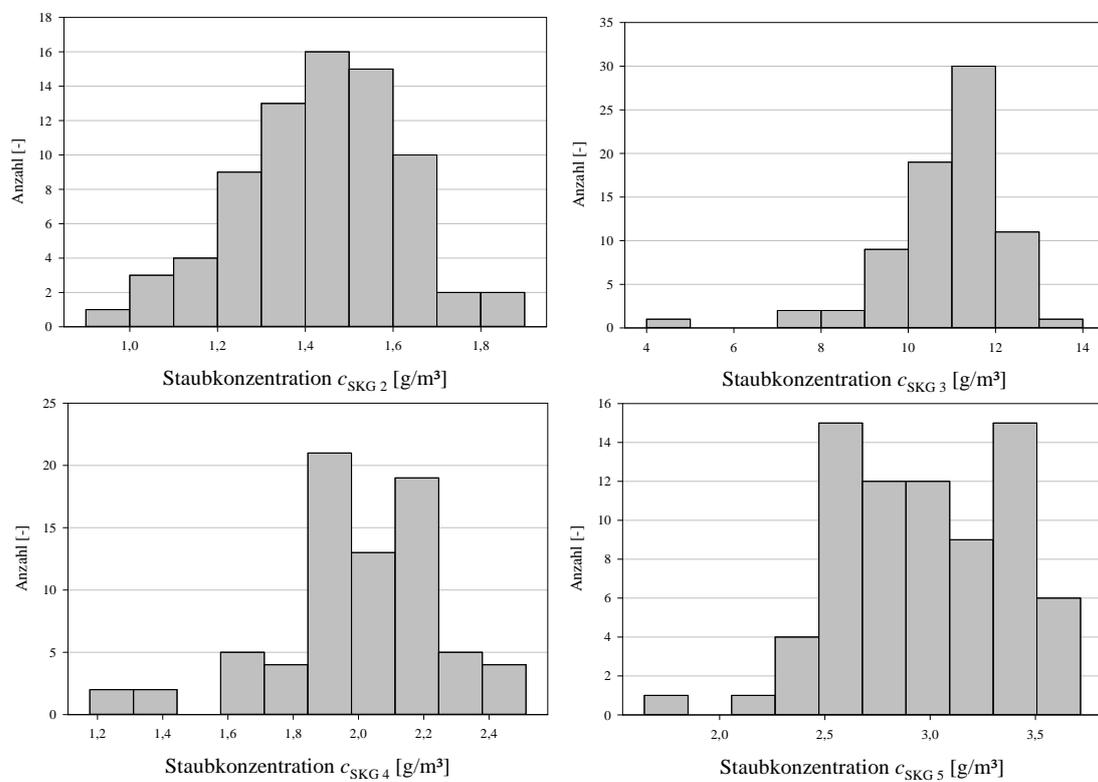


Abbildung F.1: Darstellung der statistische Verteilung der Konzentrationsmesswerte für die Datenreihe *Referenz* der Messköpfe 2, 3, 4 und 5.

# Anhang G

## Auswertung der Staubkonzentrationsmesswerte

### G.1 Geschwindigkeit

<b>Geschwindigkeit 1 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_1$	11,034	1,315	6,614	1,669	2,296
Standardabweichung $s$	0,783	0,142	0,627	0,533	0,179
Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch},1}$	0,65	0,12	0,52	0,44	0,15
Abweichung $v_{\text{Gesch},1}/\bar{c}_1$ [%]	5,91	9,00	7,89	26,56	6,48

<b>Geschwindigkeit 2 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_2$	12,312	1,316	7,437	1,668	2,420
Standardabweichung $s$	1,053	0,111	0,736	0,262	0,131
Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch},2}$	0,88	0,09	0,61	0,22	0,11
Abweichung $v_{\text{Gesch},2}/\bar{c}_2$ [%]	7,12	7,00	8,24	13,06	4,49

<b>Geschwindigkeit 3 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_3$	11,640	1,317	7,666	1,667	2,370
Standardabweichung $s$	0,570	0,127	0,636	0,180	0,107
Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch},3}$	0,47	0,11	0,53	0,15	0,09
Abweichung $v_{\text{Gesch},3}/\bar{c}_3$ [%]	4,07	8,05	6,90	9,00	3,75

<b>Geschwindigkeit 4 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_4$	11,378	1,269	8,122	1,438	2,294
Standardabweichung $s$	0,709	0,123	0,903	0,280	0,141
Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch},4}$	0,59	0,10	0,75	0,23	0,12
Abweichung $v_{\text{Gesch},4}/\bar{c}_4$ [%]	5,19	8,07	9,25	16,22	5,12

<b>Geschwindigkeit 5 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_5$	13,272	1,252	8,692	1,619	2,363
Standardabweichung $s$	1,022	0,136	0,942	0,198	0,126
Vertrauensbereich $v_{\text{Gesch},5}$	0,85	0,11	0,78	0,16	0,10
Abweichung $v_{\text{Gesch},5}/\bar{c}_5$ [%]	6,41	9,01	9,02	10,16	4,44

Tabelle G.1: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Gesch}}$ . Hierbei wurde für jeden Datensatz der Datenreihe *Geschwindigkeit* Stichprobenumfang von  $n = 13$  ausgewertet.

<b>Staubkonzentration</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}$ [g/m <sup>3</sup> ]	11,927	1,294	7,706	1,612	2,349
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	0,792	0,028	0,695	0,089	0,048
Vertrauensbereich $v_{\text{Rep}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,063	0,037	0,932	0,119	0,064
Abweichung $v_{\text{Rep}}/\bar{c}$ [%]	8,91	2,88	12,09	7,40	2,74

Tabelle G.2: Mittelwerte, Standardabweichung, der Vertrauensbereich und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe *Geschwindigkeit* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit.

<b>Geschwindigkeit</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Gesch}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	11,927	1,294	7,706	1,612	2,349
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,160	0,131	1,044	0,329	0,147
Messunsicherheit $v_{\text{Mess}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	0,43	0,05	0,39	0,12	0,05
Abweichung $v_{\text{Mess}}/\bar{c}_{\text{Gesch}}$ [%]	3,62	3,77	5,04	7,60	2,33

Tabelle G.3: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Geschwindigkeit* mit einem Stichprobenumfang  $n = 65$  ausgewertet.

## G.2 Beladung

<b>Beladung 1 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_1$	12,696	0,800	6,277	1,338	2,117
Standardabweichung $s$	0,586	0,138	0,270	0,153	0,095
Vertrauensbereich $v_{\text{Bela},1}$	0,49	0,11	0,22	0,13	0,08
Abweichung $v_{\text{Bela},1}/\bar{c}_1$ [%]	3,84	14,38	3,58	9,51	3,72

<b>Beladung 2 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_2$	9,957	0,751	5,955	1,227	1,913
Standardabweichung $s$	0,320	0,080	0,415	0,222	0,109
Vertrauensbereich $v_{\text{Bela},2}$	0,27	0,07	0,35	0,19	0,09
Abweichung $v_{\text{Bela},2}/\bar{c}_2$ [%]	2,67	8,82	5,79	15,08	4,73

<b>Beladung 3 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_3$	10,171	0,739	5,838	1,165	1,884
Standardabweichung $s$	0,433	0,132	0,450	0,131	0,085
Vertrauensbereich $v_{\text{Bela},3}$	0,36	0,11	0,37	0,11	0,07
Abweichung $v_{\text{Bela},3}/\bar{c}_3$ [%]	3,54	14,87	6,41	9,38	3,75

<b>Beladung 4 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_4$	10,399	0,825	6,090	1,434	2,069
Standardabweichung $s$	0,375	0,126	0,610	0,204	0,075
Vertrauensbereich $v_{\text{Bela},4}$	0,31	0,10	0,51	0,17	0,06
Abweichung $v_{\text{Bela},4}/\bar{c}_4$ [%]	3,00	12,70	8,34	11,83	3,01

<b>Beladung 5 [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_5$	10,346	0,684	5,727	1,122	1,903
Standardabweichung $s$	0,380	0,124	0,386	0,224	0,083
Vertrauensbereich $v_{\text{Bela},5}$	0,32	0,10	0,32	0,19	0,07
Abweichung $v_{\text{Bela},5}/\bar{c}_5$ [%]	3,06	15,13	5,61	16,59	3,65

Tabelle G.4: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Bela}}$ . Hierbei wurde für jeden Datensatz der Datenreihe *Beladung* Stichprobenumfang von  $n = 13$  ausgewertet.

<b>Staubkonzentration</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}$ [g/m <sup>3</sup> ]	10,714	0,760	5,977	1,257	1,977
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,003	0,049	0,192	0,114	0,096
Vertrauensbereich $v_{\text{Rep}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,346	0,066	0,258	0,153	0,129
Abweichung $v_{\text{Rep}}/\bar{c}$ [%]	12,56	8,69	4,32	12,21	6,53

Tabelle G.5: Mittelwerte, Standardabweichung, Vertrauensbereich und Abweichung der Mittelwerte der Datenreihe *Beladung* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit.

<b>Beladung</b>	<b>SKG 1</b>	<b>SKG 2</b>	<b>SKG 3</b>	<b>SKG 4</b>	<b>SKG 5</b>
Mittelwert $\bar{c}_{\text{Bela}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	10,714	0,760	5,977	1,257	1,977
Standardabweichung $s$ [g/m <sup>3</sup> ]	1,091	0,131	0,480	0,222	0,132
Messunsicherheit $v_{\text{Mess}}$ [g/m <sup>3</sup> ]	0,41	0,05	0,18	0,08	0,05
Abweichung $v_{\text{Mess}}/\bar{c}_{\text{Bela}}$ [%]	3,79	6,44	2,99	6,58	2,48

Tabelle G.6: Mittelwerte der Staubkonzentrationsmesswerte aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Beladung* mit einem Stichprobenumfang  $n = 65$  ausgewertet.

# Anhang H

## Auswertung der Geschwindigkeitsmesswerte

### H.1 Geschwindigkeit

Geschwindigkeit				
	$\bar{u}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{u}$ [%]
Y0X0	13,62	0,26	0,35	3
Y0X1	7,53	0,11	0,15	2
Y0X2	5,76	0,11	0,14	2
Y0X3	4,60	0,10	0,13	3
Y0X4	3,23	0,07	0,10	3
Y0X5	2,69	0,04	0,06	2
Y0X6	2,37	0,06	0,08	3
Y1X1	1,36	0,06	0,08	6
Y1X2	2,43	0,08	0,10	4
Y1X3	2,81	0,05	0,07	2
Y1X4	2,69	0,03	0,05	2
Y1X5	2,48	0,02	0,02	1
Y2X1	-0,07	0,03	0,04	50
Y2X3	-0,01	0,02	0,03	487
Y2X4	0,14	0,02	0,02	15

Tabelle H.1: Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Geschwindigkeit* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

Geschwindigkeit				
	$\bar{u}_{\text{RMS}}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{u}_{\text{RMS}}$ [%]
Y0X0	3,81	0,04	0,05	1
Y0X1	2,02	0,03	0,04	2
Y0X2	1,55	0,03	0,04	3
Y0X3	1,25	0,01	0,02	2
Y0X4	0,85	0,02	0,02	2
Y0X5	0,72	0,01	0,01	2
Y0X6	0,67	0,01	0,02	2
Y1X1	1,10	0,06	0,08	7
Y1X2	1,16	0,04	0,06	5
Y1X3	1,10	0,02	0,02	2
Y1X4	0,85	0,02	0,02	3
Y1X5	0,75	0,01	0,01	2
Y2X1	0,09	0,00	0,00	4
Y2X3	0,27	0,30	0,40	147
Y2X4	0,14	0,01	0,01	6

Tabelle H.2: Mittelwerte der Schwankungsgröße  $\bar{u}_{\text{RMS}}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Geschwindigkeit* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

## H.2 Beladung

Beladung				
	$\bar{u}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{u}$ [%]
Y0X0	6,27	0,33	0,45	7
Y0X1	3,43	0,51	0,69	20
Y0X2	2,65	0,40	0,54	20
Y0X3	2,12	0,31	0,42	20
Y0X4	1,49	0,22	0,29	20
Y0X5	1,26	0,19	0,26	20
Y0X6	1,09	0,15	0,20	19
Y1X1	0,70	0,06	0,08	12
Y1X2	1,14	0,13	0,17	15
Y1X3	1,28	0,17	0,23	18
Y1X4	1,26	0,17	0,23	18
Y1X5	1,15	0,16	0,21	18
Y2X1	-0,07	0,04	0,06	89
Y2X3	-0,02	0,01	0,02	120
Y2X4	0,05	0,02	0,02	46

Tabelle H.3: Mittelwerte der Geschwindigkeitsmesswerte  $\bar{u}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Messung}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Beladung* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

Beladung				
	$\bar{u}_{\text{RMS}}$ [m/s]	$s$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}$ [m/s]	$v_{\text{Mess}}/\bar{u}_{\text{RMS}}$ [%]
Y0X0	1,80	0,05	0,06	3
Y0X1	0,89	0,15	0,20	22
Y0X2	0,68	0,10	0,14	20
Y0X3	0,56	0,08	0,10	18
Y0X4	0,40	0,05	0,07	16
Y0X5	0,35	0,06	0,07	21
Y0X6	0,32	0,05	0,07	22
Y1X1	0,53	0,07	0,09	18
Y1X2	0,56	0,05	0,06	11
Y1X3	0,52	0,07	0,09	18
Y1X4	0,40	0,04	0,05	13
Y1X5	0,37	0,04	0,05	13
Y2X1	0,03	0,02	0,02	80
Y2X3	0,06	0,01	0,01	25
Y2X4	0,06	0,01	0,01	23

Tabelle H.4: Mittelwerte der Schwankungsgröße  $\bar{u}_{\text{RMS}}$  aller Messpositionen, sowie die Berechnung der Standardabweichung  $s$  und dem Vertrauensbereich  $v_{\text{Mess}}$ . Hierbei wurde die Datenreihe *Beladung* mit einem Stichprobenumfang von  $n = 5$  ausgewertet.

# Anhang I

## Stopfdichte

<b>Stopfdichte <math>q</math></b>	<b>Referenz</b>	<b>Geschwindigkeit</b>	<b>Beladung</b>
Datensatz 1 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,704	0,738	0,718
Datensatz 2 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,722	0,734	0,718
Datensatz 3 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,720	0,727	0,711
Datensatz 4 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,729	0,726	0,730
Datensatz 5 [g/cm <sup>3</sup> ]	0,735	0,733	0,730
Mittelwert $\bar{q}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,722	0,732	0,721
Standardabweichung $s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,011	0,004	0,008
Messunsicherheit $\sigma$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,014	0,006	0,010
Abweichung $\sigma/\bar{q}$ [%]	2	1	1

Tabelle I.1: Stopfdichte  $q$  der einzelnen Datensätze der Datenreihen *Referenz*, *Geschwindigkeit* und *Beladung*. Aus den Messdaten wurde der Mittelwert  $\bar{q}$ , die Standardabweichung  $s$ , die Messunsicherheit  $\sigma$  sowie die prozentuale Abweichung  $\sigma/\bar{q}$  berechnet.

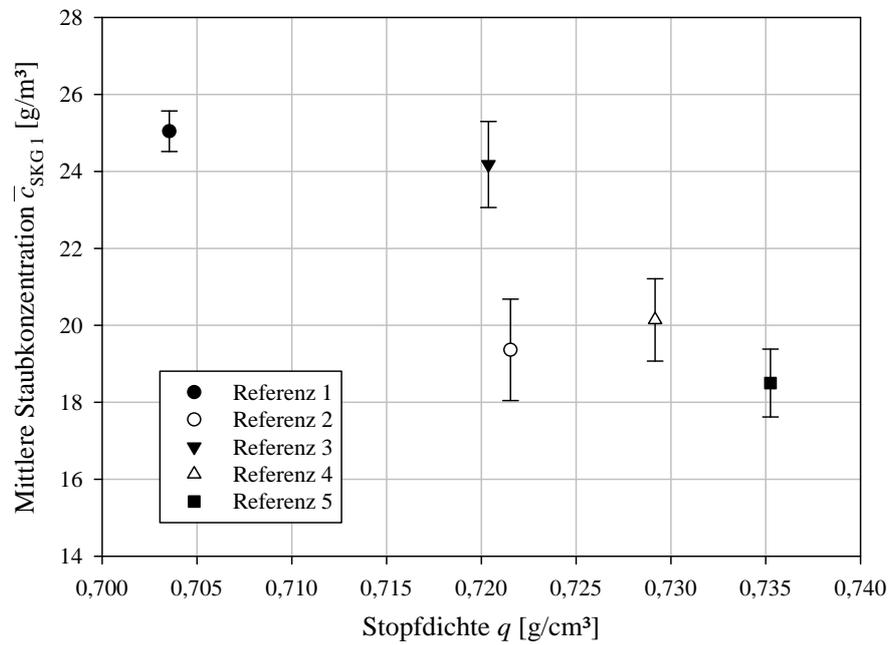


Abbildung I.1: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert  $\bar{c}$  der Datenreihe *Referenz* an dem SKG-Messkopf 1.

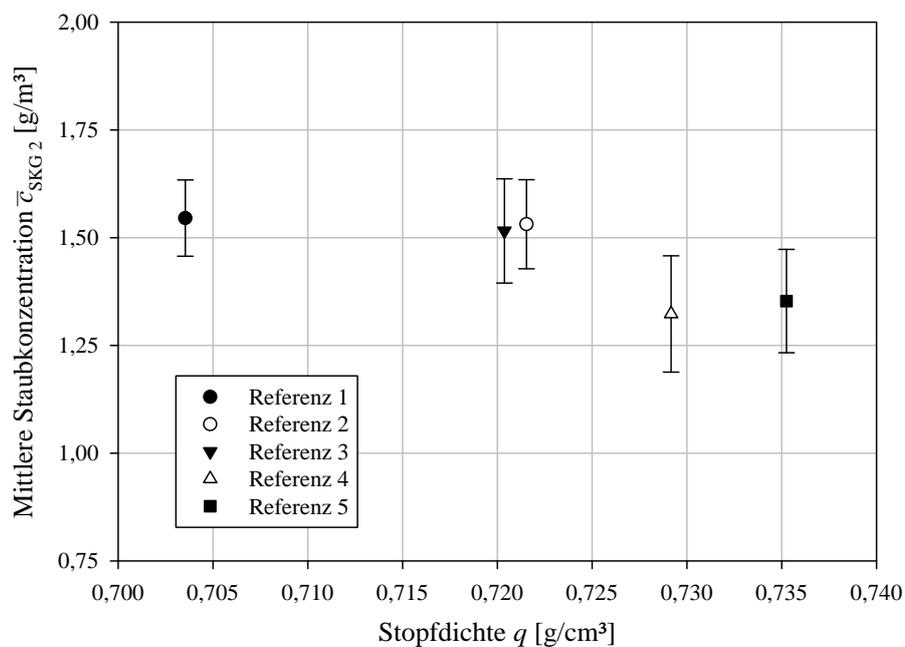


Abbildung I.2: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 2) der Datenreihe *Referenz*.

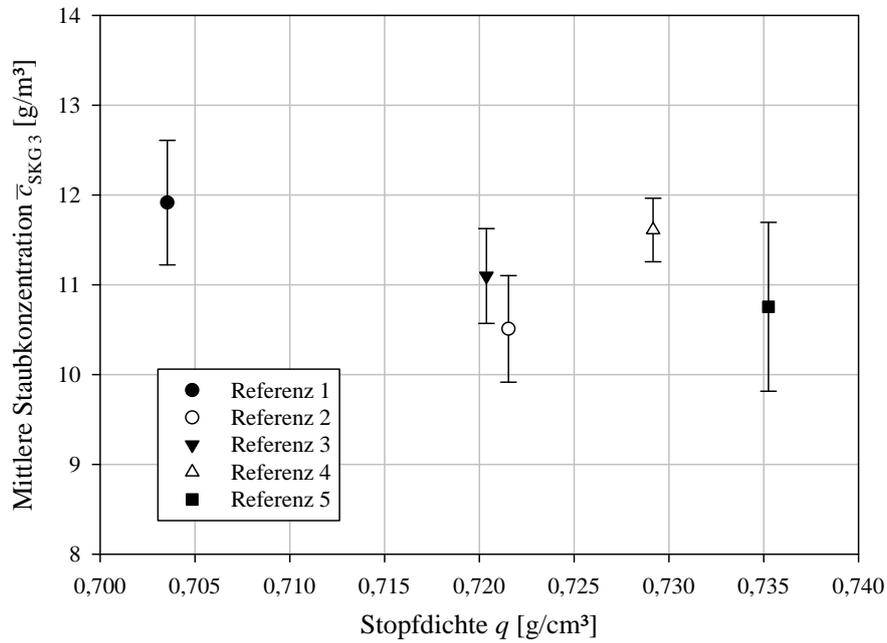


Abbildung I.3: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 3) der Datenreihe *Referenz*.

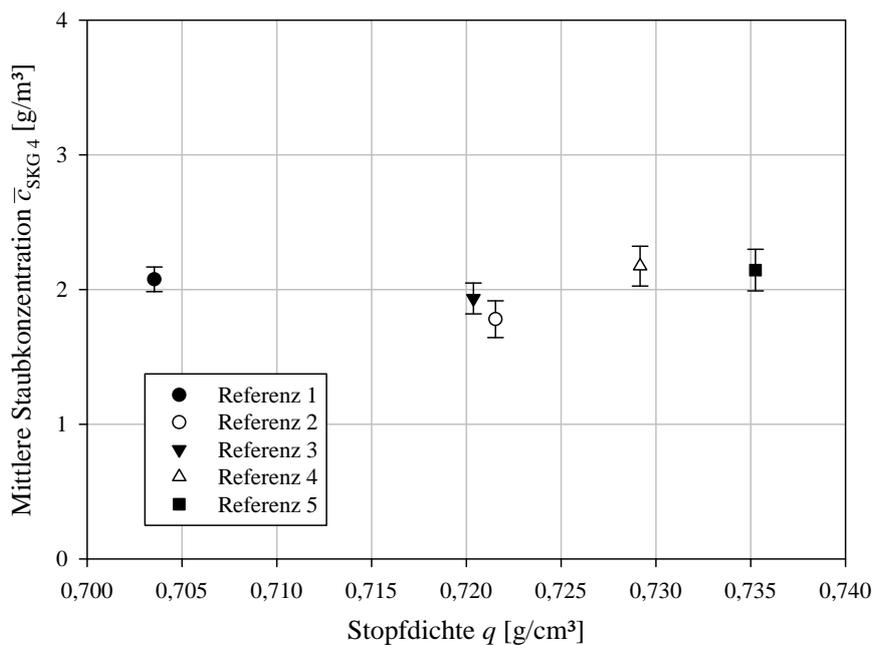


Abbildung I.4: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 4) der Datenreihe *Referenz*.

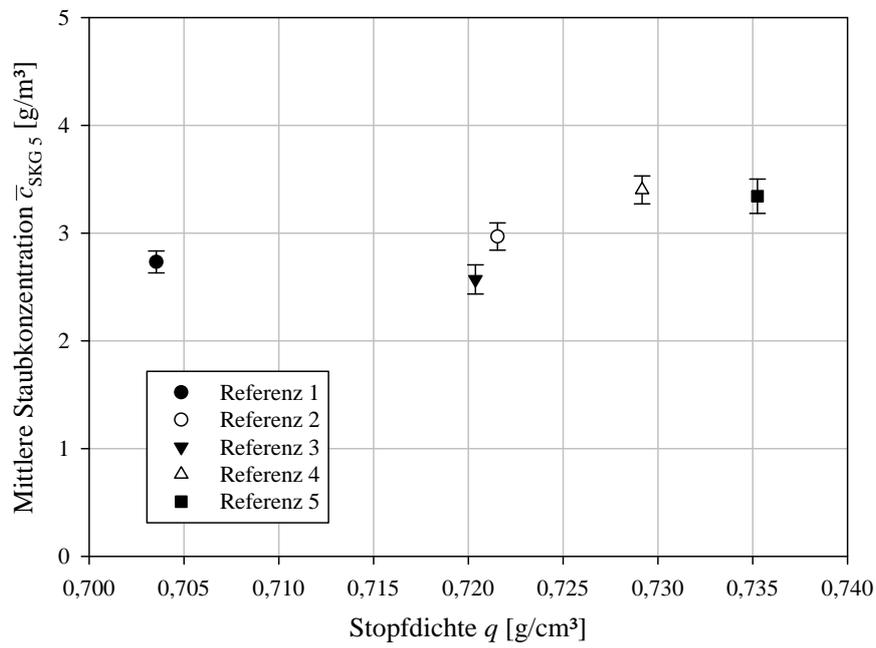


Abbildung I.5: Einfluss der Stopfdichte  $q$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 5) der Datenreihe *Referenz*.

# Anhang J

## Umgebungseinfluss

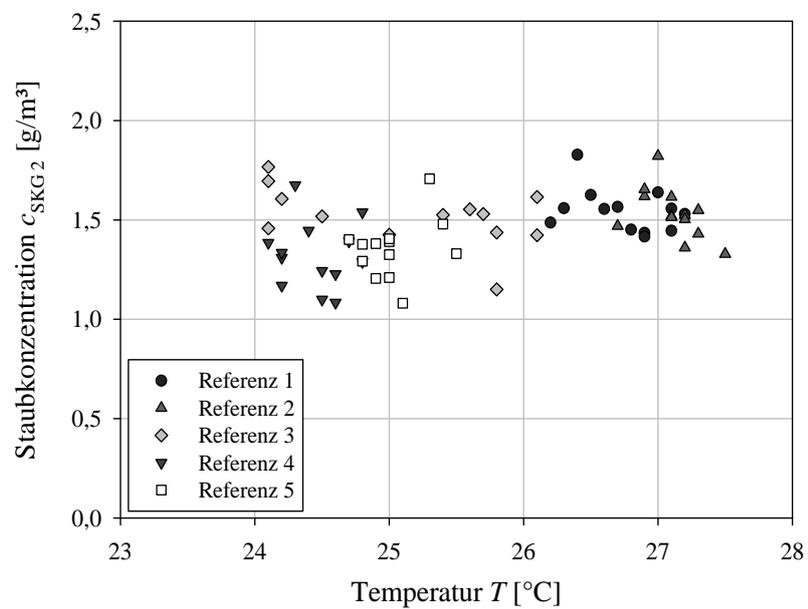


Abbildung J.1: Darstellung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 2.

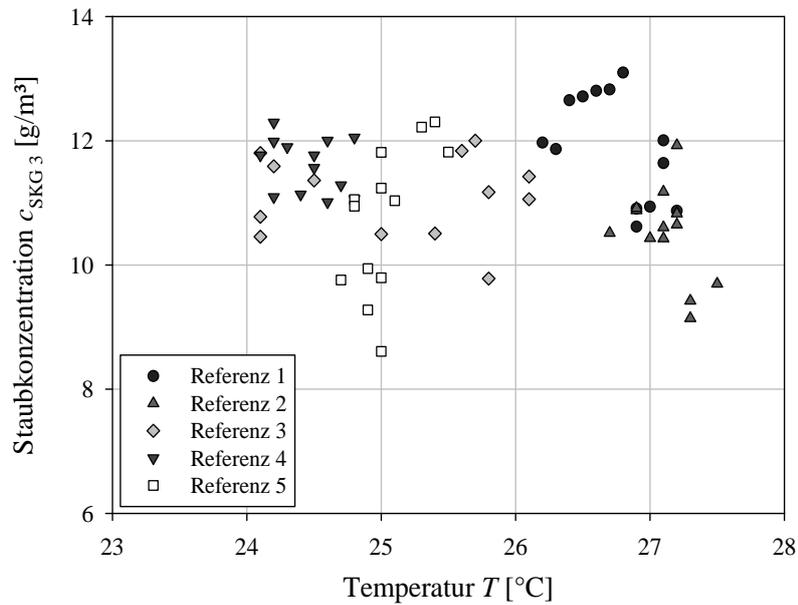


Abbildung J.2: Darstellung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 3.

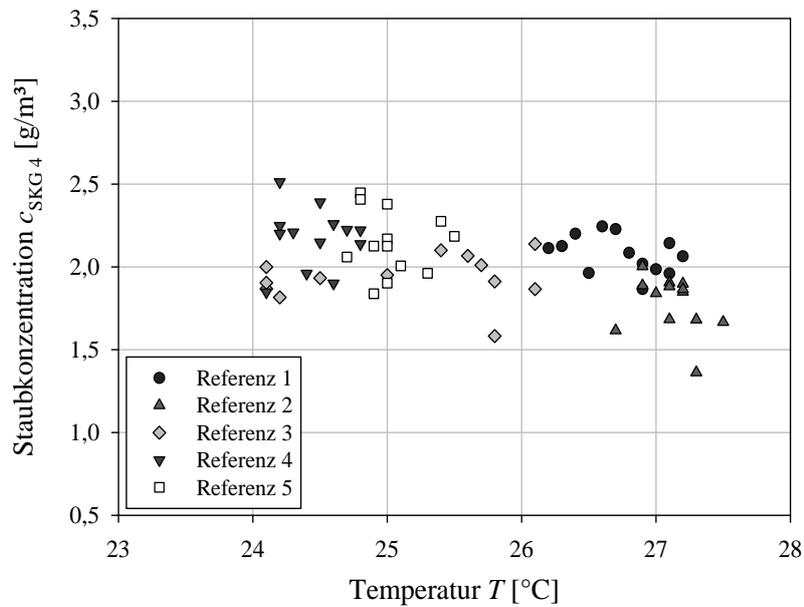


Abbildung J.3: Darstellung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 4.

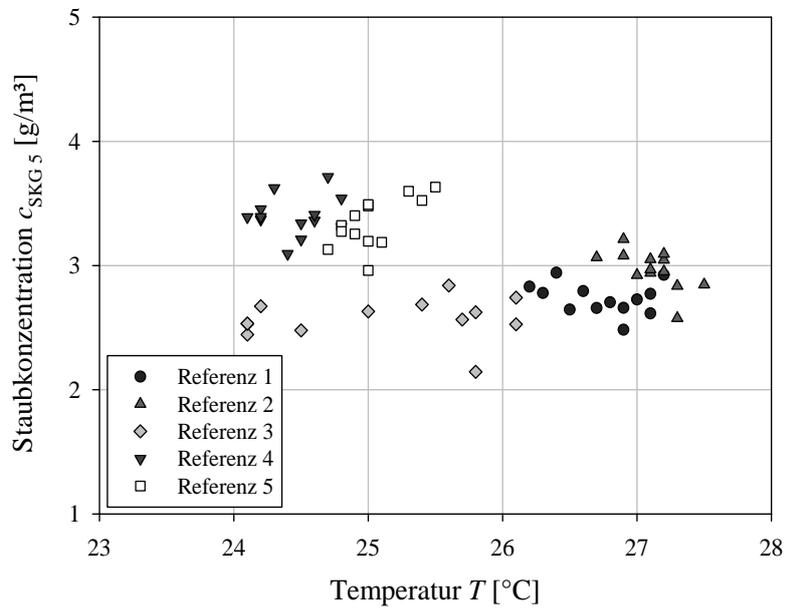


Abbildung J.4: Darstellung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit der Konzentrationsmesswerte der Datenreihe *Referenz* für den SKG-Messkopf 5.

# Anhang K

## Absolute Wasserbeladung

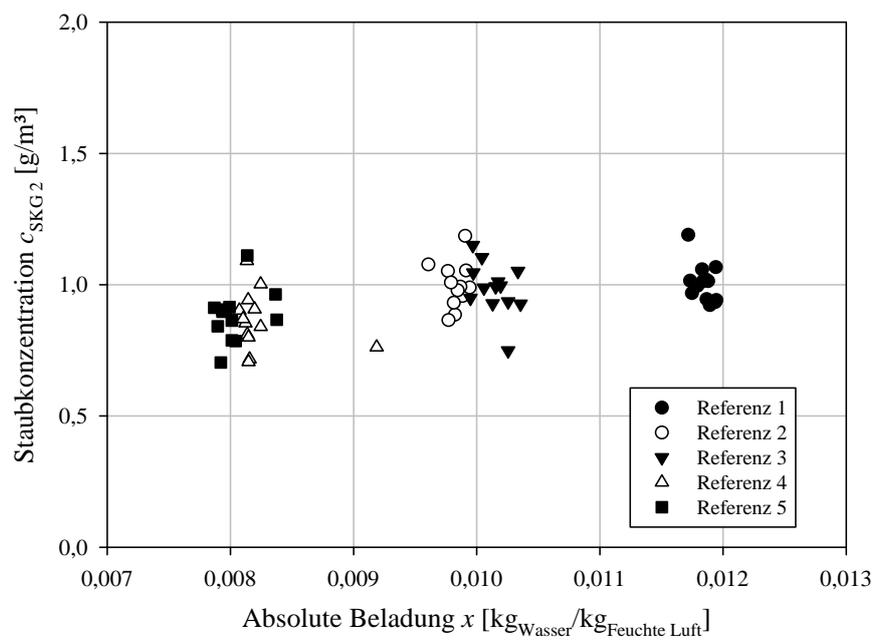


Abbildung K.1: Einfluss der absoluten Wasserbeladung  $x$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 2) der Datenreihe *Referenz*.

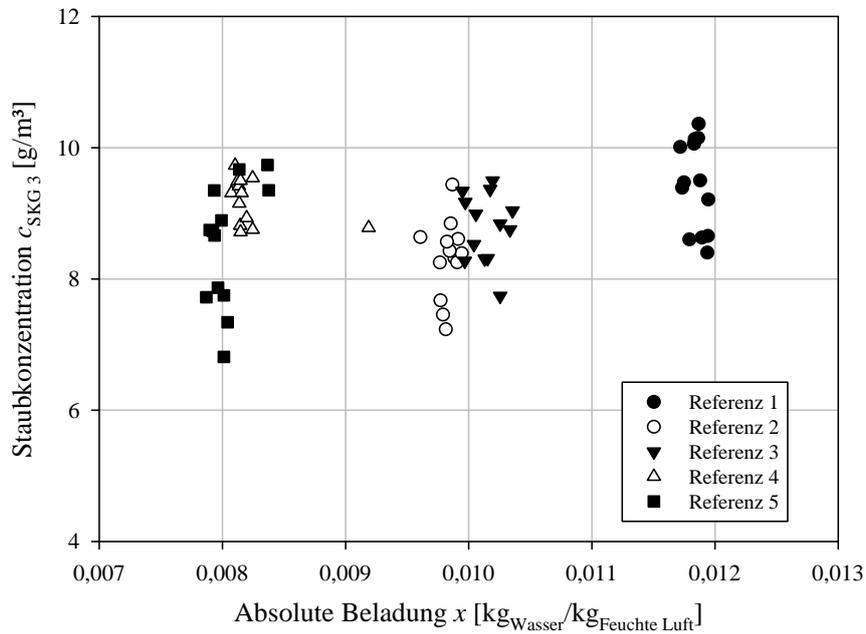


Abbildung K.2: Einfluss der absoluten Wasserbeladung  $x$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 3) der Datenreihe *Referenz*.

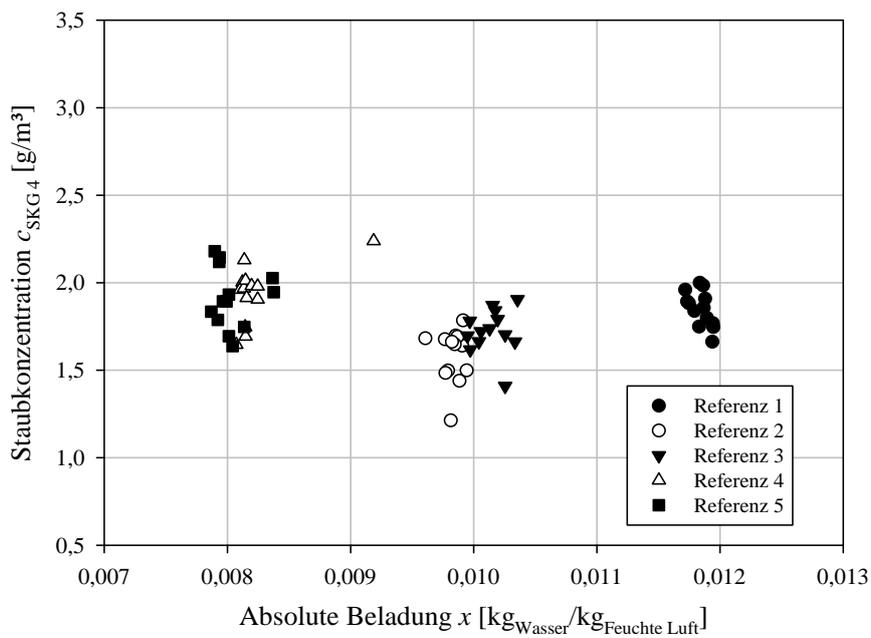


Abbildung K.3: Einfluss der absoluten Wasserbeladung  $x$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 4) der Datenreihe *Referenz*.

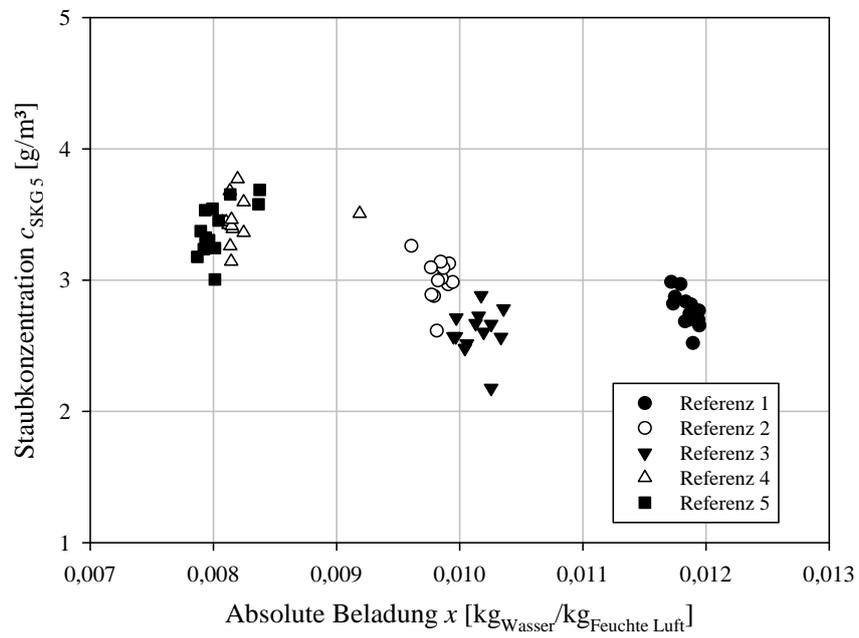


Abbildung K.4: Einfluss der absoluten Wasserbeladung  $x$  auf den mittleren Staubkonzentrationsmesswert (SKG 5) der Datenreihe *Referenz*.