

**Abscheidung reaktiver und inerte Partikeln aus Aerosolen  
auf einzelnen Fasern und Ablösung der entstandenen  
Strukturen durch Umströmung bei gleichzeitiger Reaktion**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING.)

von der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
genehmigte

DISSERTATION

von

Julian Zoller  
aus Neuburg am Rhein

Tag der mündlichen Prüfung: 06. Dezember 2023

Erstgutachter: Prof. Dr. -Ing. habil. Achim Dittler

Zweitgutachter: Prof. Dr. -Ing. habil. Uwe Janoske



## **Vorwort**

Diese Arbeit ist hauptsächlich im Zeitraum vom 01.12.2018 bis zum 31.03.2022 entstanden. In dieser Zeit war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Gas-Partikel-Systeme (GPS) des Instituts für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) angestellt. Allen die mich dabei unterstützt haben danke ich herzlich. Insbesondere möchte ich den anderen Promovierenden danken, die mir alle ans Herz gewachsen sind. Mein Dank geht auch an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) für die finanzielle Förderung dieses Projektes (Projektnummer 434784957), an Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler für die Ermöglichung dieser Arbeit und an Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Parallel zu den in dieser Dissertationsschrift vorgestellten experimentellen Untersuchungen wurden numerische Untersuchungen, mittels Computational Fluid Dynamics (CFD), an der Bergischen Universität Wuppertal (BUW), durchgeführt. Die entsprechenden Mitarbeiter an der BUW sind Herr Dr.-Ing. Kamil Braschke und Herr Amin Zargaran vom Lehrstuhl für Strömungsmechanik. Bei Interesse der Leserin / des Lesers an den numerischen Untersuchungen, wird auf [Braschke, 2021] verwiesen.

Die Inhalte dieser Dissertation wurden zu großen Teilen in Fachzeitschriften veröffentlicht. Dabei ist [Zoller et al., 2020b] in Kapitel 2, [Zoller et al., 2022] in die Kapitel 3.2, 3.4.1 und 3.4.2 und [Zoller et al., 2020a] sowie [Braschke et al., 2021] in Kapitel 3.5 eingeflossen.

Julian Zoller  
Landau, den 10.12.2023



# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Morphologie reaktiv-inerter Partikelstrukturen auf einer einzelnen Faser</b>	<b>3</b>
2.1 Stand der Forschung zur Morphologie abgeschiedener Partikelstrukturen aus einem einzigen Material . . . . .	3
2.2 Material und Methoden zur Erzeugung und Charakterisierung eines Aerosols aus Propanruß und Glaskugeln in Luft und zur Abscheidung der Partikeln auf einer Faser . . . . .	12
2.2.1 Apparatur zur Erzeugung des Aerosols . . . . .	12
2.2.2 Methoden zur Charakterisierung des Aerosols . . . . .	14
2.2.3 Apparatur zur Abscheidung von Partikeln auf einer einzelnen Faser und Methoden zur Untersuchung der entstandenen Struktur . . . . .	18
2.3 Ergebnisse und Diskussion zur Charakterisierung von Aerosol aus Propanruß und Glaskugeln in Luft, sowie zur Abscheidung der Partikeln auf einer einzelnen Faser	23
2.3.1 Charakterisierung des Aerosols . . . . .	23
2.3.2 Morphologie von auf einzelnen Fasern abgeschiedenen Partikelstrukturen	30
2.4 Untersuchungen der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Partikelstrukturen aus anderen Partikelmaterialien . . . . .	41
2.5 Fazit zur Abscheidung reaktiver und inerter Partikeln auf einer einzelnen Faser	48
<b>3 Ablösung von Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln von einer Faser durch Umströmung mit oder ohne gleichzeitige Reaktion</b>	<b>50</b>
3.1 Stand der Forschung zur Ablösung und Übersicht von dabei relevanten Themen	50
3.1.1 Stand der Forschung zur Ablösung inerter Partikelstrukturen von Fasern ohne gleichzeitige Reaktion . . . . .	50
3.1.2 Übersicht zu Strömungskräften auf Partikelstrukturen und deren Festigkeit	52
3.1.3 Übersicht zu den Eigenschaften von Ruß und seiner Oxidation . . . . .	58
3.2 Material und Methoden zur Ablösung reaktiv-inerter Partikelstrukturen . . . . .	61
3.2.1 Apparatur zur Ablösung der Partikelstrukturen . . . . .	61

---

3.2.2	Methode zur Erzeugung und Charakterisierung heißer Luftstrahlen zur Ablösung von Partikelstrukturen . . . . .	66
3.2.3	Methode zur Kalibrierung einer Laserband-Streulicht-Messtechnik zur Detektion abgelöster Partikelstrukturen . . . . .	69
3.2.4	Methode zum Auffangen und analysieren abgelöster Partikelstrukturen	72
3.3	Durchführung der Parameterstudie zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Glas und Propanruß . . . . .	74
3.4	Ergebnisse zur Charakterisierung des Materials und der Methoden zur Untersuchung der Ablösung von reaktiv-inerten Partikelstrukturen . . . . .	76
3.4.1	Charakterisierung der zur Ablösung von Partikelstrukturen verwendeten heißen Luftstrahlen . . . . .	76
3.4.2	Charakterisierung der Laserband-Streulicht-Messtechnik zur Detektion abgelöster Partikelstrukturen . . . . .	80
3.4.3	Blindversuch der Methode zum Auffangen abgelöster Partikelstrukturen	88
3.5	Ergebnisse der Parameterstudie zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Glas und Propanruß . . . . .	91
3.5.1	Für die Ablöseexperimente verwendete beladene Fasern und Versuchsbedingungen . . . . .	91
3.5.2	Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ablösung . . . . .	96
3.5.3	Einfluss der Beladung auf die Ablösung . . . . .	99
3.5.4	Einfluss der Temperatur und der damit verbundenen Reaktion auf die Ablösung . . . . .	104
3.6	Untersuchungen der Übertragbarkeit der Erkenntnisse zur Ablösung auf Partikelstrukturen aus anderen Partikelmaterialien . . . . .	109
3.7	Fazit zur Ablösung von Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln .	115
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>118</b>
<b>5</b>	<b>Summary</b>	<b>121</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>124</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>132</b>
	<b>Literatur</b>	<b>133</b>

# Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
<i>Lateinische Buchstaben</i>		
$A$	$m^2$	Fläche
$a_0$	$m$	Kontaktabstand
$b$	$m$	Länge des Kreisbogens
$C_C$	–	Schlupf-Korrektur
$c_n$	$\#/cm^3$	Anzahlkonzentration
$c_W$	–	Widerstandsbeiwert
$d$	$m$	Durchmesser
$D$	$m^2/s$	Diffusionskoeffizient
$E$	$N/m^2$	Elastizitätsmodul
$F$	$N$	Kraft
$H$	$J$	Hamaker-Konstante
$I$	$W/m^2$	Intensität von Licht
$K$	$N/m^2$	kombiniertes Elastizitätsmodul
$k$	$J/K$	Boltzmann-Konstante
$l$	$m$	Länge
$\dot{M}$	$kg/s$	Massenstrom
$m$	$kg$	Masse
$N_A$	$1/mol$	Avogadro-Konstante
$n$	–	Anzahl
$p$	$Pa$	Druck
$PW$	$s$	Pulsweite
$q$	$A \cdot s$	elektrische Ladungsmenge
$R$	$J/(mol \cdot K)$	ideale Gaskonstante
$r$	$m$	Radius
$r^*$	$m$	radiale Koordinate
$s$	$K/s$	maximale Temperatur-Steigerungs-Rate
$T$	$K$	Temperatur
$t$	$s$	Zeit
$U$	$V$	Spannungssignal
$\hat{U}$	$V$	Signal-Spannung

$\bar{U}$	$V$	Mittlere Spannung
$u$	$m/s$	lokale Strömungsgeschwindigkeit
$\bar{u}$	$m/s$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$\dot{V}$	$m^3/s$	Volumenstrom
$X$	$m$	kombinierter Durchmesser
$x$	$m$	Partikeldurchmesser
$\bar{x}$	$m$	mittlerer Partikeldurchmesser
$z$	$m$	Abstand

*Griechische Buchstaben*

$\beta$	$m^2/s$	Prall-Parameter
$\gamma$	$N/m$	Grenzflächenspannung
$\Delta\gamma$	$J/m^2$	Oberflächenenergie
$\varepsilon$	–	Porosität
$\varepsilon_0$	$A \cdot s / (V \cdot m)$	elektrische Feldkonstante
$\eta$	$Pa \cdot s$	dynamische Viskosität
$\theta$	–	Parameter
$\lambda$	$m$	mittlere freie Weglänge
$\nu$	$m^2/s$	kinematische Viskosität
$\xi$	–	Parameter
$\Pi$	–	Parameter
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\Sigma$	$m$	Kollisionsdurchmesser
$\sigma$	$N/m^2$	Festigkeit
$\sigma_{g,3}$	–	volumengewichtete geometrische Standardabweichung
$\phi$	%	relative Luftfeuchte
$\Psi$	–	Korrekturfaktor
$\psi$	–	Poissonzahl

*Dimensionslose Kennzahlen*

$Pe$	$= \frac{u d_{Faser}}{D}$	Peclet-Zahl
$R$	$= \frac{x}{d_{Faser}}$	Sperreffekt-Parameter

$$Re = \frac{\rho_F u l_C}{\eta_F} \quad \text{Reynolds-Zahl}$$

$$St = \frac{\rho_P x^2 u C_C \Psi}{18 \eta_F d_{Faser}} \quad \text{Stokes-Zahl}$$

*Abkürzungen*

<i>BUW</i>	Bergische Universität Wuppertal
<i>CAST</i>	Combustion Aerosol Standard
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>DMA</i>	Differential Mobility Analyzer
<i>DMT</i>	Derjaguin, Muller, Toporov
<i>FCE</i>	Faraday Cup Electrometer
<i>FI</i>	Flow Indication
<i>FIC</i>	Flow Indication and Control
<i>GPS</i>	Gas Partikel Systeme
<i>HEPA</i>	High Efficiency Particulate Air
<i>ISO</i>	International Standardization Organization
<i>JKR</i>	Johnson, Kendall, Roberts
<i>KF</i>	Klein Flansch
<i>KIT</i>	Karlsruher Institut für Technologie
<i>LLS</i>	Laser Light Sheet
<i>MFC</i>	Mass Flow Controller
<i>MVM</i>	Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
<i>OPC</i>	Optical Particle Counter
<i>PAK</i>	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe
<i>PDI</i>	Pressure Difference Indication
<i>PID</i>	Proportional Integral Differentiell
<i>REM</i>	Raster-Elektronen-Mikroskop
<i>SAG</i>	Solid Aerosol Generator
<i>SMPS</i>	Scanning Mobility Particle Sizer
<i>TEM</i>	Transverse Electromagnetic Mode
<i>TI</i>	Temperature Indication
<i>TIC</i>	Temperature Indication Control
<i>UCPC</i>	Ultrafine Condensation Particle Counter

*Indizes tiefgestellt*

0	anzahlgewichtet
2	flächengewichtet
50,0	anzahlgewichteter Median
50,2	flächengewichteter Median
50,3	volumengewichteter Median
A	Avogadro
C	charakteristisch
<i>Düse</i>	Düse
<i>Einlauf</i>	Einlauf
<i>el</i>	elektrostatisch
<i>Exp</i>	Experiment
<i>F</i>	Fluid
<i>Faser</i>	Faser
<i>g,3</i>	geometrisch, volumengewichtet
<i>Glas</i>	Glas
<i>H</i>	Haftkraft
<i>K</i>	Kapillardruck
<i>Kugel</i>	Kugel
<i>M</i>	Massenstrom
<i>max</i>	Maximum
<i>N</i>	Normbedingungen
<i>n</i>	Anzahl
<i>O </i>	Kugel-Platte
<i>Oben</i>	Oben
<i>OO</i>	Kugel-Kugel
<i>P</i>	Partikel
<i>PID</i>	Proportional Integral Differentiell
<i>prim</i>	primär
<i>Rand</i>	Rand
<i>Rauschen</i>	Rauschen

---

<i>Rohr</i>	Rohr
<i>Ruß</i>	Ruß
<i>Seite</i>	Seite
<i>Soll</i>	Soll
<i>Start</i>	Start
<i>Stat</i>	Stationär
<i>Streu</i>	Streuung
<i>VdW</i>	Van-der-Waals
<i>W</i>	Strömungswiderstand
<i>Ziel</i>	Ziel
<i>Zylinder</i>	Zylinder



# 1 Einleitung

Abgase und Synthesegase können reaktive und inerte Partikeln enthalten [Wang et al., 2020] [Ghi-dossi et al., 2009]. Unter der Bezeichnung ‚reaktiv‘ soll hier insbesondere die Fähigkeit der festen Partikeln bezeichnet werden, von Sauerstoff oxidiert zu werden und dabei gasförmige Produkte zu bilden. ‚Inerte‘ Partikeln hingegen werden unter den auftretenden Bedingungen nicht oxidiert und bleiben als feste Partikeln erhalten. Ein Beispiel für reaktive Partikeln ist Ruß und ein Beispiel für inerte Partikeln ist Asche. Diese reaktiven und inerten Partikeln können in technischen Anwendungen auf zylindrischen Kollektoren abgeschieden werden und dadurch Partikelstrukturen auf dem Kollektor bilden. Zylindrische Kollektoren sind beispielsweise Fasern in Filtern zur Partikelentfernung aus Abgasen [Ou et al., 2017], Rohre in Rohrbündeln zur Wärmeübertragung in Kraftwerken [Dai et al., 2013] und Füllkörper in Reaktoren zur Vergasung von Kohlestaub [Salgansky et al., 2017]. Bei diesen Anwendungen können die Partikelstrukturen das Betriebsverhalten der genannten Apparate beeinflussen. In Filtern wirken sie sich auf den Abscheidegrad [Kasper et al., 2009] und den Druckverlust [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012] aus, wobei insbesondere die als Morphologie bezeichnete Form und Gestalt der Partikelstruktur von Relevanz ist [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012]. Bei Rohrbündelwärmetauschern sind die Partikelstrukturen wie eine Isolationsschicht, die den Wärmedurchgang verringert [Dai et al., 2013] und in Reaktoren zur Vergasung von Kohlestaub führt die Abscheidung auf zylindrischen Füllkörpern zu längeren Verweilzeiten und damit höheren Umsätzen [Salgansky et al., 2017]. Je nach Anwendungsfall und Einfluss auf das Betriebsverhalten, kann die Bildung von Partikelstrukturen, auf den zylindrischen Kollektoren eines Apparates, erwünscht oder unerwünscht sein.

Unerwünschte Partikelstrukturen, auf den zylindrischen Kollektoren eines Apparates, können wieder vom Kollektor entfernt werden. Dieser oft als Regeneration bezeichnete Vorgang kann zum Beispiel durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und damit eine Erhöhung der Strömungskräfte auf die Strukturen erfolgen, die ein Ablösen der Strukturen vom Kollektor bewirken [Löffler, 1972]. Sappok et al. hat für keramische Wandstromfilter gezeigt, dass die Reaktion von reaktiven Partikeln, in Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln, die Ablösung beeinflussen kann [Sappok et al., 2013]. Im Fall von zylindrischen Kollektoren wurde dieser Einfluss der Reaktion auf die Ablösung noch nicht untersucht.

Trotz der Auswirkung reaktiv-inerter Partikelstrukturen, auf zylindrischen Kollektoren, auf das Betriebsverhalten der genannten Apparate, wurden diese noch nicht grundlegend untersucht. Die Forschung zur Morphologie (zusammengefasst in Kapitel 2.1) und Ablösung (Kapitel 3.1.1) solcher Strukturen beschränkte sich bisher auf inerte Partikeln eines Materials. Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit reaktiv-inerte Partikelstrukturen auf zylindrischen Kollektoren in gasförmiger Umgebung grundlegend untersucht werden. Hierbei werden zwei Schwerpunkte

gesetzt. Aufgrund der möglichen Auswirkung der Morphologie einer Partikelstruktur auf das Betriebsverhalten eines Apparates wird diese zuerst in Kapitel 2 untersucht. Dabei ist von besonderem Interesse welche Morphologien bei der Abscheidung verschiedener Partikelmaterialien, aus einem Aerosol, auf einem zylindrischen Kollektor, entstehen. Der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit wird in Kapitel 3 behandelt und beschäftigt sich mit der Ablösung reaktiv-inerter Partikelstrukturen von zylindrischen Kollektoren durch Strömungskräfte mit oder ohne überlagerte Reaktion. Bei der genannten Reaktion handelt es sich um die Oxidation und damit das Verschwinden der reaktiven Partikeln aus der Partikelstruktur.

Die Untersuchungen dieser Arbeit werden anhand eines Modellsystems bestehend aus einem einzelnen zylindrischen Kollektor durchgeführt. Als Kollektor wird eine zylindrische Stahlfaser mit einem Durchmesser von 40  $\mu\text{m}$  verwendet (außer an der Stelle, an welcher der Einfluss des Faserdurchmessers untersucht wird). Als Partikelmaterialien kommen hauptsächlich Propanruß als reaktives/oxidierbares Partikelmaterial und Glaskugeln als inertes Partikelmaterial zum Einsatz. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit auf anderen Partikelmaterialien werden zusätzlich Untersuchungen mit Carbon Black, Funkenruß, Flugasche und Siliziumkarbid durchgeführt, um einen Bereich an unterschiedlichen Reaktivitäten des reaktiven Partikelmaterials, Schmelztemperaturen des inertes Partikelmaterials und Partikelgrößenverteilungen abzudecken. Die Anströmung des Kollektors / der Faser erfolgt senkrecht zur Faser-Achse und hat, solange nicht anders angegeben, bei der Abscheidung und der Ablösung die gleiche Richtung. Die Morphologie der Partikelstruktur auf der Faser wird über Mikroskopie untersucht. Die Detektion und Charakterisierung abgelöster Komponenten der Partikelstruktur erfolgt mit einer Laserband-Streulichtmesstechnik und einem Auffangfilter, während die auf der Faser verbleibende Partikelstruktur mit einer Kamera beobachtet wird.

## 2 Morphologie reaktiv-inerter Partikelstrukturen auf einer einzelnen Faser

Die Morphologie reaktiv-inerter Partikelstrukturen auf den zylindrischen Kollektoren eines Apparates kann sich auf das Betriebsverhalten des Apparates auswirken (siehe Kapitel 1). Aus diesem Grund sollen in Kapitel 2 die Morphologien von Partikelstrukturen untersucht werden, die bei der gemeinsamen oder einzelnen Abscheidung von Partikeln aus unterschiedlichen Materialien entstehen.

Zuerst wird in Kapitel 2.1 eine Übersicht der Literatur zur Morphologie von Partikelstrukturen aus einem einzigen Material gegeben. Anschließend wird in Kapitel 2.2 eine Apparatur vorgestellt, mit welcher Misch-aerosole erzeugt und deren Partikeln auf einer einzelnen Faser abgeschieden werden können. Die mit dieser Apparatur gebildeten Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln werden in Kapitel 2.3 untersucht. Eine Erweiterung auf weitere Partikelmaterialien wie Funkenruß, Carbon Black, Flugasche und Siliziumkarbid findet in Kapitel 2.4 statt. Zuletzt werden die Ergebnisse in Kapitel 2.5 zusammengefasst.

### 2.1 Stand der Forschung zur Morphologie abgeschiedener Partikelstrukturen aus einem einzigen Material

Die Morphologie, also die Form und Gestalt von auf einer Faser abgeschiedenen Partikelstrukturen, wird durch verschiedene Mechanismen bei der Bildung der Struktur beeinflusst. Abbildung 2.1 zeigt eine vereinfachte und schematische Darstellung dieser Mechanismen. Sie lassen sich einteilen in Mechanismen der Partikelabscheidung, wie zum Beispiel Diffusion, Sperreffekt, Trägheit, Wirbel und Elektrostatik und in Mechanismen die bereits abgeschiedene Partikelstrukturen verändern, wie die Erosion und die Umlagerung. Die Relevanz der verschiedenen Mechanismen bei der Strukturbildung hängt von den vorliegenden Strömungsbedingungen, den Eigenschaften der Partikeln und der Fasern ab. Quantitativ kann dies über dimensionslose Kennzahlen vorhergesagt werden. Im Folgenden werden diese Mechanismen und die daraus entstehenden Partikelstrukturen, zuerst qualitativ vorgestellt. Anschließend wird auf die dimensionslosen Kennzahlen eingegangen. Die Anströmung erfolgt in allen betrachteten Fällen senkrecht zur Faserachse.

#### *a) Diffusion*

Bei keiner oder sehr kleiner Strömungsgeschwindigkeit, Partikeln im ultrafeinen ( $< 100$  nm)

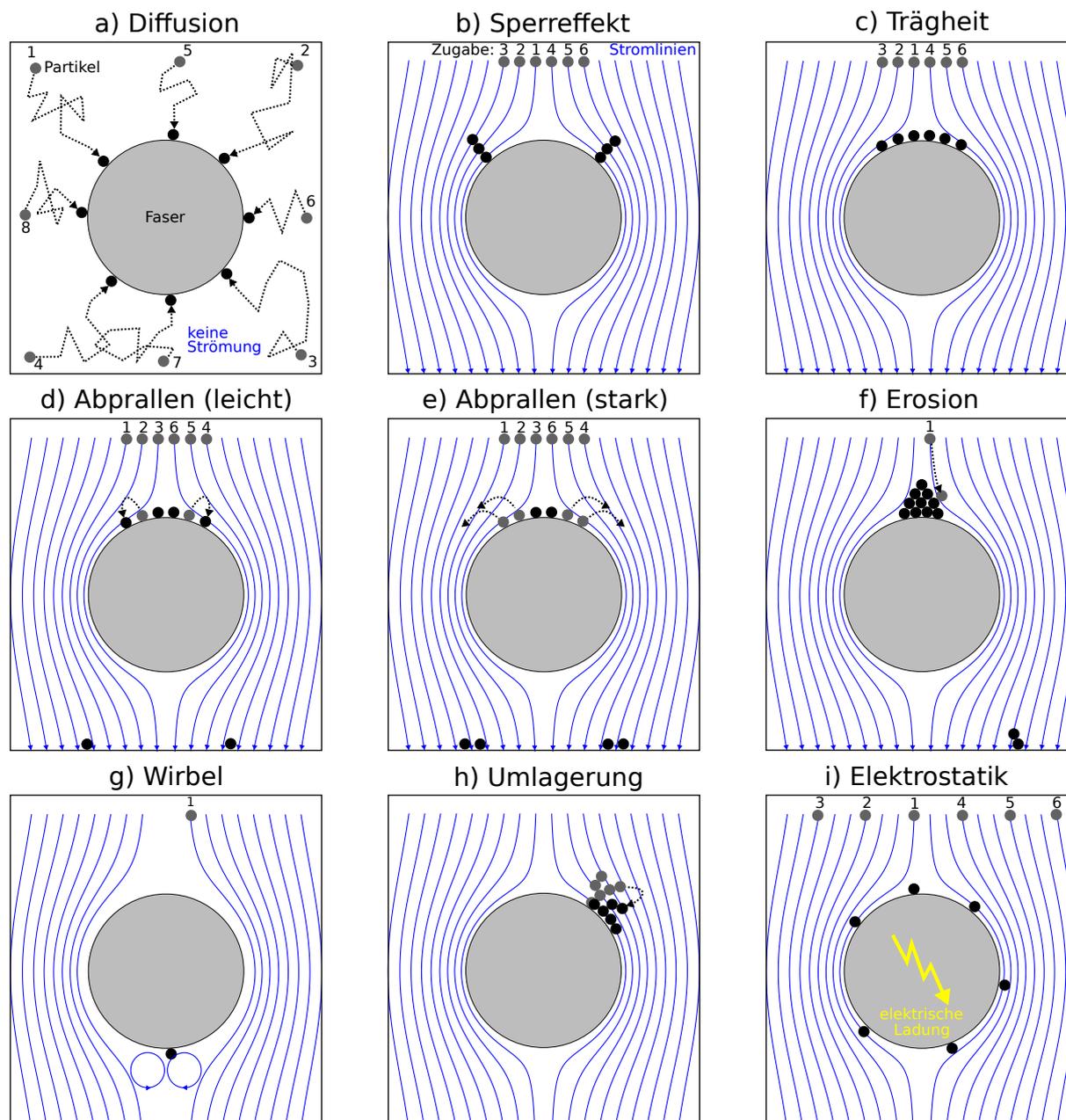


Abbildung 2.1: Vereinfachte und schematische Darstellung der Mechanismen, die sich auf die Morphologie der Partikelstruktur auf einer Faser auswirken. Gezeigt ist jeweils ein Querschnitt der Faser mit Stromlinien (blau) um diese und die Aufgabe- (grau), Zwischen- (grau) und Endpositionen (schwarz) der Partikeln.

Bereich, elektrisch neutralen Partikeln und elektrisch neutraler Faser, dominiert der Mechanismus der Diffusion die Abscheidung. Dabei bewegen sich die Partikeln durch Stöße mit Gasmolekülen regellos durch den Raum und können auf diesem Weg mit der Faser kollidieren. Es wird vermutet, dass die Partikeln in diesem Fall gleichmäßig um die Faser abgeschieden werden [Kanaoka et al., 1986]. Experimentell wurden solche Partikelstrukturen nur für eine Kette aus Kugeln als Kollektor [Charvet et al., 2017] und nicht für Fasern nachgewiesen. Numerische Berechnungen

der Abscheidung ergaben ähnliche Strukturen wie die von Kanaoka vorhergesagten [Przekop und Gradoń, 2008] [Cai und Zhang, 2016] aber auch sternförmige Strukturen [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012].

### *b) Sperreffekt*

Wenn die Strömungsgeschwindigkeit und die Partikeln zu groß für die Diffusionsabscheidung sind und gleichzeitig zu klein für die Trägheitsabscheidung und wenn die elektrostatischen Kräfte vernachlässigbar sind, dominiert der Sperreffekt die Partikelabscheidung. Dabei folgen die Partikeln den Stromlinien (blaue Linien in Abbildung 2.1), welche um die Faser herum führen und kollidieren aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung mit der Faser oder bereits abgeschiedenen Partikeln. Bei der Abscheidung durch den Sperreffekt bilden sich die Partikelstrukturen um die  $45^\circ$  Position stromabwärts des Staupunktes [Cai und Zhang, 2016] und ragen weit zur Seite in die Strömung hinein [Kanaoka et al., 1986] [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012]. Nachdem die ersten Partikeln auf der Faser abgeschieden wurden, werden die folgenden Partikeln hauptsächlich an bereits abgeschiedenen Partikeln abgeschieden [Dong et al., 2019] [Kanaoka et al., 1980] und bilden dadurch kettenförmige, verzweigte Partikelstrukturen, sogenannte Dendriten. Die Ursache für die Bildung dieser Dendriten ist das Abschatten der Faser durch die abgeschiedene Partikelstruktur und die große spezifische Oberfläche der Partikelstruktur, welche die Wahrscheinlichkeit für weitere Abscheidung auf der Struktur erhöht [Tien et al., 1977].

### *c) Trägheit*

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und Masse der Partikeln bleiben diese aufgrund ihrer Trägheit auf ihrer ursprünglichen Bahn, anstatt den Stromlinien um die Faser zu folgen. Solange das Abprallen von Partikeln von der Faser vernachlässigbar ist, führt die zunehmende Trägheit der Partikeln zu einer Verschiebung der Stelle, an welcher sich die Ablagerungen auf der Faser bilden, von den Seiten der Faser hin zu dem Staupunkt [Dong et al., 2019]. So bilden sich Dendriten im Bereich des Staupunktes [Kasper et al., 2010] [Zhu et al., 2015] [Rembor und Kasper, 1999].

### *d bis f) Abprallen und Erosion*

Mit zunehmender kinetischer Energie der Partikeln beginnen diese von der Faser abzuprallen. Das Abprallen tritt zuerst an den Seiten der Faser auf und kann dazu führen, dass die Partikeln weiter stromabwärts erneut mit der Faser kollidieren und dort, aufgrund ihrer durch den ersten Aufprall verringerten kinetischen Energie, abgeschieden werden. In diesem Fall bilden sich drei Zonen verstärkter Partikelablagerung aus, die sich am Staupunkt und an den beiden Seiten der Faser befinden [Kasper et al., 2010] [Schilling et al., 2010]. Mit weiter zunehmender kinetischer Energie der Partikeln werden die Partikelstrukturen kompakter und die beiden seitlichen Ablagerungen verschwinden, weil die Partikeln nach dem ersten Aufprall nicht mehr auf

die Faser treffen oder auch bei der zweiten Kollision mit der Faser abprallen [Kasper et al., 2010].

Verschiedene Mechanismen führen dazu, dass sich die durch Abscheidung von Partikeln hoher Trägheit gebildeten Partikelstrukturen nahe am Staupunkt befinden. Einer dieser Mechanismen ist, dass die Menge der Ablagerungen, bei sich aufgrund hoher Trägheit geradlinig bewegenden Partikeln, an Stellen der Faser mit großer Projektionsfläche in Strömungsrichtung größer ist, da dort auch mehr Partikeln auftreffen [Kostoglou und Konstandopoulos, 2000]. Ein Vergleich zweier Segmente auf der Faser mit gleicher Faseroberfläche macht dies deutlich. Wenn das eine Segment sich eher an der Seite der Faser befindet und das andere Segment direkt am Staupunkt, dann ist die Projektionsfläche und damit die Anzahl an auftreffenden und potentiell abgeschiedenen Partikeln, bei dem Segment am Staupunkt der Faser am größten. Ein weiterer Mechanismus ist, dass Partikeln an den Seiten der Faser eher abprallen und im Fall dass sie doch abgeschieden werden, sich eher wieder durch Strömungskräfte [Li und Marshall, 2007] oder Erosion [Kostoglou und Konstandopoulos, 2000] ablösen. Der Übergang von dendritischen zu kompakten Partikelstrukturen hängt im wesentlichen von dem Prallverhalten der Partikeln ab. Mit zunehmendem Abprallen der Partikeln ändert sich die Partikelstruktur von Dendritisch zu kompakt [Kasper et al., 2010]. Wird die kinetische Energie der Partikeln noch weiter gesteigert, prallen schlussendlich alle Partikeln von der Faser ab.

#### *g und h) Wirbel und Umlagerung*

Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten bilden sich Wirbel hinter der Faser. Partikeln, welche in diese Wirbel eintreten, können durch diese an die Rückseite der Faser transportiert und dort abgeschieden werden [Haugen und Kragset, 2010]. Andere Mechanismen, die zu Partikelablagerungen auf der strömungsabgewandten Seite der Faser führen können, sind die Diffusionsabscheidung [Cai und Zhang, 2016], durch Strömungskräfte verursachte Umlagerungsvorgänge der Partikelstrukturen auf der Faser [Huang et al., 2006] und die elektrostatische Abscheidung [Kanaoka et al., 2001].

#### *i) Elektrostatik*

Sind entweder die Partikeln oder die Faser oder beide elektrisch geladen und ist die Diffusion und die Trägheit der Partikeln vernachlässigbar, dominiert die Abscheidung durch elektrostatische Kräfte. Anziehende elektrostatische Kräfte zwischen Partikeln und Faser können dazu führen, dass die Partikeln von den Stromlinien abkommen und sich auf die Faser zubewegen. Aufgrund abstoßender Kräfte zwischen gleichartigen Ladungen bilden sich lange, weit voneinander entfernte Dendriten in gleichmäßigen Abständen auf der Faser [Huang et al., 2006] [Kanaoka et al., 2001]. Geladene Partikeln bilden analoge Strukturen auf inhomogen geladenen Fasern, aber nur an den Stellen der Faser mit entgegengesetzter elektrischer Ladung [Kanaoka et al., 2001].

Neben den genannten Mechanismen wird in der Literatur von weiteren Einflussgrößen auf die Morphologie der Partikelstruktur berichtet. Beispielsweise resultiert die gleiche Anzahl an Partikeln auf dünneren Fasern in inhomogeneren Partikelstrukturen als auf dickeren Fasern [Przekop und Gradoń, 2014]. Auf Fasern mit einem Ölfilm bilden sich die Partikelstrukturen zuerst in dem Film und bei hoher Beladung bilden sich wiederum Dendriten [Müller et al., 2014]. Bei Fasern mit elliptischem Querschnitt werden die Partikeln verstärkt an den Enden der größeren Halbachse abgeschieden [Huang et al., 2017]. Wird die Strömungsgeschwindigkeit während der Abscheidung erhöht, ändert sich die Morphologie der Partikelstruktur von dendritisch zu kompakt [Schollmeier, 2008].

Die unterschiedlichen Morphologien von Partikelstrukturen auf Filterfasern führen zu einem unterschiedlichen Abscheidegrad und Druckverlust des Filters. Partikelstrukturen, welche durch Diffusionsabscheidung gebildet wurden, führen zu einem größeren Abscheidegrad und größeren Strömungskräften auf die Faser, als durch die Sperreffektabscheidung gebildete Partikelstrukturen und diese wiederum führen zu einem größeren Abscheidegrad und größeren Strömungskräften auf die Faser, als Partikelstrukturen die durch Trägheitsabscheidung gebildet wurden [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012]. Die größeren Strömungskräfte auf die Faser resultieren dabei in einem höheren Druckverlust des Filters. Zusätzlich kann die Porosität der Partikelstruktur die Strömung um Faser und Partikelstruktur beeinflussen [Dunnett und Clement, 2012].

Um vorherzusagen welcher der vorgestellten Mechanismen die Abscheidung und damit die Bildung der Partikelstruktur dominiert, werden in der Literatur gängigerweise vier dimensionslose Kennzahlen verwendet [Kasper et al., 2010] [Kanaoka et al., 1986] [Wessel und Righi, 1988]:

$$\text{Stokes-Zahl: } St = \frac{\rho_P x^2 u C_C \Psi}{18 \eta_F d_{Faser}} \quad (2.1)$$

Die Stokes-Zahl  $St$  beschreibt die Trägheit eines Partikels und wird mit der Partikel-Dichte  $\rho_P$ , dem Partikel-Durchmesser  $x$ , der ungestörten Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts der Faser  $u$ , der Schlupf-Korrektur  $C_C$ , einem Korrekturfaktor für den nicht-Stokes-Bereich  $\Psi$ , der dynamischen Viskosität des Fluides  $\eta_F$  und dem Faserdurchmesser  $d_{Faser}$  berechnet.

$$\text{Faser-Reynolds-Zahl: } Re_{Faser} = \frac{\rho_F u d_{Faser}}{\eta_F} \quad (2.2)$$

Die Faser-Reynolds-Zahl  $Re_{Faser}$  charakterisiert die Strömung um die Faser. Für ihre Berechnung wird noch die Fluid-Dichte  $\rho_F$  benötigt.

$$\text{Peclet-Zahl: } Pe = \frac{u d_{Faser}}{D} \quad (2.3)$$

Die Peclet-Zahl hängt vom Diffusionskoeffizient  $D$  des Partikel ab und beschreibt somit die Diffusion.

$$\text{Sperreffekt-Parameter: } R = \frac{x}{d_{Faser}} \quad (2.4)$$

Der Sperreffekt-Parameter ist das Durchmesser Verhältnis von Partikel und Faser und ist ausschlaggebend für die Abscheidung über den Sperreffekt. Der Diffusionskoeffizient zur Berechnung der Peclet-Zahl kann mit der Stokes-Einstein-Gleichung berechnet werden [Hinds, 2012]:

$$D = \frac{kT C_C}{3\pi\eta_F x} \quad (2.5)$$

Hierbei ist  $k$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur. Die Schlupf-Korrektur  $C_C$  und die dafür benötigte mittlere freie Weglänge  $\lambda$  ergeben sich aus [Hinds, 2012]:

$$C_C = 1 + \frac{\lambda}{x} \left( 2,34 + 1,05 \exp\left(-0,39 \frac{x}{\lambda}\right) \right) \quad (2.6)$$

$$\lambda = \frac{RT}{\sqrt{2} N_A p \pi \Sigma^2} \quad (2.7)$$

Mit der idealen Gaskonstanten  $R$ , der Avogadro-Konstanten  $N_A$ , dem Druck im Fluid  $p$  und dem Kollisionsdurchmesser der Moleküle  $\Sigma$ . Für Luft bei 298 K beträgt dieser Kollisionsdurchmesser 0,3699 nm [Glassman und Harris, 1952]. Der Korrekturfaktor  $\Psi$  für den nicht-Stokes-Bereich kann mit der Partikel-Reynolds-Zahl  $Re_P$  berechnet werden [Wessel und Righi, 1988]:

$$Re_P = \frac{x u \rho_F}{\eta_F} \quad (2.8)$$

$$\Psi = \frac{3 \left( \sqrt{0,158} Re_P^{1/3} - \tan^{-1} \left( \sqrt{0,158} Re_P^{1/3} \right) \right)}{0,158^{3/2} Re_P} \quad (2.9)$$

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick der Morphologien von Partikelstrukturen, welche für unterschiedliche Kombinationen der dimensionslosen Kennzahlen in der Literatur berichtet werden.

Tabelle 2.1: Nach verschiedenen Quellen beobachtete Partikelstrukturen bei verschiedenen Kombinationen von  $St$ ,  $R$ ,  $Re_{Faser}$ ,  $Pe$  und elektrischer Ladung. Zahlenwerte in Klammern wurden nachträglich berechnet und sind nicht explizit in den Quellen angegeben.

Quelle	Struktur	Methode	el. Ladung	St	R	$Re_{Faser}$	Pe
Przekop und Gradoń [2008]	Ablagerungen um die Faser herum	theoretisch	keine	$(2,38 \cdot 10^{-2})$	(1)	$(1,56 \cdot 10^{-6})$	$(3,13 \cdot 10^{-2})$
Cai und Zhang [2016]	Ablagerungen um die Faser herum	theoretisch	keine	$(7,93 \cdot 10^{-2})$	0,08	0,034	$1,56 \cdot 10^3$
Dong et al. [2019]	Ablagerungen um die Faser herum	theoretisch	keine	$(1,55 \cdot 10^{-2})$	(0,04)	(0,144)	$(5,59 \cdot 10^4)$
Kanaoka et al. [1980]	seitliche Ablagerungen	theoretisch	keine	0	0,1	-	-
Kanaoka et al. [1986]	seitliche Ablagerungen	experimentell	keine	$(1,33 \cdot 10^{-3})$	0,072	$(1,63 \cdot 10^{-3})$	245
Tien et al. [1977]	seitliche Ablagerungen	theoretisch	keine	(0,178)	(0,207)	$(7,84 \cdot 10^{-2})$	$(8,45 \cdot 10^4)$
Cai und Zhang [2016]	seitliche Ablagerungen	theoretisch	keine	$(7,27 \cdot 10^{-2})$	0,05	0,134	$(1,67 \cdot 10^4)$
Dong et al. [2019]	Dendriten auf der Anströmseite	theoretisch	keine	$(4,75 \cdot 10^{-2})$	(0,03)	(0,721)	$(1,99 \cdot 10^5)$
Zhu et al. [2015]	Dendriten auf der Anströmseite	theoretisch	keine	0	(0,1)	-	-
Rembor und Kasper [1999]	Dendriten auf der Anströmseite	experimentell	keine	$(7,13 \cdot 10^{-2})$	$(3,57 \cdot 10^{-2})$	(0,999)	$(6,09 \cdot 10^5)$
Li und Marshall [2007]	Dendriten auf der Anströmseite	theoretisch	keine	(0,241)	(0,05)	(0,178)	$(1,88 \cdot 10^5)$
Kasper et al. [2010]	Dendriten auf der Anströmseite	experimentell	keine	(0,327)	0,04	(2,94)	$(2,22 \cdot 10^6)$
Kanaoka et al. [1986]	Dendriten auf der Anströmseite	experimentell	keine	(0,614)	$(1,43 \cdot 10^{-2})$	(11,8)	$(5,57 \cdot 10^6)$
Schilling et al. [2010]	drei Ablagerungs-Bereiche	theoretisch	keine	(0,6)	-	-	-
Kasper et al. [2010]	drei Ablagerungs-Bereiche	experimentell	keine	(1,52)	0,08	(4,11)	$(6,56 \cdot 10^6)$
Cai und Zhang [2016]	kompakte Strukturen am Staupunkt	theoretisch	keine	(0,468)	0,1	0,375	$(4,67 \cdot 10^5)$
Rembor und Kasper [1999]	kompakte Strukturen am Staupunkt	experimentell	keine	$(0,560)$	$(3,57 \cdot 10^{-2})$	8,29	$(5,05 \cdot 10^6)$
Zhu et al. [2015]	kompakte Strukturen am Staupunkt	theoretisch	keine	(1,99)	0,1	-	-
Kasper et al. [2010]	kompakte Strukturen am Staupunkt	experimentell	keine	(2,96)	0,08	(8,03)	$(1,28 \cdot 10^7)$
Schilling et al. [2010]	kompakte Strukturen am Staupunkt	theoretisch	keine	(1,2)	-	-	-
Huang et al. [2006]	distanzierte Dendriten	experimentell	geladen	(0,264)	0,075	0,34	$(3 \cdot 10^5)$
Kanaoka et al. [2001]	distanzierte Dendriten	experimentell	geladen	$(7,48 \cdot 10^{-3})$	(0,013)	0,294	$(5 \cdot 10^4)$

Die Literaturübersicht in Tabelle 2.1 zeigt, dass mit steigender Stokes-, Peclet- und Reynolds-Zahl die abgeschiedenen Partikelstrukturen sich zuerst um die ganze Faser herum, dann an den Seiten der Faser und dann nahe des Staupunktes befinden. Nahe des Staupunktes bilden sich zuerst Dendriten und mit steigender Stokes-, Peclet- und Reynolds-Zahl, dann drei Ablagerungsbereiche und schließlich kompakte Strukturen. Ein steigender Sperrereffekt-Parameter kann von kompakten Strukturen wieder zu dendritischen führen. Elektrostatische Effekte führen zu distanzierten Dendriten auf der Faser.

In Anlehnung an [Kanaoka et al., 1986] und [Kasper et al., 2010] können die Bereiche der dimensionslosen Kennzahlen, in denen sich verschiedene Morphologien der Partikelstruktur ergeben, wie in Abbildung 2.2 dargestellt werden.

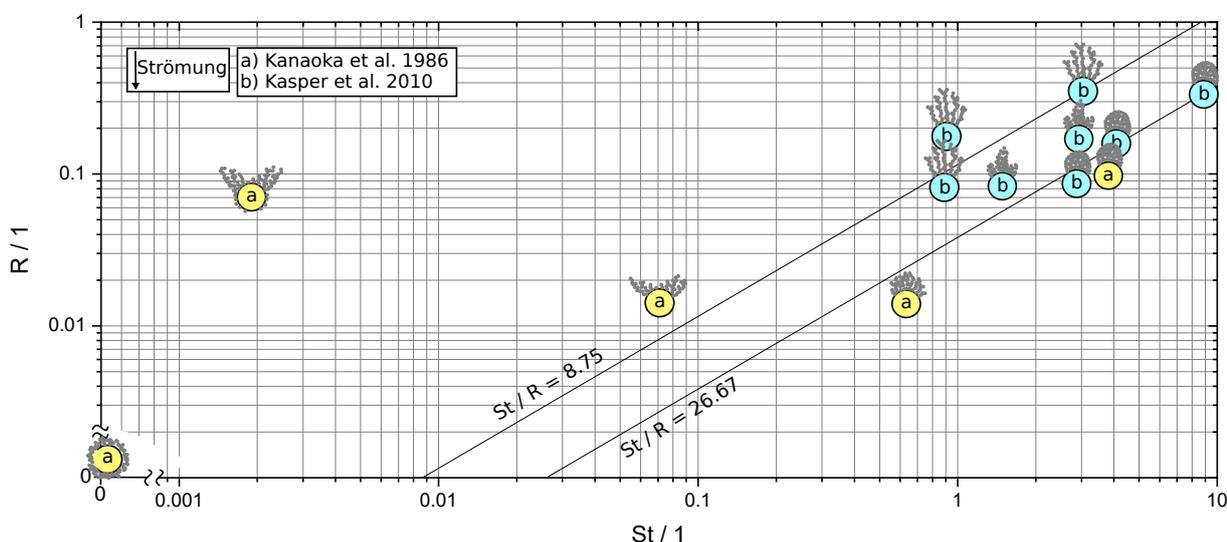


Abbildung 2.2: Morphologie von auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen, bei verschiedenen Stokes-Zahlen  $St$  und Sperrereffekt-Parametern  $R$ . Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Nach dieser Auftragung hängt die Morphologie der sich ausbildenden Partikelstruktur nur von der Stokes-Zahl und dem Sperrereffekt-Parameter ab. [Kasper et al., 2010] führt beide Größen in einem Prall-Parameter  $\beta$  zusammen:

$$\beta = u \cdot x = \frac{18 \eta_F St}{\rho_P R} \quad (2.10)$$

Der Prall-Parameter entspricht keiner bei Stoßvorgängen gängigen physikalischen Größe wie beispielsweise dem Impuls oder der kinetischen Energie des Partikels. Kombinationen des Sperrereffekt-Parameters und der Stokes-Zahl mit gleichem Prall-Parameter liegen bei konstanter Dichte des Partikels und konstanter dynamischer Viskosität des Fluides, auf Geraden mit der Steigung 1 in Abbildung 2.2 und eignen sich gut um die von [Kasper et al., 2010] beobachteten

Strukturen voneinander abzugrenzen. Hier muss angemerkt werden, dass der Prall-Parameter nicht von allen in der Stokes-Zahl und dem Sperreffekt-Parameter enthaltenen Größen, wie der Partikeldichte, dem Faserdurchmesser, der dynamischen Viskosität des Fluides, der Dichte des Fluides, dem Druck und der Temperatur, abhängt. Da der Prall-Parameter nicht alle Einflussgrößen enthält, ist zu erwarten, dass die Morphologie der Partikelstruktur, die sich bei gleichem Prall-Parameter bildet, von der von [Kasper et al., 2010] beobachteten abweichen kann, sobald die nicht im Prall-Parameter enthaltenen Einflussgrößen stark von denen in den Experimenten von Kasper et al. abweichen. Analog ist fraglich inwieweit Abbildung 2.2 insbesondere im Diffusionsbereich zur Vorhersage der Morphologie der Partikelstruktur verwendet werden kann, da die Diffusion und damit die Peclet-Zahl, weitaus stärker zum Beispiel von der Temperatur abhängt, als dies bei der Stokes-Zahl und dem Sperreffekt-Parameter der Fall ist. Eine Beschreibung der Bedingungen, die zu Partikelstrukturen mit unterschiedlichen Morphologien führen, ist somit immer nur vollständig, sobald alle möglichen Einflussgrößen in den dimensionslosen Kennzahlen enthalten sind. Damit ist auch die Beschreibung über die Stokes-Zahl, die Partikel- und Faser-Reynolds-Zahl, die Peclet-Zahl und den Sperreffekt-Parameter noch nicht vollständig, da sie den Mechanismus der elektrostatischen Partikelabscheidung noch nicht einschließt und Einflussgrößen auf die Morphologie der Struktur, wie die Haftkräfte zwischen den Partikeln der Partikelstruktur und zwischen der Partikelstruktur und der Faser, nicht beachtet werden. Diese Haftkräfte spielen bei Mechanismen wie Umlagerung, Erosion und Ablösung jedoch eine Rolle und können sich damit auf die Morphologie der Partikelstruktur auswirken.

Die Untersuchungen in dieser Literaturübersicht wurden meist mit monodispersen Partikeln eines Partikelmaterials durchgeführt. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen ist nicht ersichtlich, welche Strukturen bei der gleichzeitigen oder aufeinander folgenden Abscheidung verschiedener Partikelmaterialien mit unterschiedlichen Eigenschaften entstehen. In dieser Arbeit sollen hauptsächlich Partikelstrukturen bestehend aus Propanruß und Glaskugeln gebildet werden. Die Abscheidung von Propanruß geschieht dabei über den Sperreffekt und die Diffusion, wohingegen die Abscheidung der Glaskugeln über Trägheitsabscheidung erfolgt. Laut Literatur sollte Propanruß deshalb dendritische Partikelstrukturen seitlich des Staupunktes bilden, wobei die Glaskugeln Strukturen mit drei Ablagerungsbereichen in der Nähe des Staupunktes bilden sollten. Aus der vorgestellten Literatur ist nicht bekannt, welche Morphologie eine Partikelstruktur aufweist, welche bei der gleichzeitigen Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln entsteht. Des Weiteren ist bisher unbekannt, ob auf der Faser gebildete Rußdendriten von Glaskugeln abgeschlagen werden. Im Folgenden wird deshalb zuerst ein Versuchsaufbau vorgestellt (Kapitel 2.2), mit dem ein reaktiv-inertes Aerosol aus Propanruß und Glaskugeln erzeugt und die Partikeln auf einer Faser abgeschieden werden können. Anschließend wird das Aerosol charakterisiert (Kapitel 2.3.1) und die bei der Abscheidung entstandene Partikelstruktur untersucht (Kapitel 2.3.2).

## 2.2 Material und Methoden zur Erzeugung und Charakterisierung eines Aerosols aus Propanruß und Glaskugeln in Luft und zur Abscheidung der Partikeln auf einer Faser

### 2.2.1 Apparatur zur Erzeugung des Aerosols

Für die Untersuchung der Morphologie von Partikelstrukturen, aus mehreren Partikelmaterialien, auf einer einzelnen Faser, werden Propanruß und Glaskugeln (Spherglass 5000 CP00, Firma Potters Industries LLC) verwendet. Der Propanruß wird in einem Rußgenerator (miniCAST 6204C, Firma Jing Ltd.) durch Einblasen eines Stickstoffstrahls in eine Propanflamme hergestellt. Durch den Stickstoffstrahl wird die Verbrennung gestoppt/gequencht und verläuft dadurch unvollständig, wodurch ein Aerosol mit einer hohen Konzentration an Rußpartikeln entsteht. Die Betriebsbedingungen des Rußgenerators sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2: Betriebsbedingungen des Rußgenerators

Gas	Volumenstrom / ( $l_N/min$ )
Propan	0,05
Quench-Stickstoff	2,0
Verbrennungs-Luft	1,0
Mischungs-Stickstoff	0,0
Verdünnungs-Luft	0,0

Die Glaskugeln werden mit einer Förderschnecke aus einem durchmischten Vorratsbehälter auf einen rotierenden Dosierring gefördert. Überschüssige Glaskugeln werden vom Ring abgestreift und die auf dem Ring verbleibenden Kugeln mit einer Venturi-Düse abgesaugt und in Luft dispergiert (SAG 410U, Firma Topas GmbH). Die Betriebsbedingungen dieses Dispergierers sind in Tabelle 2.3 aufgeführt. Für die Parameter wurden Bereiche angegeben da es erforderlich war den Dispergierer während der Arbeit nachzujustieren, um den Massenstrom an Glaskugeln näherungsweise konstant zu halten.

Tabelle 2.3: Betriebsbedingungen des Dispergierers

Parameter	Zahlenwert
Förderrate der Schnecke / 1	4/6
Geschwindigkeit des Dosierrings / %	5 bis 10
Höhe des Abstreifers / mm	5 bis 5,74
Vordruck / barg	1,5 bis 1,6
Breite Dosierring / mm	1,2

Die gesamte Apparatur zur Erzeugung von Aerosolen aus Propanruß und Glaskugeln in Luft mit zusätzlicher Faserbeladung ist in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Die Aerosolerzeugung

ist dabei mit einem grau gestrichelten Kasten markiert, der in den folgenden Abbildungen symbolisch für den in Abbildung 2.3 markierten Aufbau steht.

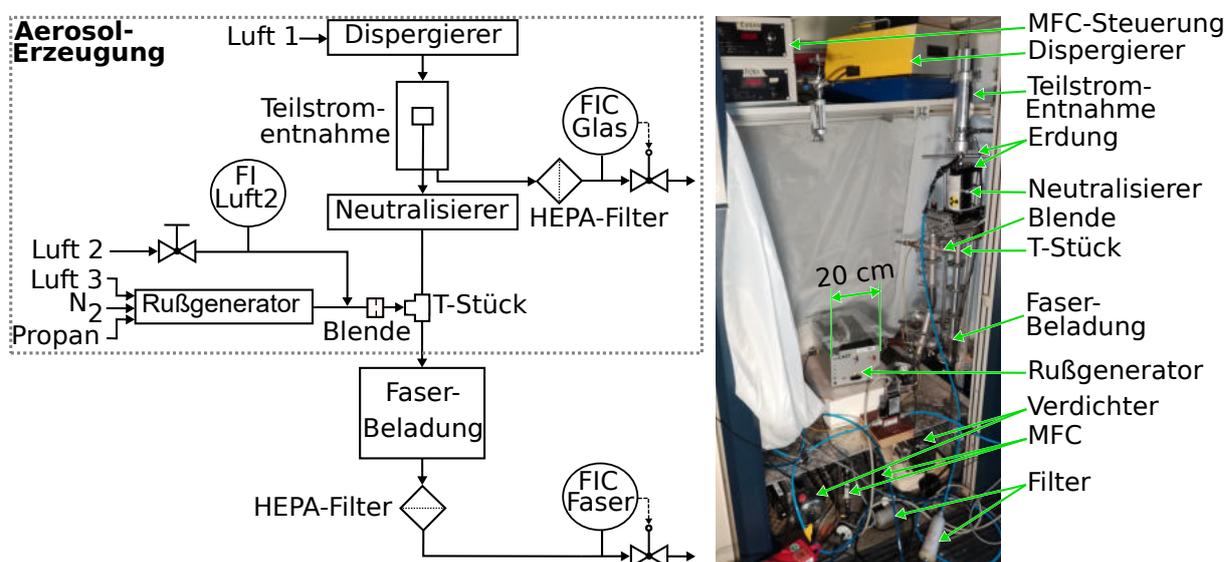


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Apparatur zur Erzeugung eines Aerosols bestehend aus Propanruß und Glaskugeln in Luft und zur Abscheidung der Partikeln auf einer einzelnen Faser (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]).

Da der Rußgenerator bei den Einstellungen in Tabelle 2.2 einen Massenstrom an Propanruß von ca. 40 mg/h erzeugt und der Dispergierer bei den Einstellungen in Tabelle 2.3 einen Massenstrom an Glaskugeln von ca. 7 g/h, ist eine Teilstromentnahme nach dem Dispergierer notwendig, um ein Verhältnis der beiden Massenströme von 1:1 zu realisieren. In der Teilstromentnahme werden somit ca. 40 mg/h von dem gesamten dispergierten Massenstrom an Glaskugeln abgespalten. Sie besteht aus einem Rohr mit einem Durchmesser von 50 mm, in welchem sich ein Probenahmekopf mit einem Durchmesser von 12 mm in coaxialer Anordnung befindet. Durch den Probenahmekopf treten die ca. 40 mg/h an Glaskugeln aus der Teilstromentnahme aus. Der Rest des dispergierten Glaskugel-Massenstroms wird in einem HEPA-Filter (HEPA-Capsule, Firma Pall GmbH) abgeschieden. Ein Mass-Flow-Controller (MFC)(GE50A, Firma MKS Instruments Inc.) mit der Bezeichnung „FIC Glas“ sorgt für eine definierte Abspaltung dieses Exzess-Stromes. Auf die Teilstromentnahme folgt ein Kr-85-Neutralisierer. Dieser dient dazu die elektrische Ladung der Glaskugeln an die des Propanrußes anzupassen, da die Glaskugeln nach dem Dispergieren eine höhere elektrische Ladung als der Propanruß aufweisen [Johnston et al., 1987] [Onischuk et al., 2003]. Nach dem Neutralisierer tritt das Glaskugel-Aerosol in ein T-Stück ein, in dem es mit dem Propanruß-Aerosol gemischt wird.

Das Propanruß-Aerosol aus dem Rußgenerator kann optional mit Luft verdünnt werden. Hierzu dient der Durchflussmesser (4140, Firma TSI GmbH) mit der Bezeichnung „FI Luft2“. Diese Ver-

dünnung ist eine von zwei Möglichkeiten die Strömungsgeschwindigkeit bei der zu beladenden Faser zu ändern. Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung verschiedener Rohrdurchmesser bei der Faser (die Konstruktion der Beladekammern und Faserhalter wird in Kapitel 2.2.3 näher erläutert). Beide Möglichkeiten werden während dieser Arbeit genutzt um mehr Flexibilität bezüglich Strömungsgeschwindigkeit und Design des Faserhalters zu ermöglichen. Stromabwärts des Rußgenerators befindet sich eine Blende. Diese Blende dient dazu das Ruß-Aerosol zu durchmischen, da es am Austritt des Rußgenerators nicht gleichmäßig über den gesamten Rohrquerschnitt verteilt ist. Durch die Blende wird der kreisförmige, durchströmte Querschnitt von 25 mm auf 8,5 mm reduziert und wieder auf 25 mm erweitert. Die Wirkung der Blende wird in Kapitel 2.3.1 nachgewiesen. Zwischen Blende und Rußgenerator befinden sich drei weitere Bauteile, welche zum Zweck einer besseren Übersicht nicht in Abbildung 2.3 eingezeichnet wurden. Dabei handelt es sich um Sicherheitsventile gegen Überdruck (Sicherheitsventil mit Öffnungsdruck von 0,2 bis 0,8 barg, ESSKA.de GmbH), Unterdruck (Vakuumregler mit Fremdleckage und Öffnungsdruck von -0,33 bis -1 barg, Landefeld Druckluft und Hydraulik GmbH) und einen Kugelhahn am tiefsten Punkt der Aerosolerzeugung. Der Kugelhahn wird dazu verwendet Wasser, das bei der Verbrennung im Rußgenerator entsteht und in den Rohrleitungen auskondensiert, in regelmäßigen Abständen, batchweise, aus der Apparatur abzulassen. Versuche das Ruß-Aerosol mit Hilfe einer Kühlfalle oder eines Nafiontrockners zu trocknen waren erfolglos. Nach der Blende trifft das Propanruß-Aerosol in einem T-Stück auf das Glaskugel-Aerosol.

Die hier vorgestellte Apparatur kann reaktiv-inerte Aerosole bestehend aus Propanruß und Glaskugeln in Luft erzeugen. Die Verwendung anderer Partikelmaterialien ist möglich, solange diese sich vom Dispergierer dispergieren lassen. In den folgenden Untersuchungen wurde teilweise nur Propanruß-Aerosol oder Inertmaterial-Aerosol und kein Mischaerosol verwendet. Dafür kann entweder der Rußgenerator oder der Dispergierer abgestellt und der entsprechende Volumenstrom z.B. über die Luft 2 ersetzt werden.

## 2.2.2 Methoden zur Charakterisierung des Aerosols

In diesem Kapitel werden Methoden vorgestellt, welche die Charakterisierung des mit der Apparatur aus Kapitel 2.2.1 erzeugten reaktiv-inerten Aerosols ermöglichen. Im Hinblick auf die Beladung einer einzelnen Faser mit Partikeln des Aerosols, sind dabei insbesondere die Partikelgrößenverteilung, die Partikelform, die Massenströme, das reaktiv-inert-Massenverhältnis, und die Verteilung der Partikeln über den gesamten durchströmten Querschnitt von Interesse.

Zur Messung der Partikelgrößenverteilung werden zwei verschiedene Messgeräte verwendet. Bei dem ersten Messgerät handelt es sich um einen Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS),

der Partikeln definiert elektrisch lädt, in einem elektrischen Feld klassiert (3082 classifier mit 3081 DMA, Firma TSI GmbH) und anschließend mit einem Kondensationskernzähler (3756 UCPC, Firma TSI GmbH) zählt. Aufgrund dieses Messprinzips entspricht die vom SMPS gemessene Partikelgröße dem Durchmesser einer Kugel mit gleicher elektrischer Mobilität. Der Messbereich des SMPS beträgt 14 bis 710 nm. Das zweite Messgerät ist ein Optical Particle Counter (OPC) (welas 2070 sensor mit Promo 2000 H, Firma Palas GmbH), der Partikeln anhand ihres Streulichtsignals zählt und die Größe anhand der Intensität des Streulichtes bestimmt. Die mit dem OPC bestimmte Partikelgröße entspricht damit dem Durchmesser einer Kugel mit definierten optischen Eigenschaften und gleicher Streulichtintensität wie der des gemessenen Partikels. Das OPC kann auf verschiedene Messbereiche an Partikelgrößen kalibriert werden. Für das Materialsystem in dieser Arbeit wurde der größte Messbereich des OPCs mit 583 bis 40706 nm gewählt. Dies entspricht dem Messbereich des Gerätes mit den größten Partikeln. Bei einem Messbereich mit kleinerer unterer Messgrenze konnte bei Vorhandensein von Propanruß, aufgrund von Koinzidenz, nicht gemessen werden. Auch bei der größeren unteren Messgrenze ist unbekannt wie sich eine große Anzahl an Partikeln im Aerosol unterhalb der unteren Messgrenze auf die Messung auswirkt. Aufgrund der unterschiedlichen Messprinzipien und Äquivalentdurchmesser, können die Ergebnisse beider Messgeräte voneinander abweichen.

Die Versuchsaufbauten zur Messung der Partikelgrößenverteilung mit dem SMPS und dem OPC sind in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt.

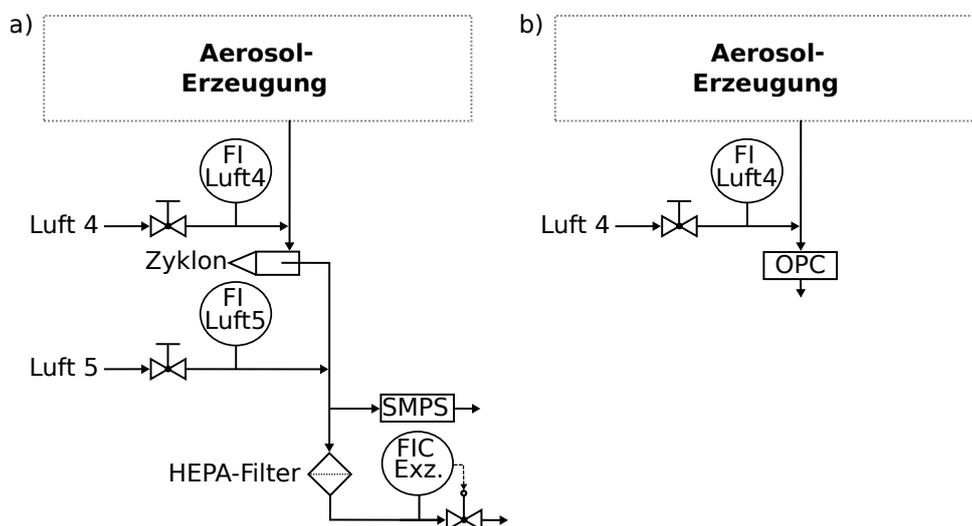


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung der Partikelgrößenverteilung mit dem SMPS (a) oder dem OPC (b)

Um die Partikelgrößenverteilung zu messen, die das Aerosol bei der zu beladenden Faser aufweist, wird die Probenahme für das Messgerät möglichst nahe an der Position der zu beladenden Faser durchgeführt. Bei der Messung mit dem SMPS ist eine Verdünnung notwendig, um die ma-

ximale Konzentration von  $300000 \text{ Partikeln/cm}^3$ , unter welcher der Kondensationskernzähler im Einzelzählmodus misst, nicht zu überschreiten. Zusätzlich wird bei der Messung mit dem SMPS ein Zyklon (URG-2000-30E-5-2.5-S, Firma URG Corporation) verwendet, um große Partikeln ( $> 2,5 \mu\text{m}$ ) außerhalb des Messbereichs abzuschneiden, da diese sonst den Impaktor am Eintritt des SMPS verstopfen und damit die Messung verfälschen könnten. Die bei dem OPC vorhandene Verdünnung mit Luft 4 dient lediglich dazu den erforderlichen Probenahme-Volumenstrom des OPC zu realisieren.

Die Bestimmung der Massenströme erfolgt über Beladung eines Filters für eine definierte Zeit und Wägung. Abbildung 2.5 zeigt die Position dieses Gravimetrie-Filters zur Bestimmung der Massenströme unmittelbar nach der Faserbeladung. Da die Faser weniger als 1 % der durchströmten Querschnittsfläche blockiert, entsprechen die Massenströme stromabwärts der Faser näherungsweise denen unmittelbar vor der Faser.

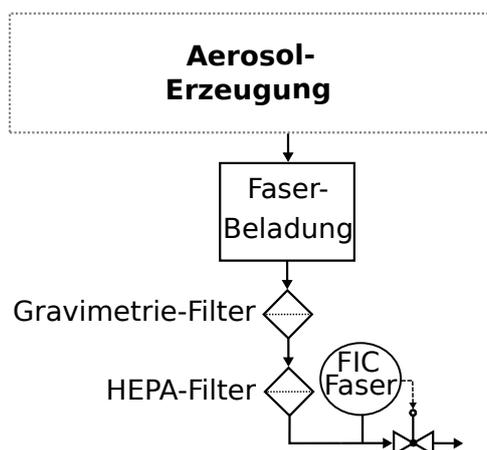


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Position des Gravimetrie-Filters in der Apparatur, zur Bestimmung der Massenströme.

Die gesamte auf dem Filter abgeschiedene Masse setzt sich zusammen aus den Massen verschiedener Materialien. Im Falle des Propanruß-Glaskugel-Aerosols, sind das die Massen von Propanruß, Glaskugeln und Wasser. Um die Massen der verschiedenen Materialien zu unterscheiden und damit die Massenströme der einzelnen Komponenten zu bestimmen, wird die in Abbildung 2.6 schematisch dargestellte Analysetechnik verwendet.

Bei dieser Analysetechnik werden bindemittelfreie Quarzfaserfilter (MN QF-10, Firma Macherey-Nagel GmbH & Co. KG) verwendet. Ein neuer Filter wird zuerst für eine Stunde bei  $500^\circ\text{C}$  im Ofen konditioniert. Die Masse des heißen Filters  $m_0$  wird unmittelbar nach der Entnahme aus dem Ofen durch Wägung bestimmt. Eine Aufenthaltszeit des Filters im Ofen von 100 Minuten führt dabei zu einer um weniger als 5 % größeren Massenabnahme als bei 60 Minuten Aufenthaltszeit, was Auskunft über den durch die beschränkte Aufenthaltszeit verursachten Messfehler

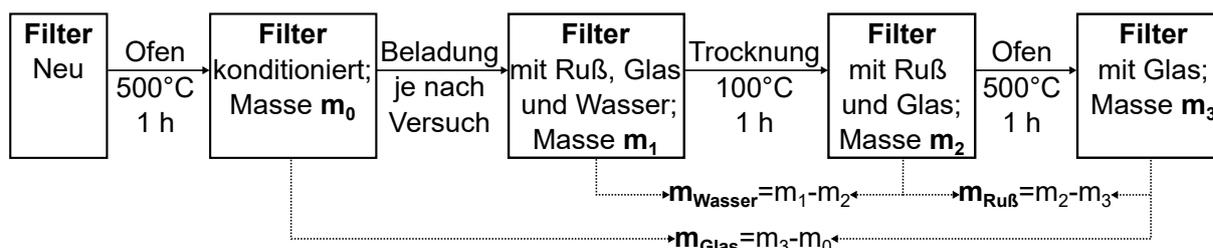


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Analysetechnik zur Bestimmung der Massen an Wasser, Glas und Ruß aus einer auf einem Filter abgeschiedenen Mischung dieser drei Stoffe.

gibt. Anschließend wird der konditionierte Filter mit Propanruß, Glaskugeln und Wasser beladen. Wägung unmittelbar nach der Beladung ergibt die Masse  $m_1$ . Der frisch beladene Filter wird für eine Stunde im Trockenschrank bei 100°C getrocknet und die Masse des getrockneten Filters  $m_2$  bestimmt. Die beschränkte Aufenthaltszeit im Trockenschrank führt hierbei zu einem Fehler kleiner 1 %. Aus der Differenz der Massen des beladenen und getrockneten Filters  $m_2$  und des frisch beladenen Filters  $m_1$  wird die Masse an Wasser und mit der Beladungszeit der Massenstrom an Wasser bestimmt. Zuletzt wird der Propanruß durch einen Aufenthalt bei 500°C im Ofen für eine Stunde verbrannt und die Masse des ausgebrannten Filters  $m_3$  bestimmt. Der Fehler für die beschränkte Aufenthaltszeit im Ofen ist kleiner als 5 %. Aus der Differenz der Massen des ausgebrannten Filters  $m_3$  und des getrockneten Filters  $m_2$  kann die Masse an Propanruß und aus der Differenz der Massen des ausgebrannten Filters  $m_3$  und des konditionierten Filters  $m_0$  die Masse an Glaskugeln berechnet werden. Die jeweiligen Massenströme ergeben sich aus den bestimmten Massen mit der entsprechenden Beladungszeit des Filters.

Die Untersuchung der Partikelform wird mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt. Dazu werden Partikeln analog zu dem Aufbau in Abbildung 2.5 auf Filtern oder Nucleopore-Membranen (PC MB 47MM 0.2 UM, Firma Whatman International Ltd.) abgeschieden und unter einem REM (S-4500, Firma Hitachi High-Tech Europe GmbH) analysiert.

Die Konzentrationsverteilung der Partikeln über den durchströmten Querschnitt kann qualitativ mit Hilfe dünner Papiertücher oder dünner Stoffstücke erfasst werden. Dazu wird ein entsprechendes Papiertuch an der gewünschten Stelle der Apparatur zwischen den Rohrbauteilen eingeklemmt und für kurze Zeit beladen. Abgeschiedener Ruß färbt ein weißes Papiertuch, insbesondere an Stellen hoher Konzentration, schwarz und die Glaskugeln färben ein schwarzes Stück Stoff, an Stellen hoher Konzentration, weiß. Anhand der Färbung kann qualitativ bewertet werden ob die Partikeln gleichmäßig über den durchströmten Querschnitt verteilt sind. Eine ungleichmäßige Verteilung der Partikeln über den durchströmten Querschnitt führt zu unregelmäßigen Partikelstrukturen auf der Faser.

### 2.2.3 Apparatur zur Abscheidung von Partikeln auf einer einzelnen Faser und Methoden zur Untersuchung der entstandenen Struktur

Die Halterung der Faser, die Strömungsbedingungen bei der Faser und die Methoden zur Analyse der auf der Faser abgeschiedenen Partikelstruktur sind Gegenstand dieses Kapitels. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene Faserhalter verwendet, die in Abbildung 2.7 gezeigt sind.

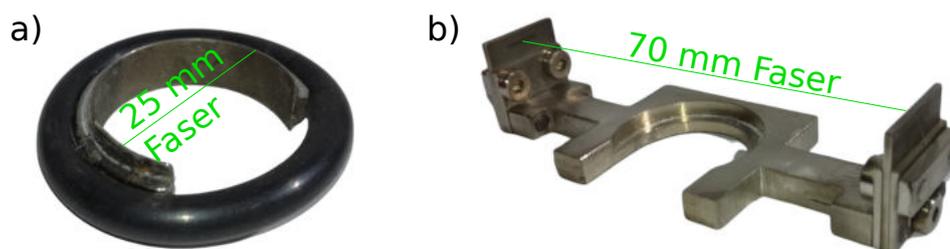


Abbildung 2.7: a) Zeigt den Faserhalter der in Kapitel 2 für die Untersuchung der Morphologie der Partikelstruktur verwendet wird und b) zeigt den Faserhalter, der in Kapitel 3 zur Untersuchung der Ablösung verwendet wird. Die Faser ist jeweils grün markiert und ihre freie Länge wird angegeben.

Der Faserhalter zur Untersuchung der Morphologie der abgeschiedenen Partikelstrukturen (Abbildung 2.7 (a)) besteht aus einem ISO-KF-Zentrierring und einem O-Ring zur Dichtung (Firma Pfeiffer Vacuum GmbH). Die  $40\ \mu\text{m}$  Stahlfaser wird dabei an den Zentrierring geklebt. Die Verwendung eines für Vakuum-Kleinflansch-Bauteile standardisierten Zentrierrings als Faserhalter ermöglicht viele verschiedene Einbaumöglichkeiten in die Apparatur. Zusätzlich findet bei dieser Art Faserhalter keine Änderung des durchströmten Querschnitts in der Nähe der Faser statt, welche die Abscheidung beeinflussen könnte. Ein Segment des Zentrierrings in Abbildung 2.7 wurde entfernt, um die optische Analyse der Partikelstruktur von der Seite zu ermöglichen.

Faserhalter (b) in Abbildung 2.7 besteht aus dem hitzebeständigen Edelstahl 1.4841 (Firma M. Woite GmbH) und wird für die Untersuchung der Ablösung in Kapitel 3 verwendet, da er eine bessere optische Zugänglichkeit, insbesondere der Laserband-Streulichtmesstechnik, ermöglicht. Dieser Faserhalter besitzt zwei Platten, in welche jeweils 25 Löcher mit einem Durchmesser von  $170\ \mu\text{m}$  und einem Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt von  $246\ \mu\text{m}$  mittels Laserbohren eingebracht wurden. Diese Platten ermöglichen die Befestigung mehrerer paralleler Fasern. In der vorliegenden Arbeit wird immer nur eine  $40\ \mu\text{m}$  Stahlfaser eingebaut, welche an beiden Enden am Faserhalter eingeklemmt wird.

Bei beiden Faserhaltern wurde eine Stahlfaser verwendet, da mit dieser elektrostatische Effekte bei der Partikelabscheidung reduziert werden. Des Weiteren weist eine Stahlfaser eine hohe

Festigkeit auf, was die Spannung der Faser zur Vermeidung von Schwingungen ermöglicht und sie ist bei den auftretenden Temperaturen beständig. Zwischen den Versuchen wird die Faser mit Ethanol gereinigt und nachgespannt.

Die Einbausituation der Faserhalter in die Faserbeladung aus Abbildung 2.3 ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

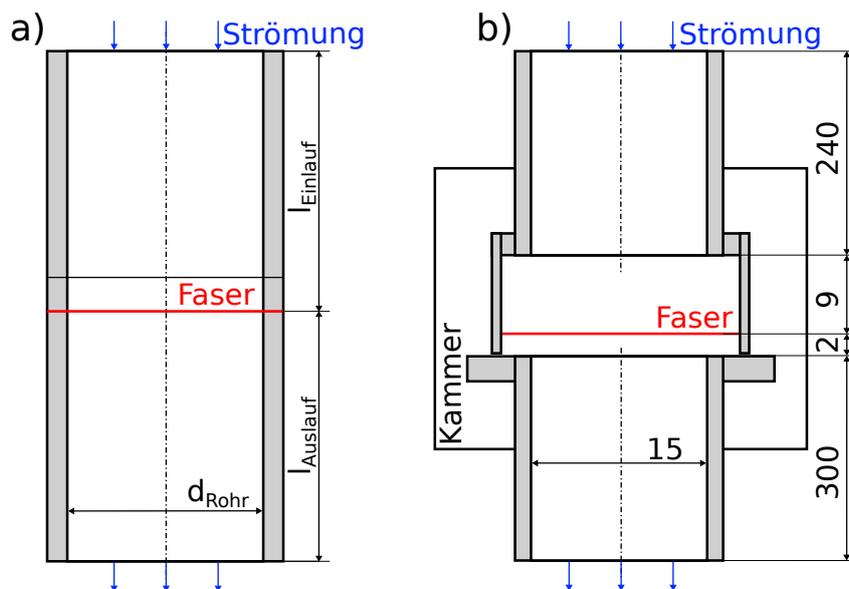


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der eingebauten Faserhalter aus Abbildung 2.7. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu.

Abbildung 2.8 zeigt, dass bei Faserhalterung (a) der Zentrierring direkt zwischen zwei geraden ISO-KF-Rohrbauteilen eingeklemmt wird. Dadurch befindet sich die Faser in einer ungestörten Rohrströmung. Die Strömungsgeschwindigkeit bei der Faser wird durch unterschiedliche Rohrdurchmesser verändert, um die Strömungsverhältnisse in der Aerosolerzeugung nicht durch einen zusätzlichen variablen Luftstrom zu verändern. Faserhalter (b) befindet sich bei der Beladung innerhalb einer Kammer. Ein Rohr führt aus der Aerosolerzeugung in die Kammer und ein zweites Rohr gleichen Durchmessers führt auf der selben Achse aus der Kammer hinaus. Beide Rohre haben einen Abstand von 11 mm voneinander, sodass der Faserhalter zwischen ihnen befestigt werden kann. Bei dem Aufbau mit Faserhalter (b) kann die Strömungsgeschwindigkeit über einen zusätzlichen Luftstrom erhöht werden, wodurch sich jedoch die Strömungsverhältnisse in der Aerosolerzeugung und damit auch das Aerosol bei der Faser ändert. Aus diesem Grund wurde die Faser mit Faserhalter (b) nur bei einer Strömungsgeschwindigkeit beladen.

Die Strömungsgeschwindigkeit an der Faser kann mit dimensionslosen Geschwindigkeitsprofilen in einem Rohreinlauf nach [Hornbeck, 1964] abgeschätzt werden. Abbildung 2.9 zeigt die für verschiedene Kombinationen von Einlaufänge  $l_{Einlauf}$  und Rohrdurchmesser  $d_{Rohr}$  berechneten

Geschwindigkeitsprofile an der Faser.

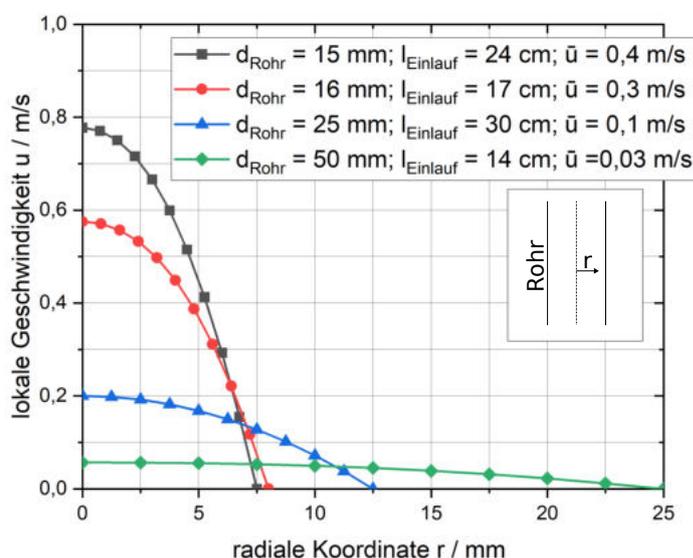


Abbildung 2.9: Nach [Hornbeck, 1964] berechnete Geschwindigkeitsprofile bei der Faser für unterschiedliche Rohrdurchmesser, Einlaufweiten und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten  $\bar{u}$ .

Die Abbildung zeigt auch, dass sich die lokale Geschwindigkeit  $u$  an verschiedenen Positionen der Faser und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit / Leerrohrgeschwindigkeit  $\bar{u}$  stark unterscheiden können. In den Fällen in denen im Folgenden eine lokale Untersuchung der Partikelstruktur erfolgt (z.B. durch Mikroskopie eines Abschnitts der Faser) wird deshalb die der Position entsprechende lokale Geschwindigkeit angegeben und für die Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen verwendet. Findet eine globale Untersuchung über die gesamte Faserlänge statt (z.B. bei den Ablöse-Experimenten, bei welchen die Ablösung über die gesamte Länge der Faser beobachtet wird), dann wird für die Beladung die mittlere Strömungsgeschwindigkeit angegeben.

Eine Übersicht der lokalen Strömungsgeschwindigkeit an der Fasermittelpunkt und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, bei Verwendung der verschiedenen Faserhalter, ist in Tabelle 2.4 aufgeführt.

Die in Kapitel 2.1 eingeführten dimensionslosen Kennzahlen zur Beschreibung der Abscheidebedingungen werden mit den in Tabelle 2.4 aufgeführten lokalen Strömungsgeschwindigkeiten berechnet. Außerdem wird eine Dichte von  $2,2 \text{ g/cm}^3$  für Ruß [Tsai et al., 1991], eine Dichte von  $2,5 \text{ g/cm}^3$  für Glas [Kelly, 1973], eine aus den Dichten von Ruß und Glas gemittelte Dichte von

Tabelle 2.4: Mittlere und lokale Strömungsgeschwindigkeit bei der Abscheidung von Partikeln auf einer einzelnen Faser und bei Verwendung unterschiedlicher Konfigurationen von Faserhalter, Rohrdurchmesser und Einlaufänge.

<b>Faserhalter</b>	a	a	a	a	b
<b>Innendurchmesser Rohr <math>d_{Rohr}</math> / mm</b>	16	25	50	50	15
<b>Einlaufänge Rohr <math>l_{Einlauf}</math> / cm</b>	17	30	58	14	24
<b>Mittlere Strömungsgeschwindigkeit <math>\bar{u}</math> / (m/s)</b>	0,3	0,1	0,03	0,03	0,4
<b>Lokale Strömungsgeschwindigkeit an der Fasermittte <math>u</math> / (m/s)</b>	0,57	0,2	0,06	0,06	0,78

2,35 g/cm<sup>3</sup> für Ruß-Glas-Mischungen, eine Dichte von 1,189 kg/m<sup>3</sup> für Luft [Span, 2013] und eine dynamische Viskosität von Luft von 18,21 µPa·s [Span, 2013] verwendet. Als Partikeldurchmesser wird der volumengewichtete Mediandurchmesser verwendet, da dieser größere Partikeln stärker gewichtet, die auch einen größeren Beitrag an dem Volumen der Partikelstruktur haben, solange das Abprallen der Partikeln von der Faser vernachlässigbar ist. Der Faserdurchmesser bei der Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen beträgt 40 µm, außer in den Versuchen zur konsekutiven Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln und in den Versuchen in welchen gezielt größere Faserdurchmesser untersucht wurden. Im ersten Fall ist der Kollektor nach der Abscheidung der ersten Komponente größer als die Faser alleine und es wird mit einem Durchmesser von 133 µm für die Berechnung der dimensionslosen Kennzahlen der zweiten Komponente gerechnet. Der Durchmesser von 133 µm stammt aus Mikroskopaufnahmen.

Für die Untersuchung der Morphologie abgeschiedener Partikelstrukturen werden, mit dem Faserhalter (a) aus Abbildung 2.7, bei den entsprechenden Strömungsbedingungen aus Tabelle 2.4, Partikelstrukturen aus Propanruß, Glaskugeln und Propanruß zusammen mit Glaskugeln gebildet. Die Beladung erfolgt für 30 Minuten gefolgt von einer Analyse der Partikelstruktur. Die selbe Partikelstruktur wird nach der Analyse für weitere 30 Minuten beladen und erneut analysiert. Nach der zweiten Analyse der Partikelstruktur erfolgt ein letzter Beladungsvorgang der selben Partikelstruktur von 60 Minuten. Somit liegen Analyseergebnisse nach insgesamt 30, 60 und 120 Minuten Beladung vor. Die Analyse der Partikelstruktur erfolgt an mehreren Stellen entlang der Faser. Neben der gleichzeitigen Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, erfolgt eine konsekutive Abscheidung der beiden Komponenten, bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s. Die Untersuchung der Partikelstruktur erfolgt hierbei jeweils nach der Abscheidung der einzelnen Komponenten.

Die Untersuchung der Partikelstruktur auf der Faser erfolgt durch Mikroskopie und Bildauswertung. Bei der Mikroskopie wird die Faser mit einem Lichtmikroskop (VK-X100, Firma Keyence Deutschland GmbH) an jeweils 3 Stellen entlang der Faser untersucht, um die Homogenität der Partikelstruktur qualitativ zu erfassen. Zur weiteren Auswertung wird nur die Bildaufnahme von

der Mitte der Faser verwendet. Bilder werden aus drei verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen. Die Blickrichtungen sind in Strömungsrichtung, entgegen der Strömungsrichtung und senkrecht zur Strömungsrichtung. Dafür wird die Faserhalterung unter dem Mikroskop gedreht. Bei der Verwendung der Faserhalterung (a) nach Abbildung 2.7, bei 50 mm Innendurchmesser, ist die Bildaufnahme senkrecht zur Strömungsrichtung aufgrund des beschränkten Arbeitsabstandes des Mikroskops nicht möglich. Eine quantitative Analyse der Bildaufnahmen wird über die in Abbildung 2.10 gezeigten Projektionsflächen durchgeführt. Die Abbildung 2.10 zeigt beispielhaft die Projektionsflächen  $A_{Oben}$ , bei Betrachtung der Partikelstruktur in Strömungsrichtung und  $A_{Seite}$ , bei Betrachtung der Partikelstruktur senkrecht zur Strömungsrichtung. Die Projektionsfläche  $A_{Unten}$  ergibt sich analog, bei Betrachtung der Partikelstruktur entgegen der Strömungsrichtung.

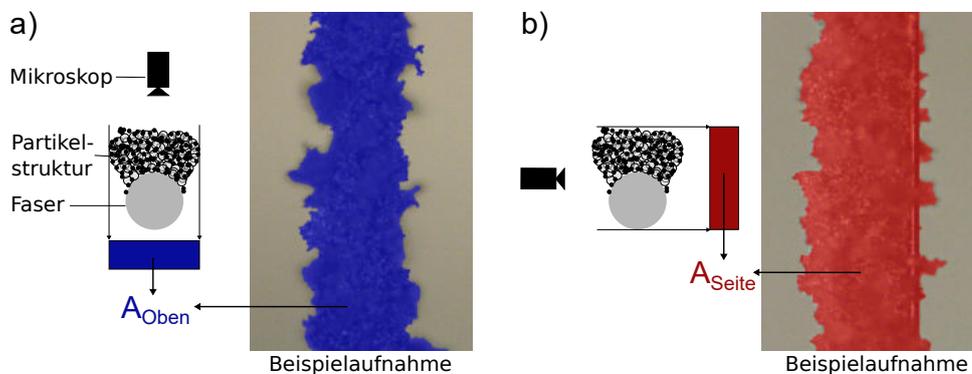


Abbildung 2.10: (a) Projektionsflächen von Partikelstruktur und Faser bei Betrachtung in Strömungsrichtung  $A_{Oben}$  (blau) und (b) bei Betrachtung senkrecht zur Strömungsrichtung  $A_{Seite}$  (rot). Die Abbildung ist schematisch und nicht maßstabsgetreu.

Die Bestimmung der Projektionsflächen erfolgt mit dem Programm MATLAB®. Dabei wird das Bild zuerst zurechtgeschnitten, um Fehler durch den Hintergrund zu reduzieren. In einem zweiten Schritt erfolgt die Konvertierung des Farbbildes in ein Graustufenbild, gefolgt von einer Binärisierung nach der Methode von Otsu [Otsu, 1979]. Mit dem Binärbild wird eine Erosion und eine darauf folgende Dilatation mit einem Kreis mit einem Durchmesser von 16 Pixeln durchgeführt, um Hintergrundrauschen zu reduzieren und durch funkelnde Glaskugeln verursachte Lücken im Binärbild der Partikelstruktur zu schließen. Zum Schluss wird das Binärbild invertiert, die Pixel der Projektionsfläche aus dem Binärbild gezählt und die Projektionsfläche mit den bekannten Abmessungen eines Pixels berechnet. In den Fällen in welchen diese Vorgehensweise nicht möglich ist, zum Beispiel aufgrund eines zu geringen Kontrastes, wird die Kontur von Faser und Partikelstruktur händisch nachgefahren und die damit eingeschlossene Fläche ausgemessen. Für die händische Bestimmung der Projektionsfläche wird das Programm ImageJ verwendet.

Durch Bezug der Projektionsfläche in Strömungsrichtung auf die entsprechende Länge des Fasersegmentes, kann eine mittlere Breite und durch Bezug der Projektionsfläche senkrecht zur

Strömungsrichtung eine mittlere Höhe bestimmt werden. Das Verhältnis der Projektionsfläche senkrecht zur Strömungsrichtung und der Projektionsfläche in Strömungsrichtung entspricht dem Höhen-Breiten-Verhältnis der Struktur. Diese Auswertung wird für die verschiedenen Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln durchgeführt, um herauszufinden, wie sich das Höhen-Breiten-Verhältnis bei verschiedenen Strömungsbedingungen und Partikelmaterialien ändert. Aus der Auswertung von Aufnahmen nach verschiedenen Beladungszeiten, wird auf die Beladungskinetik geschlossen.

Messfehler, im Sinne einer Abweichung der Partikelstruktur zu derjenigen, die bei idealen Beladungsbedingungen entstehen würde, können unterschiedliche Ursachen haben, die im Folgenden kurz aufgezählt werden. Zur Analyse wird die beladene Faser aus der Apparatur ausgebaut und zu einem Mikroskop transportiert. Bei diesem Vorgang kann die Partikelstruktur beispielsweise durch Stöße oder Vibrationen beschädigt werden. Die Faser wird zwischen einzelnen Versuchen gereinigt. Stichproben zeigen, dass die Faser nach der Reinigung wieder frei von sichtbarem Partikelmaterial ist. Eine Kontrolle wird jedoch nicht nach jeder Reinigung durchgeführt, wodurch Verschmutzungen der Faser zum Beginn der Beladung unwahrscheinlich sind, jedoch nicht ausgeschlossen werden können. Partikelmaterial wird im Laufe der Beladung an den Rohrwänden der Apparatur abgeschieden und bildet Ablagerungen, welche wiederum als größere Agglomerate abgelöst werden und auf die Faser treffen können. Trotz regelmäßiger Reinigung der gesamten Apparatur, kann ein Auftreffen solcher Ablagerungen auf der Faser nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren befindet sich die Apparatur in einer nicht klimatisierten Laborhalle, wodurch sich schwankende Umgebungs-Temperaturen und Luftfeuchten auf die Abscheidung auswirken können.

## **2.3 Ergebnisse und Diskussion zur Charakterisierung von Aerosol aus Propanruß und Glaskugeln in Luft, sowie zur Abscheidung der Partikeln auf einer einzelnen Faser**

### **2.3.1 Charakterisierung des Aerosols**

Zur Charakterisierung der Abscheidebedingungen bei der Faserbeladung sind neben den in Abbildung 2.9 dargestellten Geschwindigkeitsprofilen die Größenverteilung aufgegebenener Partikeln, die gesamte Anzahlkonzentration an Partikeln, die Verteilung der Partikelkonzentration über den durchströmten Querschnitt, die Morphologie der Partikeln und die Massenströme der verschiedenen Komponenten nötig. In diesem Kapitel werden die Messergebnisse zu den aufgeführten Größen vorgestellt.

Die Partikelgrößenverteilung, insbesondere von Propanruß, unterscheidet sich bei verschiedenen Strömungsbedingungen und Konfigurationen an Rohrdurchmesser und Einlauflänge vor der Faser. Abbildung 2.11 zeigt die Partikelgrößenverteilung von Propanruß für verschiedene Konfigurationen und damit Verweilzeiten des Rußes vor der Faser. Charakteristische Größen der Verteilung und die zugehörigen Rohrdurchmesser und Einlauflängen sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

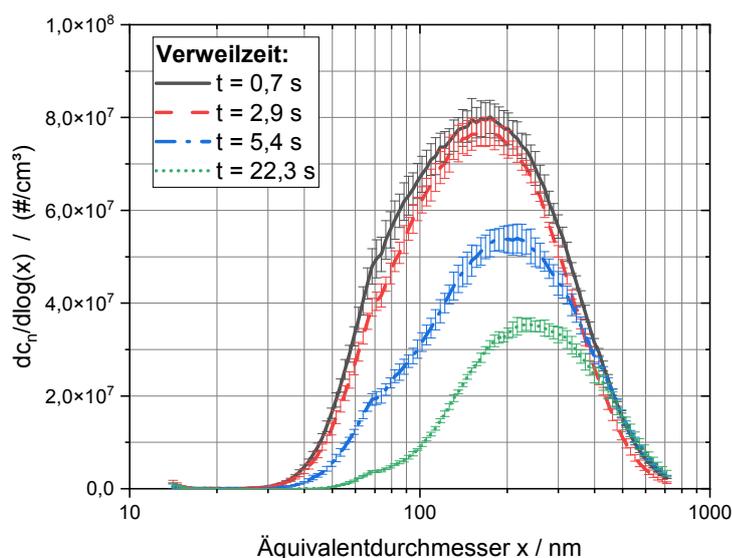


Abbildung 2.11: Aus jeweils vier Messungen mit dem SMPS gemittelte Partikelgrößenverteilungen von Propanruß für unterschiedliche Konfigurationen von Rohrdurchmesser, Einlauflänge und damit Verweilzeit. Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Tabelle 2.5: Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen von Propanruß (Abbildung 2.11).

<b>Verweilzeit <math>t</math> / s</b>	0,7	2,9	5,4	22,3
<b>Innendurchmesser Rohr <math>d_{Rohr}</math> / mm</b>	16	25	50	50
<b>Einlauflänge Rohr <math>l_{Einlauf}</math> / cm</b>	17	30	14	58
<b>Anzahlgewichteter Mediandurchmesser <math>x_{50,0}</math> / nm</b>	157	158	189	238
<b>Sauterdurchmesser <math>\bar{x}_2</math> / nm</b>	327	311	357	392
<b>Volumengewichteter Mediandurchmesser <math>x_{50,3}</math> / nm</b>	379	352	407	445
<b>Geometrische Standardabweichung <math>\sigma_{g,3}</math> / 1</b>	1,4	1,5	1,4	1,3
<b>Anzahlkonzentration <math>c_n</math> / (#/cm<sup>3</sup>)</b>	$5,9 \cdot 10^7$	$5,3 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$

In der Abbildung entspricht  $dc_n$  der Anzahlkonzentration an Partikeln in einer Größenklasse, diese wird auf die Differenz  $dlog(x)$  der Logarithmen von oberer und unterer Klassengrenze

bezogen, um Auswirkungen der Klassenbreite auf die Form der Verteilung zu reduzieren.  $x$  bezeichnet in der Abbildung den mittleren Kugeldurchmesser der jeweiligen Größenklasse und entspricht bei dem vorliegenden Messprinzip einer äquivalenten elektrischen Mobilität. Die unterschiedliche Verweilzeit  $t$  im Einlaufbereich wird aus den Abmessungen des Einlaufrohres und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  auf folgende Weise berechnet:

$$t = \frac{\pi}{4} \frac{d_{\text{Rohr}}^2 l_{\text{Einlauf}}}{\dot{V}} \quad (2.11)$$

Abbildung 2.5 zeigt, dass sich die Verteilung mit zunehmendem Rohrdurchmesser und zunehmender Einlaufstrecke und somit mit zunehmender Verweilzeit verschiebt. Dabei verschiebt sich der Modalwert des Äquivalentdurchmessers zu größeren Werten und die normierte Anzahlkonzentration, insbesondere in den kleinen Größenklassen, zu kleinen Werten. Eine mögliche Erklärung für diese Verschiebung ist Kollisionswachstum und Agglomeration der Partikeln.

Die jeweils mit dem SMPS und dem OPC gemessenen Partikelgrößenverteilungen von Glas, Propanruß und dem Misch aerosol aus Glas und Propanruß sind in Abbildung 2.12 dargestellt. Die Tabellen 2.6 und 2.7 fassen charakteristische Größen der Verteilungen zusammen. Die Partikelgrößenverteilungen in Teil (a) der Abbildung wurden am Anfang des Projektes und damit während der Untersuchung der Morphologie der Partikelstrukturen aufgenommen. Die Partikelgrößenverteilungen in Teil (b) der Abbildung wurden am Ende des Projektes und damit während der Untersuchung der Ablösung der Partikelstrukturen von der Faser aufgenommen. Die Probenahme erfolgte jeweils unmittelbar nach dem T-Strück zur Mischung der Aerosole (vergleiche Abbildung 2.3).

Tabelle 2.6: Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen aus Abbildung 2.12(a).

Material	Ruß	Glas	Ruß + Glas
Diagramm	a	a	a
Messgerät	SMPS	OPC	SMPS + OPC
Anzahlgewichteter Mediandurchmesser $x_{50,0}$ / nm	158	482	157
Sauterdurchmesser $\bar{x}_2$ / nm	384	5582	457
Volumengewichteter Mediandurchmesser $x_{50,3}$ / nm	455	6803	505
Geometrische Standardabweichung $\sigma_{g,3}/1$	1,4	1,6	2,9
Anzahlkonzentration $c_n$ / (#/cm <sup>3</sup> )	$3,7 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^7$

Diagramm (a) in Abbildung 2.12 zeigt, dass die mit dem SMPS gemessenen Verteilungen von Propanruß und dem Misch aerosol aus Propanruß und Glaskugeln, näherungsweise identisch sind. Ein Vergleich mit der SMPS-Messung von Glaskugeln alleine zeigt, dass diese in dem vom SMPS gemessenen Größenbereich eine im Vergleich zum Propanruß vernachlässigbare

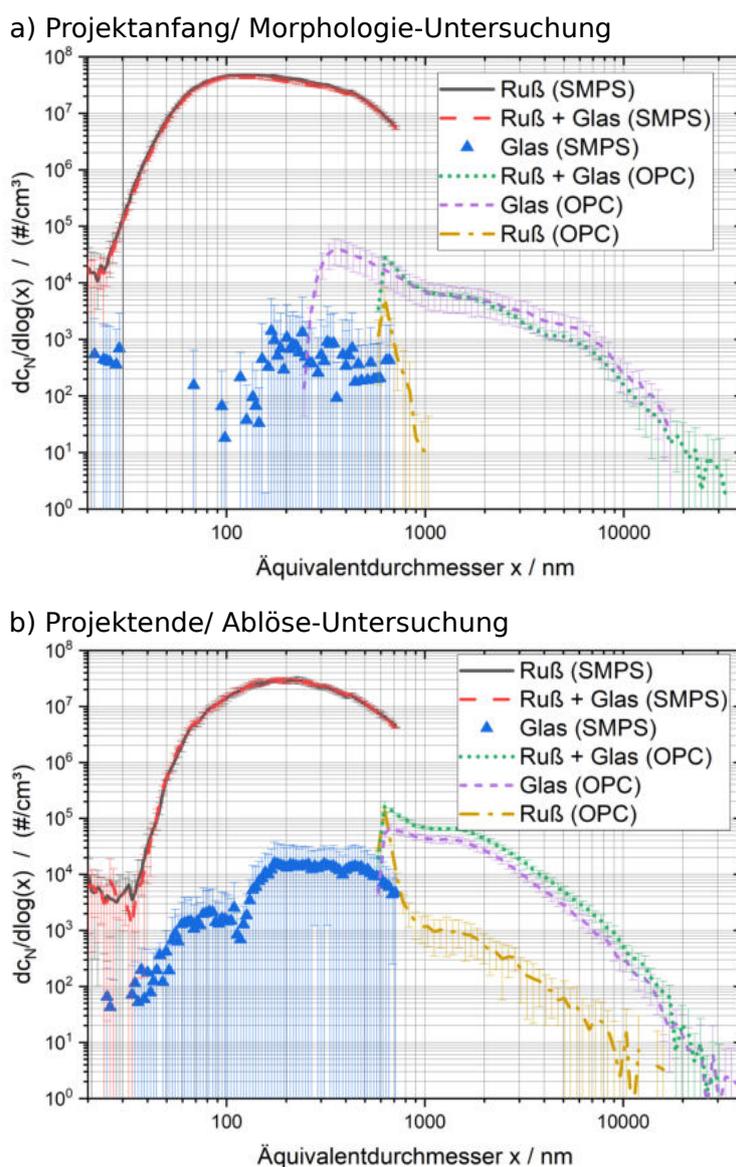


Abbildung 2.12: Aus mindestens vier Messungen gemittelte Partikelgrößenverteilungen von Propanruß, Glaskugeln, und dem Mischerosol aus beiden Stoffen, zu unterschiedlichen Zeiten (a und b) im Projekt. Die Probenahme für die Messung erfolgte unmittelbar nach dem T-Stück der Aerosolerzeugung. Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

normierte Anzahlkonzentration aufweisen und deshalb der Propanruß, bei den vom SMPS gemessenen kleinen Partikeln, die normierte Anzahlkonzentration dominiert. Bei der Messung der großen Partikeln mit dem OPC liegt der umgekehrte Fall vor. Die vom OPC gemessene normierte Anzahlkonzentration an Propanruß ist im Vergleich zu der vom OPC gemessenen normierten Anzahlkonzentration an Glaskugeln näherungsweise vernachlässigbar, wodurch die Glaskugeln

Tabelle 2.7: Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen aus Abbildung 2.12(b).

Material	Ruß	Glas	Ruß + Glas
Diagramm	b	b	b
Messgerät	SMPS	OPC	SMPS + OPC
Anzahlgewichteter Mediandurchmesser $x_{50,0}$ / nm	206	1121	202
Sauterdurchmesser $\bar{x}_2$ / nm	396	3927	725
Volumengewichteter Mediandurchmesser $x_{50,3}$ / nm	461	5524	1037
Geometrische Standardabweichung $\sigma_{g,3}/1$	1,4	2,3	7,5
Anzahlkonzentration $c_n$ / (#/cm <sup>3</sup> )	$1,9 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^7$

die vom OPC gemessene normierte Anzahlkonzentration an großen Partikeln im Misch-aerosol dominieren. Die abnehmende, normierte Anzahlkonzentration an Partikeln in Richtung der unteren Messgrenze des OPC stellt ein Messartefakt dar und ist auf die abnehmende Zähleffizienz zurückzuführen [Binnig et al., 2007]. Auffällig ist der Sprung zwischen der vom SMPS und der vom OPC gemessenen normierten Anzahlkonzentration von Partikeln im Größenbereich von 700 nm. Dieser Sprung ist darauf zurückzuführen, dass das OPC die Rußpartikeln nicht richtig messen kann, was an der großen Differenz von der mit dem SMPS gemessenen Verteilung von Propanruß mit der mit dem OPC gemessenen Verteilung an Propanruß festgestellt werden kann. Dies kann zwei verschiedene Ursachen haben. Die erste mögliche Ursache sind die optischen und geometrischen Eigenschaften von Propanruß. Wie in Kapitel 3.4.2 für Steinkohlepartikeln gezeigt werden wird, können unregelmäßig geformte Partikeln mit geringem Reflexionsgrad, wie Steinkohlepartikeln oder auch Ruß, nur schwer mittels Streulichtmesstechnik gemessen werden. Zusätzlich befindet sich im Falle der Messung von Propanruß mit dem OPC eine große Anzahlkonzentration an Partikeln unter der unteren Messgrenze des OPC. Dies führt zu einem vom OPC bestimmten Koinzidenzfehler von 17-27% während der Messung von Propanruß, obwohl die tatsächlich vom OPC angezeigten normierten Anzahlkonzentrationen verhältnismäßig gering sind. Aus diesem Grund lässt sich vermuten, dass Messungen mit dem OPC durch eine hohe Anzahl an Partikeln unter der unteren Messgrenze gestört werden.

Ein Vergleich der in Abbildung 2.12(a) dargestellten Partikelgrößenverteilungen zu Beginn des Projektes und der in Abbildung 2.12(b) dargestellten Partikelgrößenverteilungen am Ende des Projektes zeigt Unterschiede in der Anzahlkonzentration und dem Modalwert von Propanruß und der Anzahlkonzentration an Glaskugeln. Da die in Tabelle 2.2 aufgeführten Betriebsparameter des Rußgenerators bei beiden Messungen identisch sind und sich die Verweilzeit bei der zweiten Messung mit höherem Modalwert durch zusätzliche Verdünnungsluft eher verringert statt erhöht hat, ist die Änderung der Partikelgrößenverteilung vermutlich auf Alterungseffekte des anfänglich neuen Rußgenerators zurückzuführen. Im Falle der Glaskugeln ist auffällig, dass die normierten Konzentrationen am Projektende höher sind als am Projektanfang und dass nun insbesondere auch größere Mengen an mit dem SMPS messbaren Glaskugeln vorliegen. Mögliche Ursachen

für diese Unterschiede sind ein Batchwechsel der verwendeten Glaskugeln und ein Nachjustieren der Betriebsparameter des Dispergierers (siehe Tabelle 2.3). Neben der Erhöhung der Anzahlkonzentration an Glaskugeln kann auch eine Erhöhung des Massenstromes festgestellt werden, die in Abbildung 2.13 gezeigt wird.

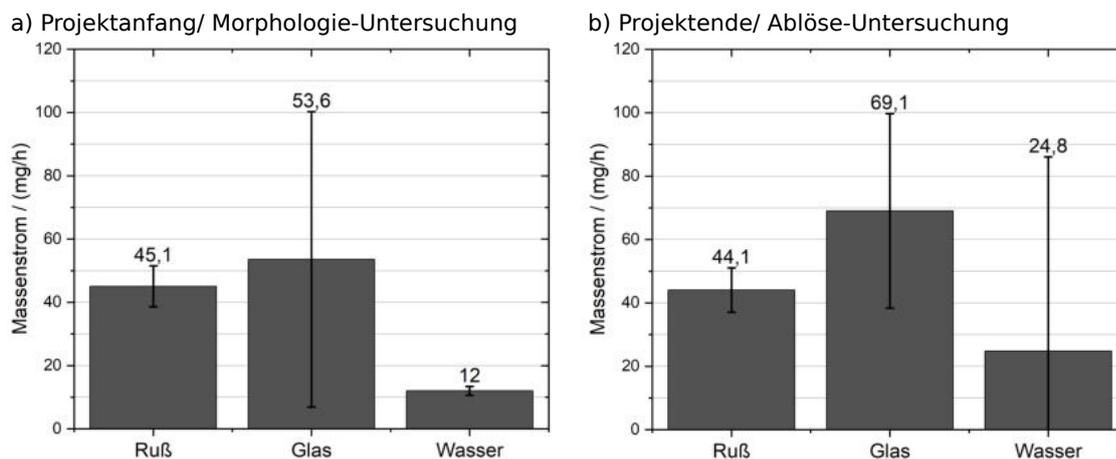


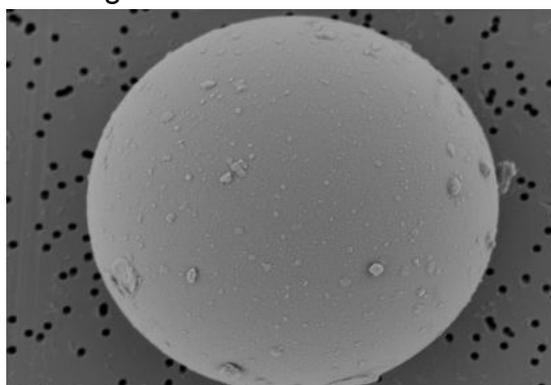
Abbildung 2.13: Aus mindestens 6 Messungen gemittelte Massenströme der festen oder flüssigen Komponenten des reaktiv-inerten Aerosols aus Propanruß und Glaskugeln am Projektanfang (a) und Projektende (b). Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung.

Die mit der in Abbildung 2.6 vorgestellten Analysetechnik ermittelten Massen an Propanruß, Glaskugeln und Wasser werden mit der Beladungszeit in die entsprechenden Massenströme umgerechnet, welche in Abbildung 2.13 dargestellt sind. Während der mittlere Massenstrom an Propanruß am Projektanfang und Projektende näherungsweise gleich ist und nur eine geringe empirische Standardabweichung aufweist, ändert sich der Massenstrom an Glaskugeln vom Projektanfang zum Projektende und weist dabei eine hohe Abweichung von Versuch zu Versuch auf. Aus diesem Grund wurden die Betriebsparameter des Dispergierers mehrmals nachjustiert um den mittleren Massenstrom möglichst konstant zu halten und die Schwankungen zwischen den Versuchen zu verringern. Wasser kann auf drei Transportwegen auf den Gravimetrie-Filter gelangen. Entweder in Form von Tröpfchen im Aerosol oder in Form von gasförmigem Wasser im Aerosol, das auf dem Filter oder dem Filterkuchen auskondensiert oder in Form von Tropfen, die an der Rohrwand entlang zum Filter fließen. Insbesondere einzelne große Tropfen, die an der Rohrwand entlang fließen, können abhängig vom genauen Versuchsaufbau unterschiedlich gut zu dem Auffangfilter gelangen und werden als Ursache für den größeren mittleren Massenstrom an Wasser und die größere empirische Standardabweichung dieses Stromes am Projektende gesehen.

Abbildung 2.14 zeigt eine REM-Aufnahme einer mit dem Dispergierer dispergierten Glaskugel,

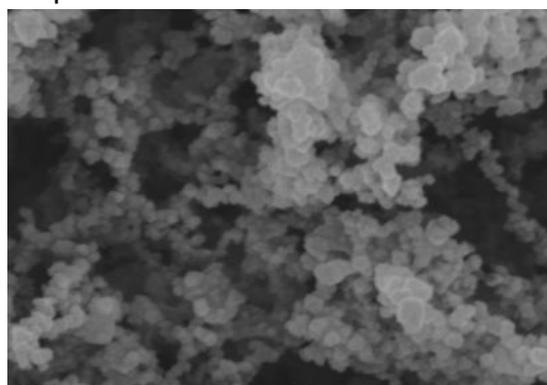
welche auf einer Nucleopore-Membran abgeschieden wurde (a) und eine REM-Aufnahme eines mit dem Propanruß aus dem Rußgenerator gebildeten Filterkuchens auf einem Quarzfaserfilter. Die gezeigte Glaskugel ist nicht perfekt kugelförmig und hat eine raue Oberfläche auf welcher kleinere Partikeln haften. Die Oberflächenbeschaffenheit der Glaskugel und die daran haftenden Partikeln, wirken sich auf die Haftkräfte zwischen der Glaskugel und anderen Oberflächen aus [Schaefer et al., 1995] und damit auch auf die Ablösung, welche in Kapitel 3 untersucht wird. Eine theoretische Analyse der Einflussgrößen auf die Haftkräfte und die Agglomeratfestigkeit wird in Kapitel 3.5.4 vorgestellt.

a) Glaskugel



2 µm

b) Propanruß



400 nm

Abbildung 2.14: REM-Aufnahmen einer dispergierten und auf einer Nucleopore-Membran aufgefangenen Glaskugel (a) und eines Filterkuchens aus Propanruß auf einem Quarzfaserfilter (b).

Die in Abbildung 2.14 erkennbaren Partikeln des Propanruß-Filterkuchens sind alle kleiner als der vom SMPS bestimmte anzahlgewichtete Mediandurchmesser. Dies liegt daran, dass die vom SMPS gemessenen Propanrußpartikeln großteils keine sphärischen Partikeln sondern Agglomerate aus Ruß-Primärpartikeln und Aggregaten sind [Moore et al., 2014]. Auf der REM-Aufnahme sind nur die Russ-Primärpartikeln und Aggregate voneinander unterscheidbar. Die ursprünglich abgeschiedenen Rußagglomerate können auf dieser Aufnahme nicht voneinander abgegrenzt werden, da sie bei der Abscheidung ein größeres Agglomerat (den Filterkuchen) bilden. Anhand der Abbildung kann der anzahlgewichtete Median der Primärpartikelgröße des Propanrußes von 45 nm bestimmt werden. Dies ist in Übereinstimmung mit Beobachtungen aus der Literatur [Moore et al., 2014]. Diese Primärpartikelgröße wirkt sich auf die Festigkeit der Partikelstrukturen auf einer Faser und somit auf die Ablösung aus, wie in Kapitel 3.5.4 erläutert wird.

Eine weitere Einflussgröße auf die Morphologie einer sich bei der Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln auf einer einzelnen Faser ausbildenden Struktur, ist die Verteilung der Partikelkonzentration über die durchströmte Querschnittsfläche. Eine qualitative Beurteilung

dieser Verteilung ist anhand der in Abbildung 2.15 dargestellten Aufnahmen von, durch die Partikeln gefärbten, dünnen Papiertüchern oder dünnem Stoffgewebe möglich, welche an dem zu untersuchenden Querschnitt für 30 s in die Apparatur eingebaut wurden.

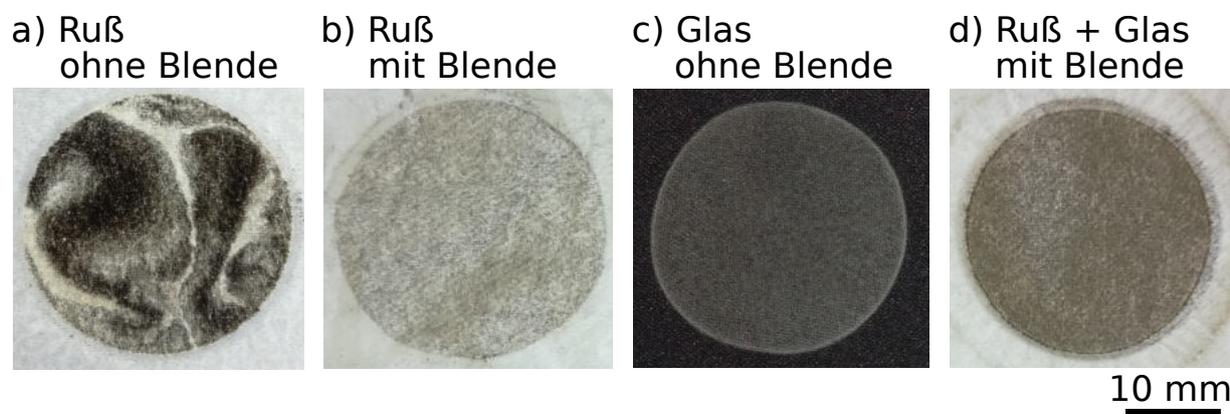


Abbildung 2.15: Visualisierung der Konzentrationsverteilung an Partikeln über den durchströmten Querschnitt mit (a) Propanruß ohne Blende, (b) Propanruß mit Blende, (c) Glas ohne Blende, (d) Propanruß und Glaskugeln mit Blende. Aufgenommen wurden die Profile 25 cm nach dem Austritt aus dem Rußgenerator (a) und 30 cm stromabwärts des T-Stücks (b,c,d), jeweils bei einem Rohrdurchmesser von 25 mm.

Abbildung 2.15(a) zeigt ein von Propanruß geschwärztes Papier 25 cm nach dem Austritt aus dem Rußgenerator. Aus der Färbung des Papiers kann darauf geschlossen werden, dass der Ruß ungleichmäßig über den durchströmten Querschnitt verteilt ist. Aus diesem Grund wird in der Apparatur zur Aerosolerzeugung eine Lochblende verwendet, welche den durchströmten Querschnitt von einem Durchmesser von 25 mm auf 8,5 mm reduziert und wieder auf 25 mm erweitert. Diese Querschnittsänderung führt zu einer Durchmischung des Aerosols. Abbildung 2.15(b) zeigt die Verteilung des Propanrußes an der Stelle der zu beladenden Faser, wenn zur Durchmischung eine Blende vor dem T-Stück verwendet wird. Aus den Aufnahmen (c) und (d) ist qualitativ zu erkennen, dass die Glaskugeln alleine und das Misch aerosol aus Propanruß und Glaskugeln, gleichmäßig über den durchströmten Querschnitt verteilt sind.

### 2.3.2 Morphologie von auf einzelnen Fasern abgeschiedenen Partikelstrukturen

In diesem Kapitel wird die Morphologie von auf einzelnen Fasern abgeschiedenen Partikelstrukturen untersucht. Dafür werden zuerst Propanruß und Glaskugeln einzeln und in Kombination, bei verschiedenen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten von 6 cm/s, 20 cm/s und 57 cm/s, abgeschieden und die gebildeten Partikelstrukturen betrachtet. Anschließend wird der Einfluss der

Temperatur und damit der relativen Feuchte auf die gebildete Partikelstruktur untersucht. Es folgt eine Untersuchung der Partikelstruktur bei konsekutiver Abscheidung von Propanruß und Glas und des Einflusses der Größe der Glaskugeln, sowie des Faserdurchmessers, auf die Morphologie. Eine Quantifizierung der Morphologie der Partikelstruktur findet über die in Abbildung 2.10 vorgestellten Projektionsflächen statt. Diese Projektionsflächen werden für Partikelstrukturen aus Propanruß oder Glas sowie Propanruß und Glas nach unterschiedlichen Beladungszeiten ausgewertet, um den zeitlichen Verlauf der Beladung zu untersuchen. Zuletzt erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse in die Literatur anhand des in Abbildung 2.2 vorgestellten Diagrammes.

Bei den folgenden Untersuchungen der Partikelstrukturen wird jeweils ein repräsentatives Bild, aus drei Versuchen, von der Mitte der Faser gezeigt. Der Grund für diese Stelle der Faser ist eine geringere Beeinflussung durch die Grenzschicht der Strömung an der Rohrwand. Die meisten gezeigten Bilder wurden nach einer Stunde Beladungszeit aufgenommen, da die Partikelstruktur bei den vorliegenden Abscheidebedingungen nach dieser Zeit meist eine ausreichende Größe aufweist um die Morphologie zu erkennen und meist noch keine Änderungen der Struktur durch Ablösung aufgrund von Überbeladung stattgefunden haben. Der zeitliche Verlauf der Beladung wird später in diesem Kapitel näher erläutert. Die Abbildungen 2.16, 2.17 und 2.18 zeigen Partikelstrukturen aus Propanruß, Glas und einer Mischung aus Propanruß und Glas, bei lokalen Strömungsgeschwindigkeiten von 6 cm/s, 20 cm/s und 57 cm/s. Gezeigt ist jeweils die Anströmseite, die Abströmseite und die Seite von Partikelstruktur und Faser mit deren jeweiligen Projektionsflächen  $A_{Oben}$ ,  $A_{Unten}$  und  $A_{Seite}$ . Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 6 cm/s konnte aufgrund des für diese Geschwindigkeit notwendigen großen Rohrdurchmessers und damit der entsprechend großen Faserhalterung, keine Aufnahme von der Seite aufgenommen werden.

Bei den geringen Strömungsgeschwindigkeiten von 6 cm/s in Abbildung 2.16 ist keine ausgeprägte Morphologie der Partikelstrukturen zu erkennen, da die Menge an Partikeln auf der Faser gering ist. Die Abweichung der Projektionsflächen von Oben/Anströmseite und Unten/Abströmseite ist auf Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Faser unter dem Mikroskop und bei der Bildauswertung zurückzuführen. Bei den höheren Strömungsgeschwindigkeiten in den Abbildungen 2.17 und 2.18 sind höhere Beladungen der Faser und ausgeprägtere Strukturen zu erkennen. Die Partikelstrukturen aus Propanruß (links in den Abbildungen 2.17 und 2.18) befinden sich hauptsächlich auf der Anströmseite der Faser und ragen weit, senkrecht zur Strömungsrichtung, über die Faser hinaus. Die Strukturen bestehen aus Dendriten. Wie ein Vergleich mit der in Tabelle 2.1 zusammengefassten Literatur zeigt, stimmen die für Propanruß beobachteten Partikelstrukturen mit den für die erwartete Sperreffektabscheidung typischen Partikelstrukturen überein. Die Partikelstrukturen aus Glaskugeln (rechts in den Abbildungen 2.17 und 2.18) befinden sich ebenfalls hauptsächlich auf der Anströmseite der Faser und ragen nicht so weit wie der Ruß seitlich über die Faser hinaus. Damit sind diese Strukturen wie erwartet für den Bereich der

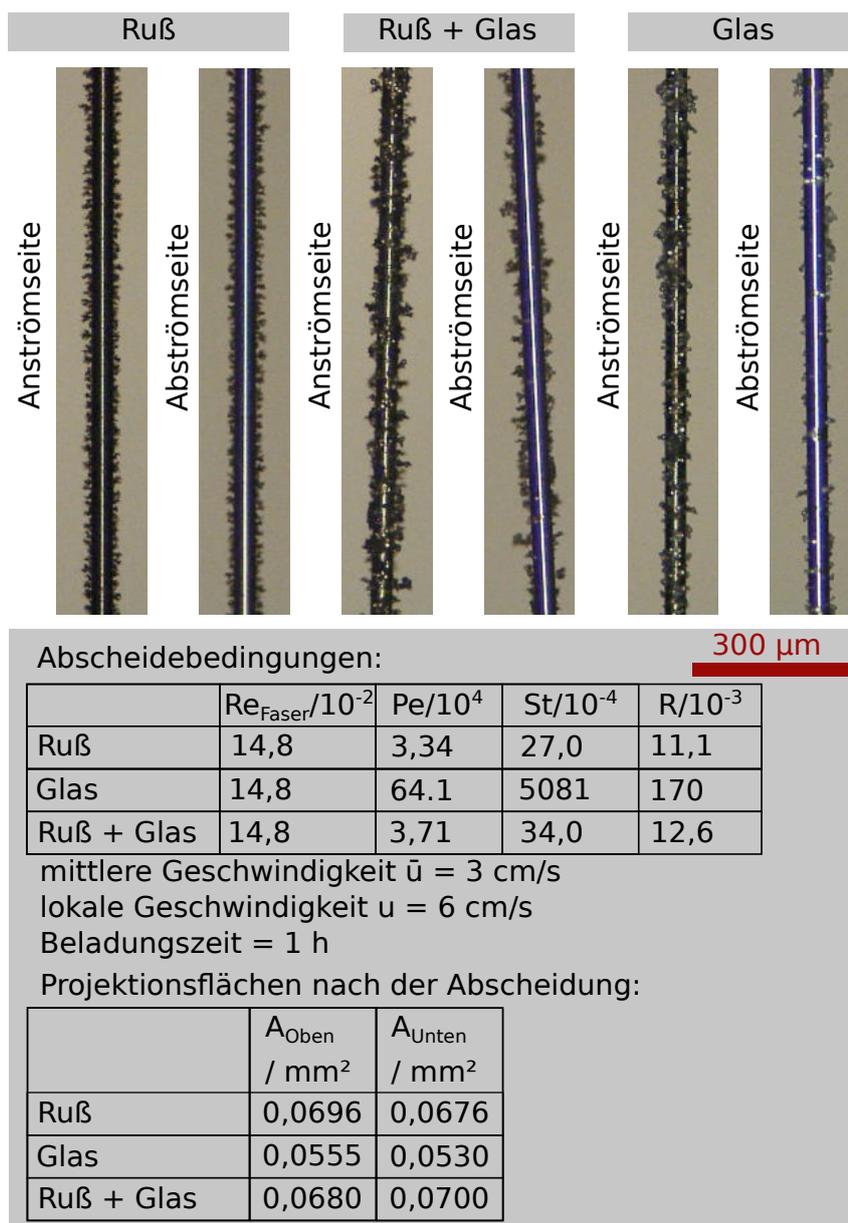


Abbildung 2.16: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 6 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Trägheitsabscheidung. Die simultane Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln führt, wie in den mittleren drei Bildern der Abbildungen 2.17 und 2.18 gezeigt, nicht zu Dendriten oder kompakten Strukturen, wie bei der Abscheidung von Propanruß oder Glaskugeln alleine. Die Mischstruktur befindet sich hauptsächlich auf der Anströmseite der Faser und ragt weit senkrecht zur Strömung über die Faser hinaus. Sie ist größer als die Strukturen aus reinem Propanruß und reinen Glaskugeln, selbst wenn die Strukturen dieser beiden Komponenten addiert werden. Eine höhere lokale Strömungsgeschwindigkeit führt zu größeren Strukturen. Die Ursache dafür ist, dass bei höherer Strömungsgeschwindigkeit und gleicher Konzentration des Aerosols, die

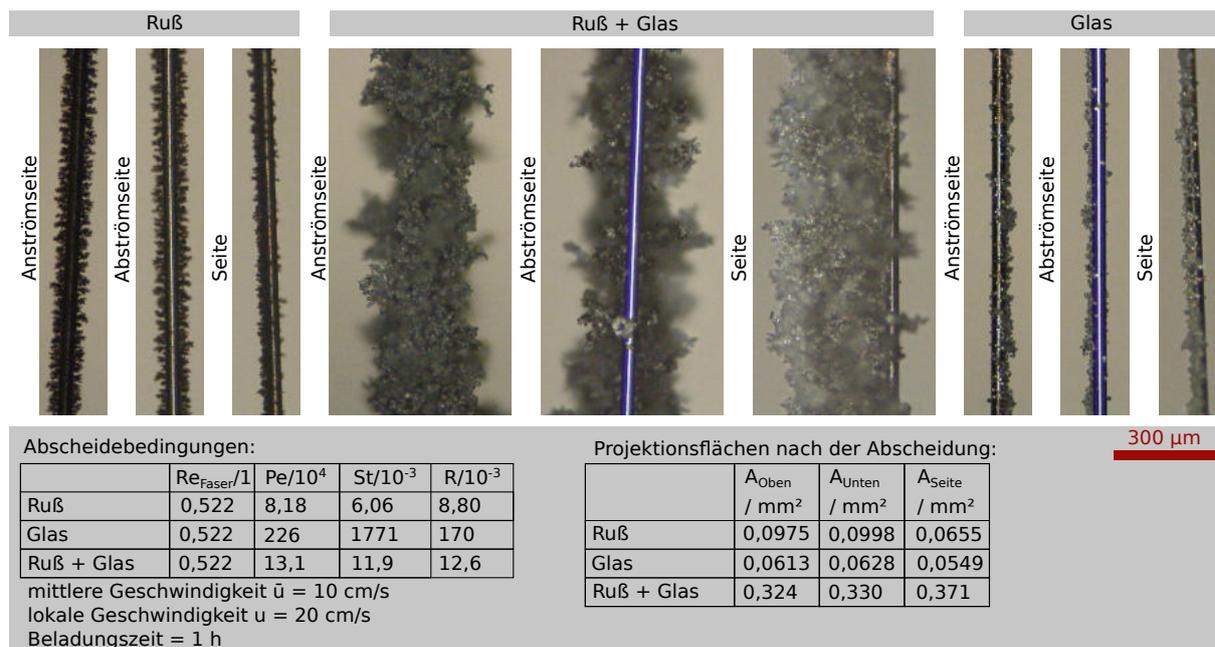


Abbildung 2.17: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

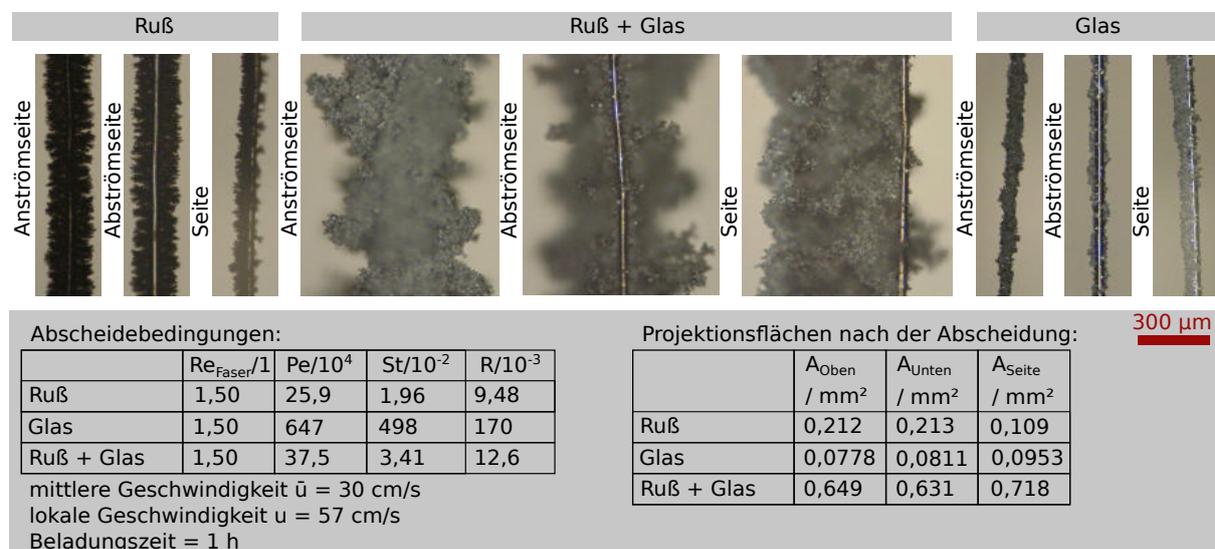


Abbildung 2.18: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 57 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Partikelstromdichte höher ist und dadurch auch in Summe mehr Partikeln pro Faserfläche abgeschieden werden. Aufgrund dessen, dass bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten und gleicher Partikelkonzentration im Aerosol, größere Partikelstrukturen in der gleichen Zeit gebildet werden,

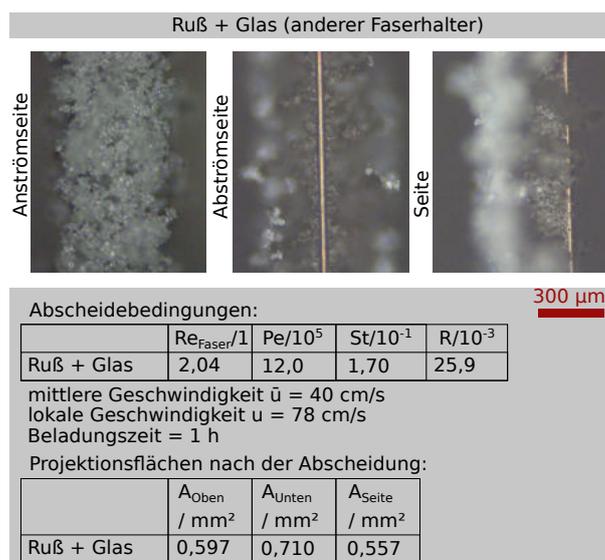


Abbildung 2.19: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 78 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. Im Gegensatz zu den anderen in diesem Kapitel gezeigten Partikelstrukturen wurde die Partikelstruktur bei 78 cm/s mit der Faserhalterung aus Abbildung 2.8 b) erzeugt.

sollen zur Bildung der Partikelstrukturen für die Ablöseuntersuchung in Kapitel 3.5 noch höhere Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 78 cm/s verwendet werden. Abbildung 2.19 zeigt eine bei dieser Geschwindigkeit gebildete Struktur aus Propanruß und Glaskugeln, die trotz anderer Strömungsbedingungen durch den anderen Faserhalter (vergleiche Faserhalter in Abbildung 2.8) und einer höheren Geschwindigkeit, eine ähnliche Morphologie aufweist.

Das bei der Erzeugung des Propanrußes entstehende Wasser kann, über eine Erhöhung der Haftkräfte zwischen den Partikeln der Struktur und zwischen Partikelstruktur und Faser, die Größe und Morphologie der Partikelstruktur beeinflussen. Um diesen Einfluss zu untersuchen, sind in Abbildung 2.20 Partikelstrukturen dargestellt, welche bei unterschiedlichen Temperaturen und damit relativen Feuchten  $\phi$ , gebildet wurden.

Die relative Feuchte wird bei den Versuchsbedingungen der Beladung in Abbildung 2.20 bestimmt, indem die Faser durch einen Filter, gefolgt von einem Rohr mit einem Thermo-Hygrometer (8709, Firma AZ Instrument Corporation) ersetzt wird. Bei 27,4°C und den identischen Betriebsbedingungen wie bei der Faserbeladung, beträgt die relative Feuchte 99%. Eine entsprechende Erhöhung der Temperatur auf 47°C führt zu einer relativen Feuchte von 70%. Höhere Temperaturen können aufgrund der Temperaturbeständigkeit der Komponenten der Apparatur nicht realisiert werden. Anhand der Abbildungen kann kein wesentlicher Unterschied

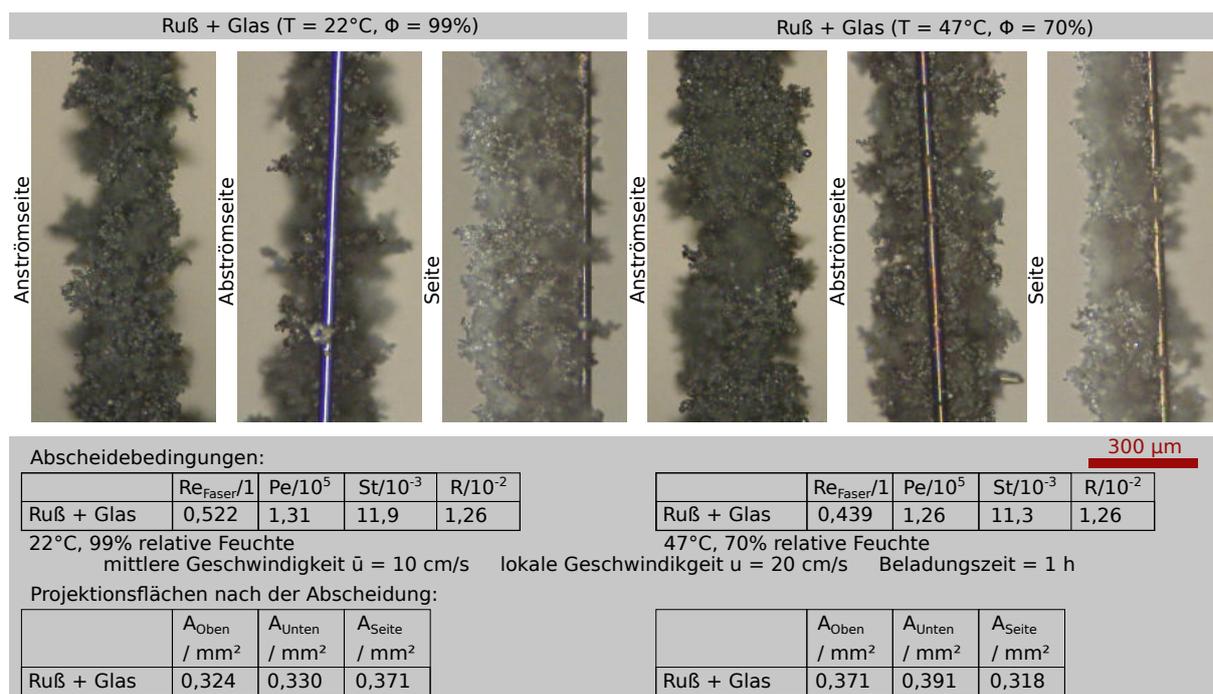


Abbildung 2.20: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde und zwei unterschiedliche Temperaturen und relative Feuchten. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

beobachtet werden. Ein Einfluss der relativen Feuchte auf die Morphologie der Partikelstruktur kann dennoch nicht ausgeschlossen werden. Zur weiteren Kontrolle konnten keine Partikelstrukturen bei 0% relativer Feuchte gebildet werden.

Abbildung 2.21 zeigt Partikelstrukturen, die durch die aufeinander folgende Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln gebildet wurden. In der Mitte der Abbildung ist die Struktur aus der gleichzeitigen Abscheidung beider Komponenten als Referenz gezeigt. Wenn zuerst Propanruß und anschließend Glaskugeln abgeschieden werden (links in Abbildung 2.21), dann werden die Glaskugeln auf der Anströmseite der Ruß-Dendriten abgeschieden. Auf der Anströmseite dieser Struktur sind nur die abgeschiedenen Glaskugeln zu erkennen. Die Aufnahme der Rückseite der Faser zeigt einen schwarzen Bereich um die Faser herum, der aus Propanruß besteht. Ein Vergleich der Partikelstruktur, bei der zuerst Propanruß und anschließend Glaskugeln abgeschieden werden (links in Abbildung 2.21), mit der Partikelstruktur, bei welcher Glaskugeln bei gleicher Geschwindigkeit auf einer blanken Faser abgeschieden werden (rechts in Abbildung 2.17), zeigt, dass die Partikelstruktur an Glaskugeln auf den Ruß-Dendriten größer ist. Dies lässt auf eine Verbesserung der Abscheidung durch die Ruß-Dendriten schließen. Werden zuerst Glaskugeln und anschließend Propanruß auf einer Faser abgeschieden (rechts in Abbildung 2.21), bilden sich Ruß-Dendriten auf der Anströmseite der Glaskugel-Struktur. Eine Verbesserung der

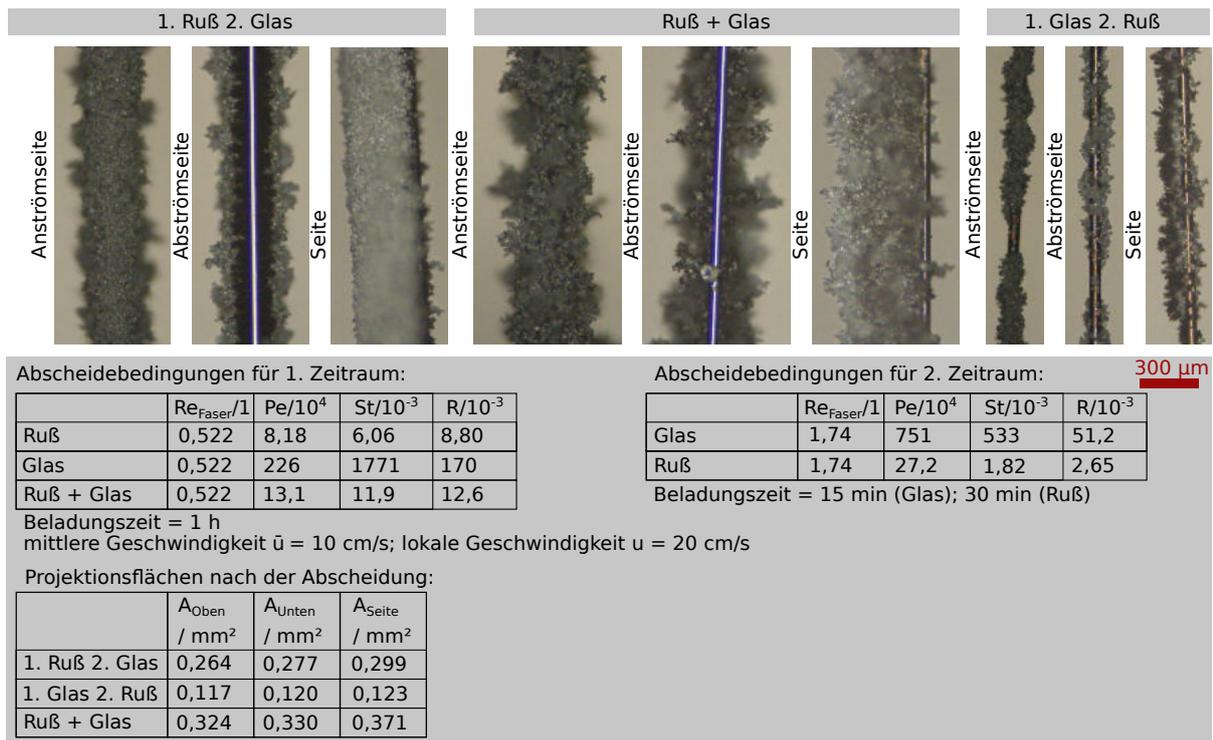


Abbildung 2.21: Partikelstruktur auf einer Faser nach simultaner oder konsekutiver Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln aus einem Aerosol bei 20 cm/s für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Abscheidung kann in diesem Fall nicht erkannt werden.

Aus Abbildung 2.21 ergibt sich die Fragestellung, ob Ruß-Dendriten durch Glaskugeln hoher kinetischer Energie von der Faser herunter geschlagen werden können. Um dies näher zu untersuchen sind in Abbildung 2.22 Aufnahmen von Partikelstrukturen gezeigt, bei denen die Glaskugeln bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf den Ruß-Dendriten abgeschieden wurden. In der Abbildung ist, auch bei einer Strömungsgeschwindigkeit bei der Abscheidung der Glaskugeln von 140 cm/s, kein offensichtliches Abschlagen von Ruß-Dendriten durch die Glaskugeln ersichtlich. Da nicht alle Ruß-Dendriten einzeln erkannt und die Auswirkung der Glaskugel-Impaktion auf sie verfolgt werden können, kann das Abschlagen aber auch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Der Einfluss der Größe der Glaskugeln auf die Morphologie der Partikelstruktur wird untersucht, indem die Versuche aus Abbildung 2.17 mit größeren Glaskugeln durchgeführt werden. Diese größeren Glaskugeln haben einen volumengewichteten Mediandurchmesser  $x_{50,3}$  von 11,0  $\mu\text{m}$  und ihre Volumenverteilung eine geometrische Standardabweichung  $\sigma_{g,3}$  von 1,9. Die damit gebildeten Partikelstrukturen sind in Abbildung 2.23 dargestellt. In der Partikelstruktur aus Glas-

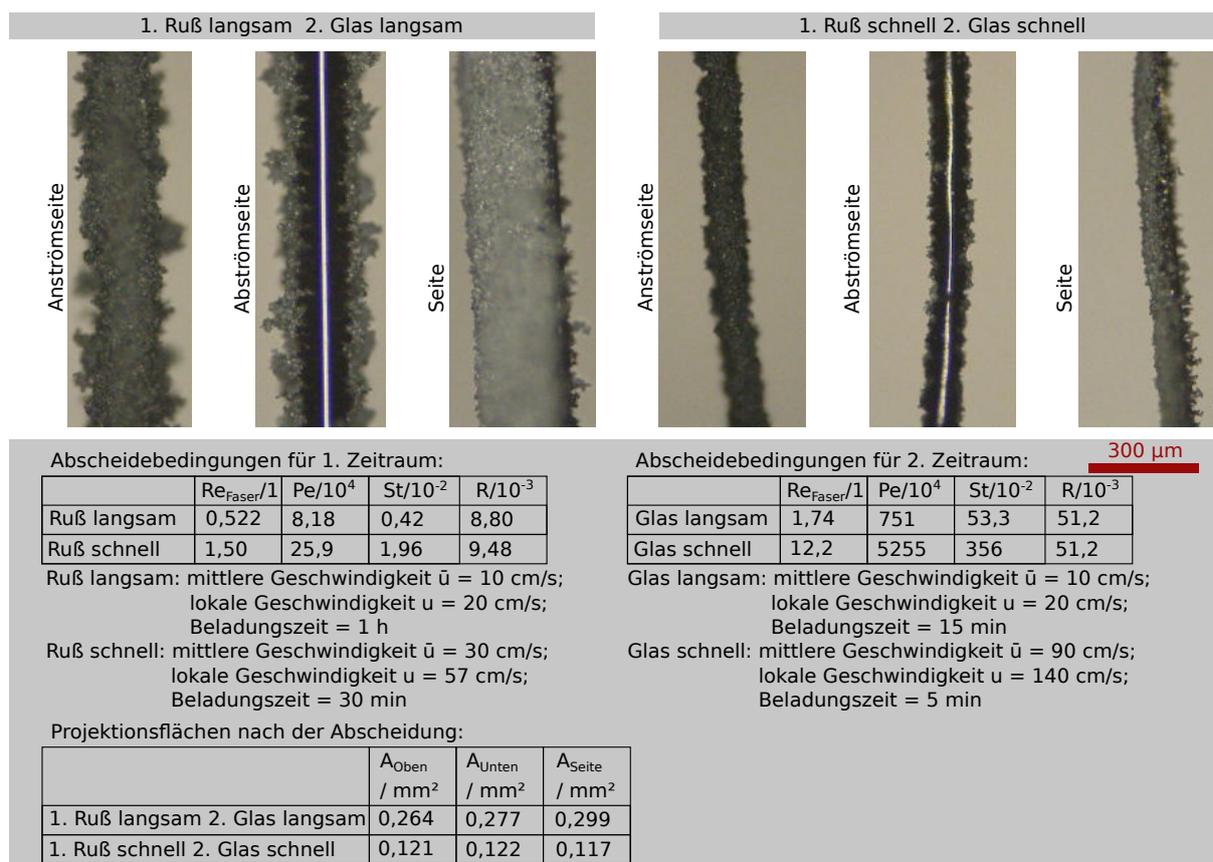


Abbildung 2.22: Partikelstruktur auf einer Faser, auf welcher zuerst Propanruß und anschließend Glaskugeln, bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten, abgeschieden wurden. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

kugeln ohne Propanruß (rechts in Abbildung 2.23) sind keine größeren Glaskugeln zu erkennen. Im Gegensatz dazu sind in der Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln auch größere Glaskugeln enthalten. Die Ursache hierfür ist, dass bei der Beladung ohne Propanruß die großen Glaskugeln von der Faser abprallen (vergleiche Abbildung 2.1(e)) und bei der Beladung mit Propanruß nicht. Der Ruß könnte zu einer höheren Dissipation an Energie beim Aufprall führen, da die poröse Ruß-Struktur beim Aufprall einer großen Glaskugel nachgibt und sich plastisch verformt, was einem Abprallen entgegenwirkt. Zusätzlich führt die mit der Abscheidung von Ruß verbundene höhere Feuchtigkeit zu höheren Haftkräften, welche die Glaskugel an dem Aufprallort festhalten und somit ebenfalls einem Abprallen entgegenwirken. Die bei gleichzeitiger Abscheidung von Propanruß und größeren Glaskugeln entstehende Partikelstruktur ist ähnlich zu der Partikelstruktur aus Propanruß und kleineren Glaskugeln, weist jedoch eine geringere Größe auf. Mögliche Ursachen hierfür sind eine geringere Porosität und ein geringerer Abscheidegrad.

Neben der Größe der Partikeln ist auch die Größe der Faser eine Einflussgröße auf die Morphologie der Partikelstruktur. Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln auf Fasern mit

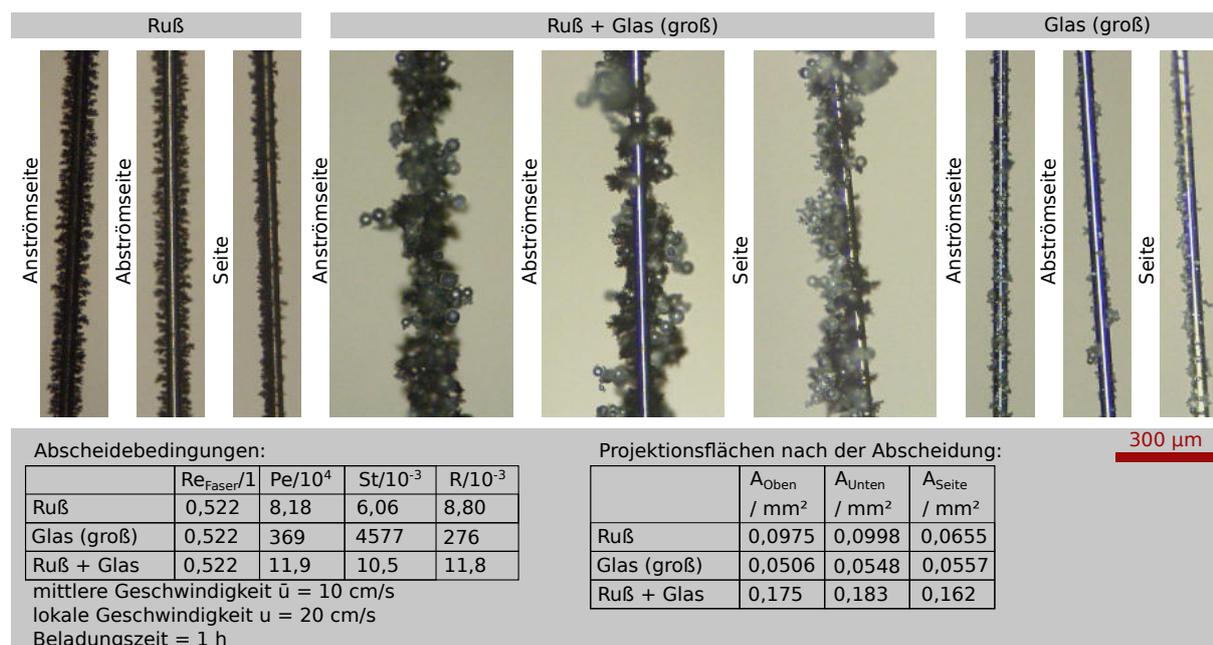


Abbildung 2.23: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. In diesen Versuchen wurden größere Glaskugeln mit  $x_{50,3} = 11,0$  µm und  $\sigma_{g,3} = 1,9$  verwendet. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts.

unterschiedlichem Durchmesser sind in Abbildung 2.24 gezeigt. Bei gleicher Beladungszeit und Beladungsbedingungen ist die Partikelstruktur bei größeren Fasern kleiner. Dabei ist zu beachten, dass die Oberfläche, auf der sich die abgeschiedenen Partikel bei einer größeren Faser verteilen, ebenfalls größer ist. Dies kann aber nicht die Ursache für die verhältnismäßig kleinere Partikelstruktur sein, da bei gleicher Partikelstromdichte in der Anströmung die Anzahl der Partikel, die einer größeren Faser ausweichen müssen, auch entsprechend größer ist, als bei einer kleineren Faser. Die Ursache für die kleinere Partikelstruktur kann also nur ein kleinerer Abscheidegrad sein, was sich mit gängigen Korrelationen zur Berechnung des Einzelfaserabscheidegrades aus der Literatur [Hinds, 2012] deckt.

Die Projektionsflächen der Partikelstrukturen aus den Abbildungen 2.16, 2.17, 2.18 und 2.21 in Strömungsrichtung  $A_{Oben}$  und von der Seite  $A_{Seite}$  sind in Tabelle 2.8 gegenübergestellt. Die Daten zeigen, dass eine größere lokale Strömungsgeschwindigkeit zu größeren Projektionsflächen und somit zu größeren Partikelstrukturen führt. Dieser Trend gilt für den beobachteten Geschwindigkeitsbereich und lässt sich nicht auf beliebig höhere Geschwindigkeiten extrapolieren, da bei höheren Geschwindigkeiten Mechanismen wie das Abprallen von Partikeln oder das Ablösen abgeschiedener Strukturen zunehmen. Die Projektionsflächen von Strukturen aus Propanruß und Glaskugeln sind größer als die Summen der entsprechenden Projektionsflächen von Partikelstrukturen aus reinem Propanruß und reinen Glaskugeln. Die Ursache hierfür könnte

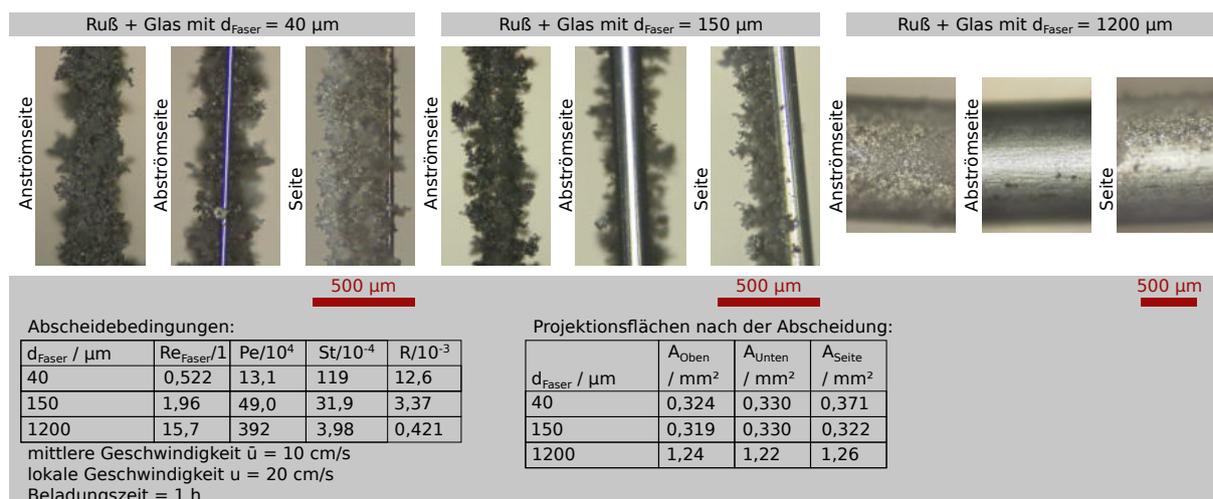


Abbildung 2.24: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde, bei unterschiedlichen Faserdurchmessern. Jede Skalierung gilt für alle Aufnahmen mit dem entsprechenden Faserdurchmesser. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts ( $d_{Faser} = 40 \mu m$  und  $d_{Faser} = 150 \mu m$ ) bzw. von oben nach unten ( $d_{Faser} = 1200 \mu m$ ).

die von [Kasper et al., 2009] mit monodispersen Partikeln eines Materials beobachtete Zunahme des Abscheidegrades mit steigender Beladung der Faser sein, aber auch eine Verringerung des Abprallens von Glaskugeln durch den Ruß und die damit verbundene Feuchte ist möglich. Das Verhältnis  $A_{Seite}/A_{Oben}$  zeigt ob eine Partikelstruktur bei der Abscheidung eher in die Breite, senkrecht zur Strömungsrichtung, oder in die Höhe, in/entgegen der Strömungsrichtung, wächst. Für Partikelstrukturen aus Propanruß ist dieses Verhältnis kleiner als 1, was zeigt, dass Propanruß eher an den Seiten der Faser abgeschieden wird. Für Glaskugeln ist dieses Verhältnis größer, insbesondere bei hoher Strömungsgeschwindigkeit, was zeigt, dass sich die Partikelstrukturen eher in/entgegen der Strömungsrichtung bilden. Das Verhältnis  $A_{Seite}/A_{Oben}$  ist nahe 1 für Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln, was bedeutet, dass die Höhe und die Breite der Strukturen ungefähr gleich ist.

Der zeitliche Verlauf der Beladung ist anhand der Änderung der Projektionsfläche in Strömungsrichtung  $A_{Oben}$  in Abbildung 2.25 dargestellt. Obwohl der schwankende Massenstrom, insbesondere der Glaskugeln (siehe Abbildung 2.13), die quantitative Aufstellung einer Beladungskinetik verhindert, können aus der Abbildung drei Schlüsse gezogen werden. Erstens ist in den ersten 60 Minuten ein Trend zu größeren Projektionsflächen mit zunehmender Beladungszeit vorhanden. Zweitens kann nach 60 Minuten Beladungszeit eine Abnahme der Projektionsfläche der Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln bei 57 cm/s beobachtet werden. Diese Abnahme ist auf Ablösevorgänge zurückzuführen, welche durch die Strömungswiderstandskraft, die Gewichtskraft oder Trägheitskräfte verursacht worden sein könnten. Insbesondere sind diese

Tabelle 2.8: Projektionsflächen der Partikelstrukturen aus den Abbildungen 2.16, 2.17, 2.18 und 2.21

<b>Aerosol</b>	<b><math>u</math> / (cm/s)</b>	<b><math>A_{\text{Oben}}</math> / <math>\text{mm}^2</math></b>	<b><math>A_{\text{Seite}}</math> / <math>\text{mm}^2</math></b>	<b><math>A_{\text{Seite}}/A_{\text{Oben}}</math> / 1</b>
<b>Ruß</b>	20	0,0975	0,0655	0,672
<b>Ruß</b>	57	0,212	0,109	0,514
<b>Glas</b>	20	0,0631	0,0549	0,896
<b>Glas</b>	57	0,0778	0,0953	1,22
<b>Ruß &amp; Glas</b>	20	0,324	0,371	1,14
<b>Ruß &amp; Glas</b>	57	0,649	0,718	1,11
<b>1. Ruß 2. Glas</b>	20	0,264	0,299	1,14
<b>1. Glas 2. Ruß</b>	20	0,117	0,123	1,05

Ablösevorgänge bei der größten Partikelstruktur aufgetreten, bei welcher die genannten Kräfte ebenfalls am größten sind. Abbildung 2.26 zeigt Bilder des Versuches, in welchem die Ablösung aufgetreten ist. In Kapitel 3.5 wird der Einfluss der Beladung der Faser auf die Ablösung näher untersucht. Die dritte Schlussfolgerung aus Abbildung 2.25 ist, dass eine höhere lokale Strömungsgeschwindigkeit  $u$  zu einer schnelleren Zunahme der betrachteten Projektionsfläche führt. Dies ist bei konstanter Konzentration auf die mit zunehmender lokalen Strömungsgeschwindigkeit zunehmende Partikelstromdichte zurückzuführen.

Zur Einordnung der Ergebnisse in den Kontext der Literatur, werden sie in das in Abbildung 2.2 vorgestellte Diagramm eingetragen. Das ergänzte Diagramm ist in Abbildung 2.27 dargestellt.

Die Partikelstrukturen aus Propanruß weisen ähnliche seitliche Ablagerungen wie die Partikelstrukturen von [Kanaoka et al., 1986], im gleichen Bereich der Stokes-Zahl und des Sperreffekt-Parameters auf. Glaskugeln bilden ähnliche kompakte Strukturen, wie sie von [Kasper et al., 2010], in dem entsprechenden Stokes-Zahl und Sperreffekt-Parameterbereich, beobachtet wurden. Auf Basis der mikroskopischen Aufnahmen dieser Arbeit, ist es jedoch nicht möglich zwischen den drei verschiedenen, von [Kasper et al., 2010] im Trägheitsbereich der Abscheidung beobachteten, Morphologien zu unterscheiden. Für die Einordnung der Mischstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln wurde der volumengewichtete Median des gesamten Misch-aerosols zur Berechnung der Stokes-Zahl und des Sperreffekt-Parameters verwendet. Die Morphologie dieser Mischstrukturen weicht von der in diesem Diagrammbereich erwarteten Morphologie, für Partikelstrukturen aus eng verteilten Partikeln eines Materials, ab. Dies zeigt, dass die Erkenntnisse über die Morphologie, von auf einer Faser abgeschiedenen Partikelstrukturen eng verteilter Partikeln eines Materials, nicht ohne Weiteres auf Partikelstrukturen aus unterschiedlichen Materialien mit einer breiten Partikelgrößenverteilung übertragbar sind. Wird die Mischstruktur nicht durch gleichzeitige Abscheidung der verschiedenen Partikelmaterialien, sondern durch

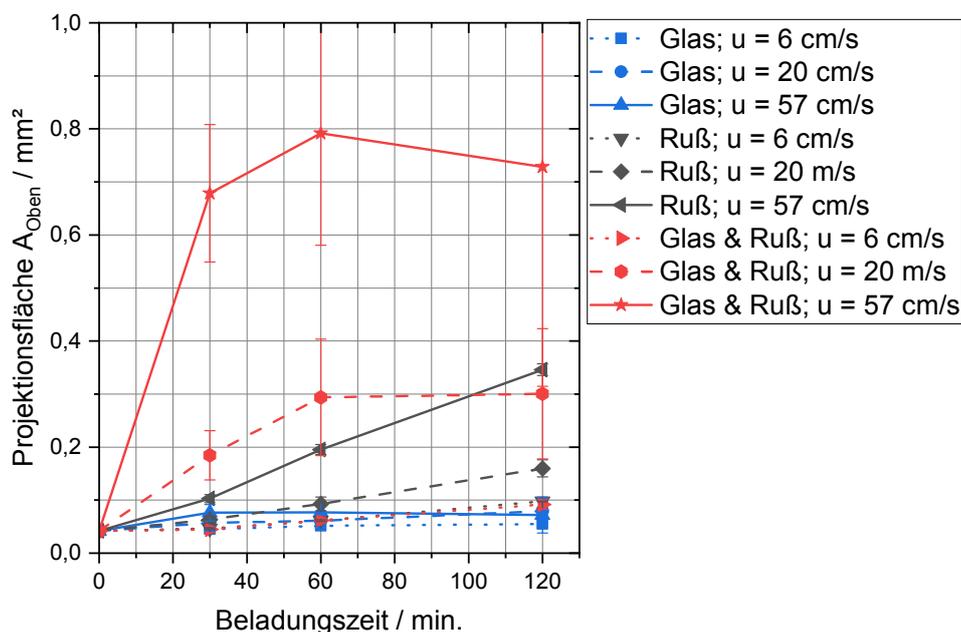


Abbildung 2.25: Projektionsfläche in Strömungsrichtung  $A_{Oben}$  für verschiedene Partikelstrukturen aus Propanruß und / oder Glaskugeln, bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Beladungszeiten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an.

konsequente Abscheidung gebildet, stimmen die Partikelstrukturen, welche die einzelnen Komponenten bilden, wieder besser mit den Beobachtungen aus der Literatur überein. Dabei kann die veränderte Kollektorstruktur, durch die vorherige Abscheidung einer anderen Komponente, durch einen größeren Kollektordurchmesser für die Berechnung der Stokes-Zahl und des Sperrereffekt-Parameters der zweiten Komponente berücksichtigt werden.

## 2.4 Untersuchungen der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Partikelstrukturen aus anderen Partikelmaterialien

Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse, zur Morphologie von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln, auf andere Stoffsysteme zu überprüfen und die Morphologie von reaktiv-inerten Partikelstrukturen weitergehend zu untersuchen, werden in diesem Kapitel zusätzliche Partikelmaterialien, wie Funkenruß, Carbon Black, Flugasche und Siliziumkarbid, betrachtet.

Der Funkenruß wird durch Funkenentladung zwischen zwei Kohle-Elektroden mit einem Durchmesser von 6 mm und einem Abstand von 4 mm erzeugt. Parallel zu den Elektroden ist ein

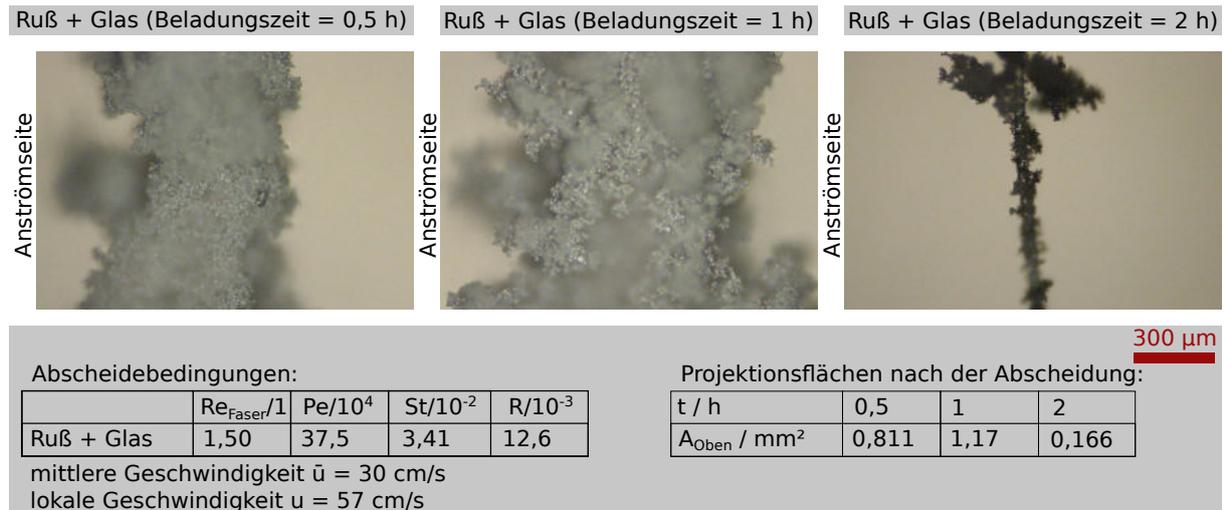


Abbildung 2.26: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 57 cm/s. Die Aufnahmen zeigen die selbe Stelle der Faser nach unterschiedlichen Beladungszeiten. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen.

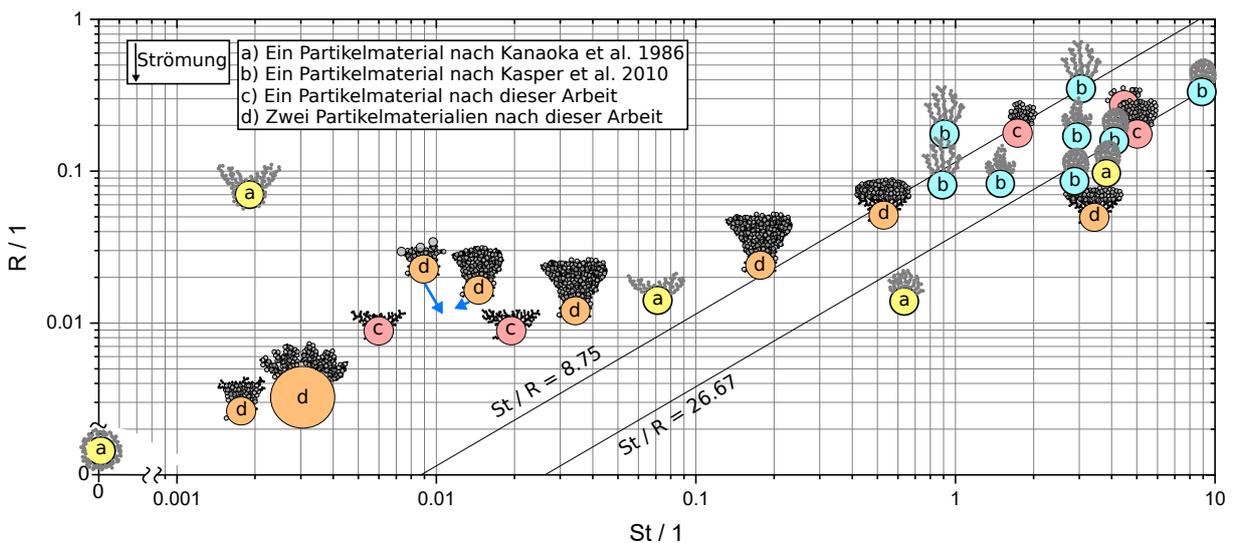


Abbildung 2.27: Morphologie von bei verschiedenen Stokes-Zahlen  $St$  und Sperrereffekt-Parametern  $R$  auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen. Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. Aus dieser Arbeit sind Partikelstrukturen aus Propanruß, Glas oder einer Mischung beider Materialien dargestellt. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

Kondensator mit einer Kapazität von 6,3 nF und eine Spannungsquelle (HCK 400 M-20,000, Firma FuG Elektronik GmbH) geschaltet. Die Stromstärke der Spannungsquelle beträgt 1,5 mA und die maximale Spannung ca. 7 kV. Die sich auf einer Linie befindenden, gegenüberstehenden Elektroden sind in einer Kammer, welche von einem Stickstoffstrom von 3 l/min durchströmt wird, der die bei der Funkenentladung entstehenden Partikeln durch eine Blende zur Durchmi-

schung und ein 30 cm langes Rohr mit einem Durchmesser von 25 mm bis zur Faser führt.

Zur Dispergierung von Carbon Black (Pow Carbon 280, Firma Harold Scholz & Co. GmbH), Flugasche (Powerment, Firma Powerment GmbH & Co. KG) und Siliziumkarbid (Siliziumkarbid F1000, Firma CharpauS) werden die Glaskugeln aus dem Dispergierer in Abbildung 2.3 durch die entsprechenden anderen Partikelmaterialien ersetzt. Eine Mischung der dispergierten Partikeln mit Propanruß und damit die Bildung von Partikelstrukturen aus Propanruß und verschiedenen anderen Partikelmaterialien, findet analog zur Mischung mit Glaskugeln statt.

Charakteristische Eigenschaften, der mit den verschiedenen Partikelmaterialien erzeugten Aerosole aus jeweils einem Material (keine Mischaerosole), sind in Tabelle 2.9 zusammengefasst. Zur Bestimmung des Verhältnisses von elektrischer Ladung der Partikeln im Aerosol zu ihrer Masse  $q/m$ , wird ein Faraday-Cup-Electrometer (FCE) verwendet.

Tabelle 2.9: Charakteristische Eigenschaften der verwendeten Aerosole.

Material	$x_{50,3}$ / $\mu\text{m}$	$\sigma_{g,3}$ / 1	$c_n$ / ( $\#/\text{cm}^3$ )	$q/m$ / (pAs/mg)	$\phi$ / %	$\dot{M}$ / (mg/h)
Propanruß	0,325	1,5	$5,3 \cdot 10^7$	1232	99	45,1
Funkenruß	0,129	1,4	$9,8 \cdot 10^7$	53686	2	3,54
Carbon Black	0,445	1,4	$1,5 \cdot 10^7$	1652	17	125
Glaskugeln	6,8	1,6	$1,5 \cdot 10^4$	90	17	53,6
Flugasche	6,5	3,0	$3,7 \cdot 10^5$	-1111	17	72,8
Siliziumkarbid	2,94	2,0	$3,2 \cdot 10^5$	-7488	17	8,95

Die reaktiven/brennbaren Materialien liegen alle bei einem volumengewichteten Mediandurchmesser kleiner  $1 \mu\text{m}$  und hohen Konzentrationen vor, wohingegen die inerten Materialien alle einen volumengewichteten Mediandurchmesser größer  $1 \mu\text{m}$  vorweisen und ihre Anzahlkonzentrationen zwei bis drei Größenordnungen kleiner sind. Die breiteste Verteilung weist Flugasche mit einer geometrischen Standardabweichung  $\sigma_{g,3}$  der Volumenverteilung von 3,0 auf. Die Flugasche weicht damit am stärksten von den in der Literatur zur Untersuchung der Morphologie von Partikelstrukturen verwendeten, hauptsächlich monodispersen Partikeln ab. Gleichzeitig stammt die Flugasche aus einem Kohlekraftwerk und stellt damit ein anwendungsnahes Partikelmaterial dar. Das höchste Verhältnis von el. Ladung der Partikeln zu Partikelmasse weist Funkenruß auf. Eine mit dem Funkenruß beladene Nucleopore-Membran wird von einer metallischen Pinzette elektrostatisch angezogen und haftet entgegen der Schwerkraft an dieser. Diese Beobachtung legt nahe, dass elektrostatische Kräfte bei der Abscheidung und Strukturbildung des Funkenrußes, auf einer einzelnen Faser, beachtet werden müssen. Die relative Feuchte  $\phi$  ist bei dem Propanruß-Aerosol am größten, da bei der Verbrennung zur Erzeugung des Rußes Wasser entsteht. Der Einfluss dieser Feuchtigkeit auf die Morphologie der Partikelstruktur wurde in Kapitel 2.3.2

untersucht. Die Massenströme der einzelnen Komponenten liegen in einem Bereich von 3 bis 125 mg/h. Dieser breite Bereich ist auf die unterschiedlichen Methoden zur Erzeugung des Aerosols und auf die stark schwankenden Massenströme des Dispergierers (vergleiche Abbildung 2.13) zurückzuführen.

Repräsentative Partikelstrukturen, welche bei der Abscheidung verschiedener reaktiver/brennbarer Partikelmaterialien auf einer einzelnen Faser entstehen, sind in Abbildung 2.28 gezeigt. Auf dem unteren Teil der Aufnahmen der Partikelstruktur aus Funkenruß sind Dendriten zu erkennen, die größer als die Dendriten aus Propanruß sind und einen größeren Abstand voneinander haben. Die Ursache hierfür könnten die höheren elektrostatischen Kräfte sein. Auf dem oberen Teil der Faser befindet sich eine große Partikelstruktur, die möglicherweise durch Abscheidung eines größeren Agglomerates auf der Faser entstanden ist. Die Partikelstrukturen aus Funkenruß, befinden sich hauptsächlich auf der Anströmseite der Faser und ragen weit senkrecht zur Strömungsrichtung über die Faser hinaus. Dies ist typisch (siehe Tabelle 2.1) für die Abscheidung über den Sperreffekt, was dafür spricht, dass der Funkenruß nicht nur über elektrostatische Kräfte, sondern auch durch den Sperreffekt abgeschieden wird. Carbon Black bildet, bei den verwendeten Bedingungen, inhomogene, wolkige Partikelstrukturen auf der Faser (rechts in Abbildung 2.28), welche die Faser teils vollständig umschließen. Auf der Aufnahme der Abströmseite (zweites Bild von rechts in Abbildung 2.28) ist mehr der blanken Faser zu erkennen als auf der Anströmseite (drittes Bild von Rechts in Abbildung 2.28), was zeigt, dass die Abscheidung auf der Anströmseite größer ist. Die Aufnahme der mit Carbon Black beladenen Faser legt die Vermutung nahe, dass Carbon Black in Form größerer Agglomerate auf der Faser abgeschieden wird. Gegen diese Vermutung spricht, der gemessene kleine volumengewichtete Mediandurchmesser der Partikeln im Aerosol von 445 nm. Für die Bildung der Partikelstruktur aus Carbon Black war eine Beladungszeit von 15 Minuten notwendig, wohingegen die Partikelstrukturen aus Propanruß und Funkenruß innerhalb einer Stunde gebildet wurden. Ein Grund hierfür ist der in Tabelle 2.9 angegebene größere Massenstrom von Carbon Black.

Partikelstrukturen aus Glaskugeln, Flugasche und Siliziumkarbid sind in Abbildung 2.29 dargestellt. Die Partikelstrukturen sind vergleichsweise klein und im Falle von Flugasche oder Siliziumkarbid, unregelmäßiger als bei den Glaskugeln.

Bei der Mischung von Aerosolen aus den inerten Partikelmaterialien in Abbildung 2.29 mit Propanruß und darauf folgende Abscheidung, entstehen die in Abbildung 2.30 gezeigten Strukturen. Ähnlich wie bei den Glaskugeln, führt der Propanruß bei der Flugasche zu größeren Partikelstrukturen. Analog zu den Abscheideuntersuchungen mit größeren Glaskugeln in Abbildung 2.23, sind in der Partikelstruktur aus Flugasche und Propanruß auch größere kugelförmige Partikeln zu erkennen. Dies spricht dafür, dass der Propanruß, auch bei Flugasche, das Abprallen größe-

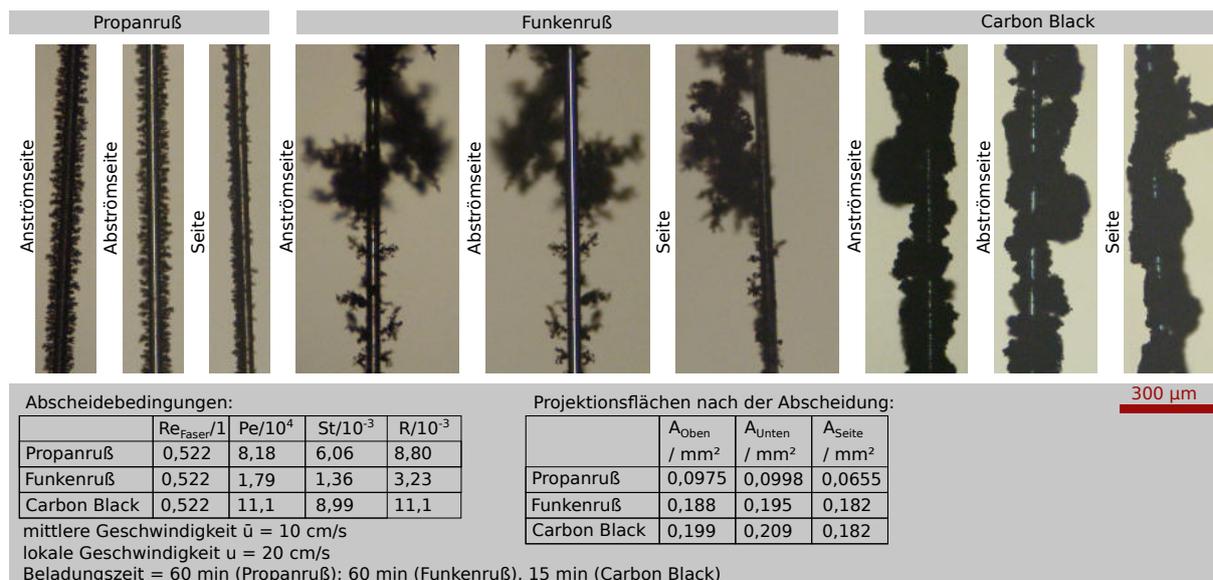


Abbildung 2.28: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß, Funkenruß oder Carbon Black, aus einem Aerosol bei 20 cm/s. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts.

rer Partikeln vermindert. Die in Kapitel 2.3.2 gewonnenen Erkenntnisse zur Abscheidung von Glaskugeln und Propanruß sind somit auf Flugasche qualitativ übertragbar. Die Partikelstruktur aus Propanruß und Siliziumkarbid ist ähnlich zu Partikelstrukturen aus reinem Ruß. Ein durch den schwankenden Massenstrom des Dispergierers zu geringer Anteil an Siliziumkarbid in dem Aerosol und in der Struktur, wird als Ursache dafür gesehen.

Abbildung 2.31 ordnet die vorgestellten Partikelstrukturen entsprechend ihrer Beladungsbedingungen in die Literatur ein. Diese Einordnung stützt die These aus Kapitel 2.3.2, dass die Morphologie von Partikelstrukturen aus mehreren Partikelmaterialien sich nicht alleine über die Stokes-Zahl und den Sperreffekt-Parameter einordnen lassen. Die Partikelstrukturen aus Carbon Black, Flugasche und Siliziumkarbid, zeigen zusätzliche Abweichungen von diesem Schema, wodurch gezeigt ist, dass sich die Morphologie von Partikelstrukturen, aus einem Partikelmaterial, auf Filterfasern praktisch nur bedingt anhand der Stokes-Zahl und dem Sperreffekt-Parameter vorhersagen lässt.

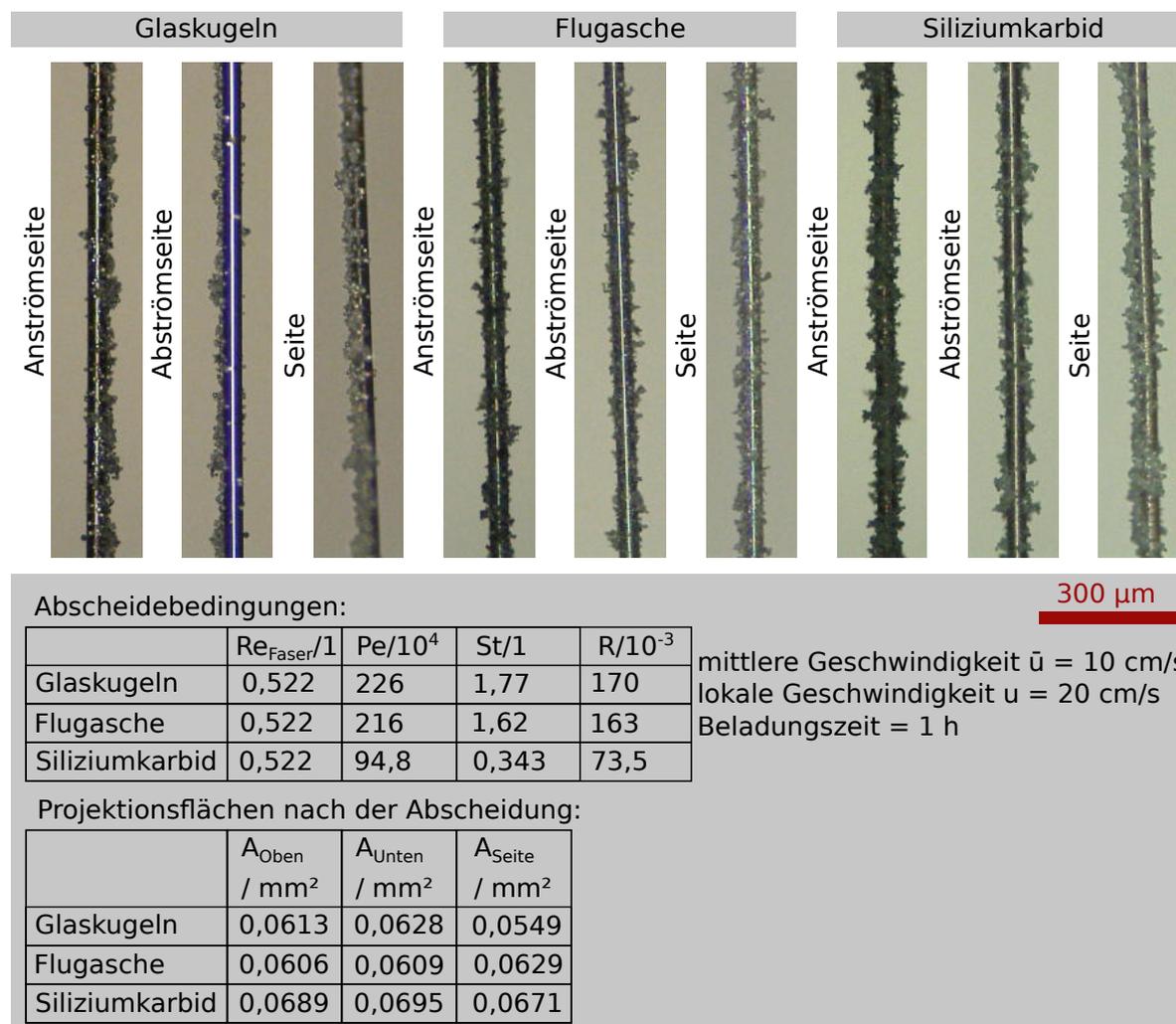


Abbildung 2.29: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Glaskugeln, Flugasche oder Siliziumkarbid, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts.

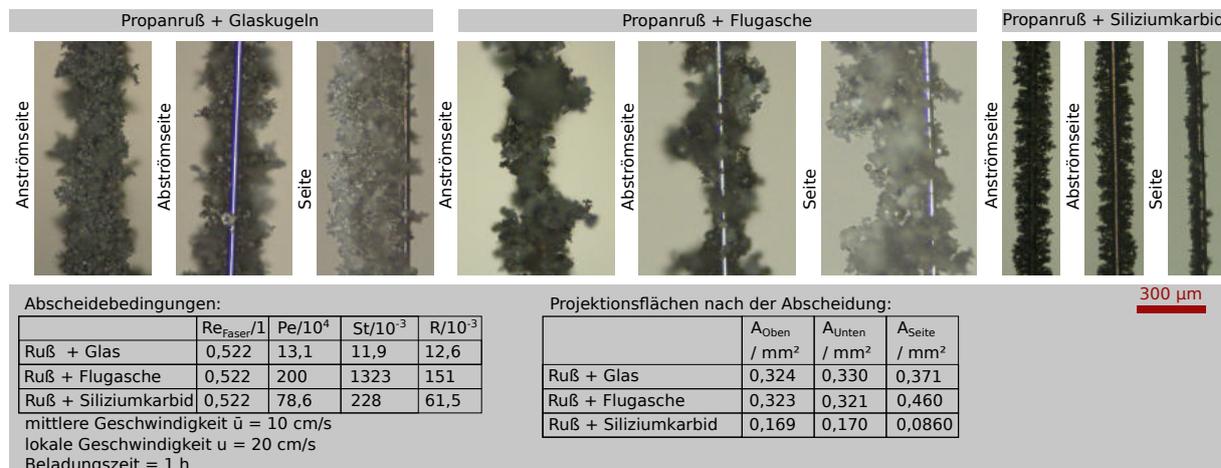


Abbildung 2.30: Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, Flugasche oder Siliziumkarbid, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts.

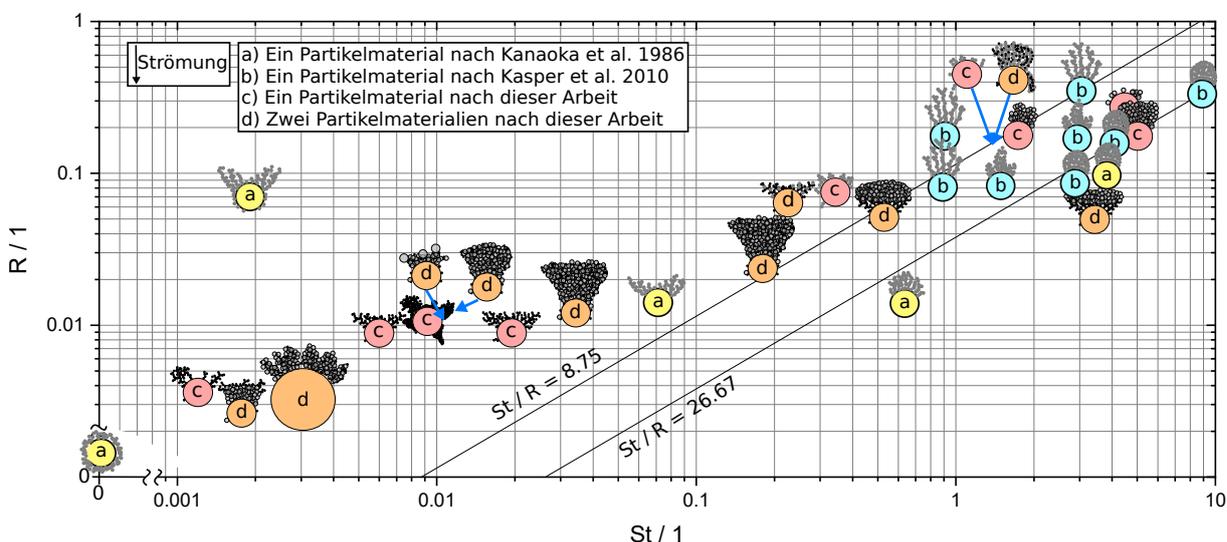


Abbildung 2.31: Morphologie von bei verschiedenen Stokes-Zahlen  $St$  und Sperrereffekt-Parametern  $R$  auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen. Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. Aus dieser Arbeit sind Partikelstrukturen verschiedener reaktiver und inerter Materialien dargestellt. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b])

## 2.5 Fazit zur Abscheidung reaktiver und inerter Partikeln auf einer einzelnen Faser

In der Literatur werden die verschiedenen Morphologien von Partikelstrukturen meist mit den über die Stokes-Zahl und den Sperrereffekt-Parameter charakterisierten Abscheidebedingungen in Zusammenhang gebracht und meist anhand von Partikeln eines Materials mit enger Größenverteilung untersucht [Kanaoka et al., 1986] [Kasper et al., 2010]. Eine Zusammenfassung der Literatur (Tabelle 2.1) zeigt, dass die auf der Faser abgeschiedenen Partikeln mit steigender Stokes-Zahl zuerst durch Diffusionsabscheidung gleichmäßig um die Faser herum verteilt sind, sich dann durch Sperrereffekt-Abscheidung auf die Seiten der Anströmfläche konzentrieren und anschließend durch Trägheitsabscheidung nahe des Staupunktes der Faser vorzufinden sind, wobei das zunehmende Abprallen der Partikeln die Morphologie von dendritisch, über Strukturen mit drei Ablagerungszentren, bis zu kompakten Strukturen auf der Anströmseite ändert. Zunehmendes Abprallen führt dabei zum Übergang von dendritischen zu kompakten Strukturen. Diese in der Literatur genannten Morphologien beziehen sich hauptsächlich auf Strukturen aus monodispersen Partikeln eines Materials, weshalb in dieser Arbeit die Untersuchung von Partikelstrukturen aus breit verteilten Partikeln unterschiedlichen Materials erfolgte. Als Partikelmaterialien wurden hierfür Propanruß ( $x_{50,3} = 325$  bis  $461$  nm), Carbon Black ( $x_{50,3} = 445$  nm), Funkenruß ( $x_{50,3} = 129$  nm), Glas ( $x_{50,3} = 5,6$  bis  $11,0$   $\mu\text{m}$ ), Flugasche ( $x_{50,3} = 6,5$   $\mu\text{m}$ ) und Siliziumkarbid ( $x_{50,3} = 2,9$   $\mu\text{m}$ ) eingesetzt, wobei die meisten Untersuchungen mit Propanruß und Glaskugeln erfolgten. Bei der Abscheidung wurden verschiedene lokale Strömungsgeschwindigkeiten von  $0,06$  m/s,  $0,2$  m/s,  $0,6$  m/s,  $0,8$  m/s und  $1,4$  m/s und Stahlfasern mit verschiedenen Durchmessern von  $40$   $\mu\text{m}$ ,  $150$   $\mu\text{m}$  und  $1200$   $\mu\text{m}$  verwendet.

Partikelstrukturen aus reinem Propanruß passen in die Angaben der Literatur und bilden für die Abscheidung über den Sperrereffekt typische, dendritische Strukturen auf den Seiten der Faser. Dass die Partikelstrukturen aus Propanruß sich eher auf der Seite der Faser, senkrecht zur Strömungsrichtung bilden, zeigt das mittlere Verhältnis der Höhe zur Breite der Partikelstruktur von  $0,514$  bei einer lokalen Strömungsgeschwindigkeit von rund  $0,6$  m/s und einem Faserdurchmesser von  $40$   $\mu\text{m}$ . Glaskugeln hingegen bilden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $0,6$  m/s und einem Faserdurchmesser von  $40$   $\mu\text{m}$ , Strukturen mit einem Höhen-Breiten-Verhältnis von  $1,22$  und lagern sich somit eher am Staupunkt der Faser ab, was typisch für die Trägheitsabscheidung ist. Partikelstrukturen, welche durch gleichzeitige Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln entstehen, weisen eine andere Morphologie auf, als es ihrer Stokes-Zahl und ihrem Sperrereffekt-Parameter entspricht. Das Höhen-Breiten-Verhältnis dieser Mischstrukturen beträgt  $1,11$  bei  $0,6$  m/s und einer  $40$   $\mu\text{m}$  Faser und die Strukturen sind wesentlich größer als die Strukturen aus reinem Propanruß oder reinen Glaskugeln, die in der gleichen Zeit auf der Faser gebildet werden. So beträgt die Projektionsfläche der Partikelstruktur in Strömungsrichtung auf einem  $1$  mm langen Abschnitt einer  $40$   $\mu\text{m}$  Faser nach gleichzeitiger Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln bei  $0,6$  m/s lokaler Strömungsgeschwindigkeit für eine Stunde  $0,718$   $\text{mm}^2$ , während

sie bei Propanruß  $0,212 \text{ mm}^2$  und bei Glaskugeln  $0,078 \text{ mm}^2$  beträgt. Damit kann aus den Angaben der Literatur, über die Morphologie von Partikelstrukturen aus nahezu monodispersen Partikeln eines Materials, nur bedingt auf die Partikelstrukturen geschlossen werden, die von polydispersen Partikeln unterschiedlichen Materials gebildet werden.

Zusätzlich wurde herausgefunden, dass Propanruß die gleichzeitige Abscheidung einer weiteren Komponente verbessert. Insbesondere können durch den Propanruß auch größere Partikeln auf der  $40 \text{ }\mu\text{m}$  Faser abgeschieden werden, die ohne den Ruß bei  $0,6 \text{ m/s}$  lokaler Strömungsgeschwindigkeit von der Faser abprallen, was anhand großer Glaskugeln ( $x_{50,3} = 11,0 \text{ }\mu\text{m}$ ) gezeigt wurde. Auch bei der konsekutiven Abscheidung, bei welcher zuerst bei  $0,2 \text{ m/s}$  für eine Stunde lang Ruß-Dendriten auf der Faser gebildet werden und anschließend 15 Minuten lang Glaskugeln auf den Ruß-Dendriten abgeschieden werden, führt Propanruß zu einer verbesserten Abscheidung des zweiten Partikelmaterials. Die Projektionsfläche der Struktur in Strömungsrichtung betrug nach dieser konsekutiven Abscheidung  $0,264 \text{ mm}^2$  auf  $1 \text{ mm}$  Faserlänge, wohingegen sie bei der Abscheidung mit gleicher Strömungsgeschwindigkeit für eine Stunde  $0,0975 \text{ mm}^2$  bei reinem Propanruß und  $0,0631$  bei reinen Glaskugeln betrug. Ein Abschlagen von Ruß-Dendriten durch einzelne, impaktierende Glaskugeln ( $x_{50,3} = 6,8 \text{ }\mu\text{m}$ ) konnte auch bei lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bis zu  $1,4 \text{ m/s}$  nicht beobachtet werden. Bei Partikelstrukturen, die durch die gleichzeitige oder konsekutiven Abscheidung auf einer  $40 \text{ }\mu\text{m}$  Faser gebildet wurden, konnten ab einer Projektionsfläche in Strömungsrichtung von  $1,17 \text{ mm}^2$  pro  $\text{mm}$  Faserlänge Ausbrüche und Lücken in der Partikelstruktur gefunden werden, die für die Ablösung bei der Strömungsgeschwindigkeit von  $0,6 \text{ m/s}$  sprechen. Im Folgenden soll dieses Ablösen und insbesondere der Einfluss der Oxidation der reaktiven Komponente auf die Ablösung, untersucht werden.

### **3 Ablösung von Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln von einer Faser durch Umströmung mit oder ohne gleichzeitige Reaktion**

Partikelstrukturen wie sie in Kapitel 2 gebildet und charakterisiert wurden können in Apparaten unerwünscht sein, weshalb sie vom zylindrischen Kollektor/ von der Faser entfernt werden sollen. Aus diesem Grund wird in Kapitel 3 untersucht in welchem Umfang sich verschiedene Partikelstrukturen, abhängig von den herrschenden Bedingungen, durch Anströmung mit Luft ablösen. Im Folgenden wird zuerst eine Übersicht der Literatur zur Ablösung von Partikeln von Fasern, zu den dabei relevanten Kräften und zu der Reaktion von Ruß gegeben. Anschließend wird eine Apparatur vorgestellt, mit welcher die Ablösung untersucht werden kann. Dabei wird auf die Weiterentwicklung der für diesen Zweck verwendeten Messtechnik eingegangen. Auf die Charakterisierung der Apparatur folgt eine mit dieser durchgeführte Parameterstudie zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer 40 µm Stahlfaser. Bei dieser Parameterstudie wird der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit, der Faserbeladung und der Temperatur, als auch der mit hoher Temperatur verbundenen Reaktion, auf die Ablösung experimentell und theoretisch untersucht. Zuletzt wird eine mikroskopische Analyse der Ablösung, der verschiedenen in Kapitel 2.4 vorgestellten Partikelmaterialien, durchgeführt.

#### **3.1 Stand der Forschung zur Ablösung und Übersicht von dabei relevanten Themen**

##### **3.1.1 Stand der Forschung zur Ablösung inerter Partikelstrukturen von Fasern ohne gleichzeitige Reaktion**

Die Ablösung / das Abblasen von einzelnen Partikeln und Partikelstrukturen von einzelnen Filterfasern wurde bisher nur wenig untersucht, weil Filter gängigerweise bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten betrieben werden, als sie für das Ablösen bei starren Filterfasern, ohne Reaktion, notwendig sind. Grund hierfür ist, dass Partikeln bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten von den Fasern abprallen anstatt abgeschieden zu werden. Beispielsweise prallen bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s mehr als 50% an 10 µm Quarzpartikeln von einer Faser ab [Hiller und Löffler, 1980], wo hingegen für das Abblasen von mehr als 50% an einzelnen 10 µm Quarzpartikeln von einer Faser Strömungsgeschwindigkeiten über 10 m/s erforderlich sind [Löffler, 1972]. Aus diesem Grund wurde die Ablösung von auf Fasern abge-

schiedenen Partikeln hauptsächlich vor dem Hintergrund der Freisetzung von Krankheitserregern aus Atemschutzmasken untersucht [Qian et al., 1997b] [Qian et al., 1997a], bei denen bereits die Freisetzung kleiner Mengen an Partikelmaterial aus dem Filter von Relevanz ist. Im Folgenden werden die aus der Literatur bekannten Einflussgrößen auf die Ablösung dargestellt.

Die Einflussgrößen auf die Ablösung lassen sich grob unterteilen in solche, welche die Strömungskräfte auf die Partikelstruktur beeinflussen und solche, welche die Haftkräfte/Festigkeit der Partikelstruktur beeinflussen. Dabei nimmt der Anteil abgelöster Partikeln zu, wenn die Strömungskräfte erhöht und die Haftkräfte verringert werden. Bezüglich der Strömungskräfte nimmt die Ablösung von Partikeln mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und mit steigendem Partikeldurchmesser zu [Qian et al., 1997b]. Die Ablösung hängt nicht davon ab wie schnell die zu untersuchende Strömungsgeschwindigkeit erreicht wird und eine erneute Beaufschlagung der Partikeln mit der gleichen Strömungsgeschwindigkeit führt nicht zu einem höheren Anteil an abgelösten Partikeln [Qian et al., 1997b]. Sobald die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit erreicht ist, findet die Ablösung innerhalb von Millisekunden statt [Qian et al., 1997a]. Ein Ablösen mit einer Strömungsrichtung, welche entgegengesetzt zur Strömungsrichtung bei der Abscheidung gerichtet ist, führt zu einer leichten Erhöhung des Anteils abgelöster Partikeln [Jankowska et al., 2000] [Qian et al., 1997b].

Die Haftkräfte werden hingegen über die Geschwindigkeit der Partikeln bei der Abscheidung, die Luftfeuchtigkeit, die Materialien, elektrostatische Kräfte und die Partikelgröße beeinflusst. Eine größere Geschwindigkeit bei der Abscheidung der Partikeln, führt dazu, dass größere Geschwindigkeiten für die Ablösung der Partikeln benötigt werden [Löffler, 1972]. Dies beruht darauf, dass bei der Abscheidung mit hoher Geschwindigkeit eine Vorauswahl an gut haftenden Partikeln stattfindet [Löffler, 1972]. Die Ablösung ist von den verwendeten Materialien von Filter und Partikeln [Qian et al., 1997b] [Jankowska et al., 2000] abhängig und eine höhere Luftfeuchte verringert den Anteil abgelöster Partikeln [Qian et al., 1997a]. Bei elektrostatisch geladenen Filtern ist der Anteil abgelöster Partikeln kleiner als bei entladenen Filtern [Qian et al., 1997b]. Für die Ablösung größerer Partikeln werden größere Strömungswiderstandskräfte benötigt [Löffler, 1972], diese werden bei größeren Partikeln schon bei geringeren Geschwindigkeiten erreicht, da die Anströmfläche der Partikeln größer ist.

Die bisher vorgestellten Ergebnisse aus der Literatur gelten für schwach beladene Fasern, mit vielen Partikel-Faser und wenigen Partikel-Partikel-Kontakten. Partikelstrukturen mit vielen Partikel-Partikel und wenigen Partikel-Faser-Kontakten können sich allein durch Strömungskräfte ab 1,2 m/s ablösen. Dabei streuen die Ergebnisse zur Ablösung stark, aufgrund der ebenfalls streuenden Struktur. Wird die erste Lage an Partikeln auf der Faser fixiert, lösen sich die Partikeln in der zweiten Lage erst bei höheren Geschwindigkeiten ab. [Löffler, 1972]

Eine theoretische Beschreibung der Ablösung kann über die Bilanzierung von Kräften und Drehmomenten erfolgen. In dem Modell der Ablösung über die Kräftebilanz, löst sich eine Partikel ab, sobald die Strömungswiderstandskraft die Haftkraft übersteigt. Die in [Löffler, 1972] aus der Anströmgeschwindigkeit stromaufwärts der Faser bestimmten Strömungskräfte, bei welchen Ablösung auftritt, stimmen gut mit den durch Zentrifugenversuchen bestimmten Haftkräften überein. Ein weiteres Modell definiert als Ablösekriterium, dass das durch die Strömungswiderstandskraft verursachte Moment um einen Drehpunkt der Partikelstruktur größer sein muss als das durch die Haftkräfte erzeugte entgegengesetzte Moment [Zieskind et al., 1997]. Das Drehmomenten-Modell ist vermutlich besonders bei großen Partikelstrukturen, mit stark unterschiedlichen Hebelarmen für Strömungswiderstandskraft und Haftkraft, relevant.

Diese Literaturübersicht zeigt, dass bisherige Untersuchungen zur Ablösung von Partikeln und Partikelstrukturen von Fasern ausschließlich an Partikelstrukturen durchgeführt wurden, die sich während des Ablöseversuches nicht durch Reaktion ändern. In dieser Arbeit soll deshalb der Einfluss einer Reaktion auf die Ablösung grundlegend untersucht werden.

### 3.1.2 Übersicht zu Strömungskräften auf Partikelstrukturen und deren Festigkeit

Die Literaturübersicht zur Ablösung von Partikelstrukturen von einzelnen Fasern in Kapitel 3.1.1 hat gezeigt, dass sich die bisher untersuchten Einflussgrößen über die Änderung der Strömungskräfte oder der Festigkeit der Struktur, durch eine Änderung der Haftkräfte, auf die Ablösung auswirken. Dieses Kapitel beschäftigt sich deshalb näher mit den Strömungskräften, den in den Partikelstrukturen oder den zwischen den Partikelstrukturen und der Faser auftretenden Haftkräften und der Festigkeit der Partikelstruktur.

Die Strömungswiderstandskraft  $F_W$  auf verschiedene Körper wird meist aus dem dynamischen Druck in dem Fluid, der Projektionsfläche des Körpers in Strömungsrichtung  $A$  und einem Widerstandsbeiwert  $c_W$  berechnet:

$$F_W = \frac{\rho_F}{2} \cdot u^2 \cdot A \cdot c_W \quad (3.1)$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_W$  hängt von der Geometrie des Körpers, der Anströmrichtung und der Strömung ab, welche durch die Reynolds-Zahl beschrieben wird.

$$\text{Reynolds-Zahl: } Re = \frac{\rho_F u l_C}{\eta_F} \quad (3.2)$$

Hierbei ist  $l_C$  eine charakteristische Länge des Körpers. In der Literatur sind verschiedene Korrelationen für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes für einfache geometrische Formen aufgeführt. Der Widerstandsbeiwert einer Partikelstruktur auf einer Faser kann zum Beispiel mit dem Widerstandsbeiwert eines Zylinders und der Widerstandsbeiwert kleiner, abgelöster Strukturbestandteile über den Widerstandsbeiwert einer Kugel, abgeschätzt werden. Ein Fit an die Messdaten aus [Finn, 1953] führt zu folgender Formel für die Berechnung des Widerstandsbeiwertes eines Zylinders:

$$c_{W,Zylinder} = 13,15836 \cdot Re^{-0,61816} \quad (3.3)$$

Dieser Fit gibt die Messdaten in einem Reynolds-Zahlenbereich von 0,06 bis 72 mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,98 wieder. Als charakteristische Länge  $L_C$  für die Reynoldszahl wird dabei der Durchmesser des Zylinders verwendet.

Der Widerstandsbeiwert einer Kugel lässt sich im Reynolds-Zahlenbereich von 0 bis  $10^5$  nach [Martin, 1980] berechnen, wobei die charakteristische Länge zur Berechnung der Reynoldszahl der Kugeldurchmesser ist:

$$c_{W,Kugel} = \frac{1}{3} \left( \sqrt{\frac{72}{Re}} + 1 \right)^2 \quad (3.4)$$

Partikelstrukturen sind im Gegensatz zu Vollkörpern permeabel und haben eine meist unregelmäßige Form. Die Permeabilität führt dabei zu einer Verringerung des Strömungswiderstandes [Singh und Gupta, 1971], was sich dadurch erklären lässt, dass ein Teil des Fluides nicht durch den Körper umgelenkt werden muss, sondern durch diesen hindurch fließen kann. Der Einfluss einer nicht sphärischen Struktur auf den Widerstandsbeiwert hängt von der genauen Partikelform ab, in den meisten Fällen ist der Widerstandsbeiwert aber höher als bei einer Kugel und nimmt ähnlich wie bei dieser mit steigender Reynoldszahl ab [Hölzer und Sommerfeld, 2008].

Bei der Umströmung eines Zylinders ist zusätzlich zu dem Widerstandsbeiwert zu beachten, dass sich ab einer bestimmten Reynolds-Zahl Wirbel im Nachlauf bilden, welche sich alternierend vom Zylinder ablösen können. Durch eine alternierende Ablösung von Wirbeln erfährt der Zylinder, bzw. eine auf dem Zylinder vorhandene Partikelstruktur, eine wechselnde Beanspruchung. Die verschiedenen Strömungsbereiche bei der Umströmung eines Zylinders sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Die angegebenen Bereiche haben keine scharfen Grenzen. Tabelle 3.1 zeigt, dass ab einer Reynoldszahl von 80 mit einer wechselnden Ablösung von Wirbeln zu rechnen ist.

Hat eine Partikelstruktur oder eine einzelne Partikel einen wesentlich größeren Durchmesser als die Faser / der Zylinder an dem sie haftet, kann die Strömungswiderstandskraft auf die

Tabelle 3.1: Inkompressible Strömung um einen Zylinder nach [Schlichting et al., 2006]

Reynolds-Zahl	Strömung
gegen 0	schleichende Strömung ohne Nachlauf
3 bis 40	stationäres Wirbelpaar im Nachlauf
30 bis 90	instabiler Nachlauf
80 bis 300	wechselnde Ablösung von Wirbeln (Kármánsche Wirbelstraße)
150 bis $1,3 \cdot 10^5$	instabile Wirbelstraße
$10^5$ bis $3,5 \cdot 10^6$	turbulenter Nachlauf
$> 3,5 \cdot 10^6$	turbulente Ablösung

Partikelstruktur / die Partikel, je nach Geometrie, anhand der Widerstandsbeiwerte aus den Gleichungen 3.3 und 3.4 mit der ungestörten Anströmgeschwindigkeit weit stromaufwärts der Faser  $u$  abgeschätzt werden. Ist der Durchmesser der Partikelstruktur / der Partikel klein im Vergleich zur Faser muss der Einfluss der Faser auf die Strömung beachtet werden. Dieser Einfluss kann anhand der Geschwindigkeit in Umfangsrichtung am äußeren Rand der Geschwindigkeitsgrenzschicht des Zylinders  $u_{Rand}$  nach [Sogin und Subramanian, 1961] verdeutlicht werden:

$$\frac{u_{Rand}}{u} = 3,64 \left( \frac{b}{d_{Zylinder}} \right) - 3,2 \left( \frac{b}{d_{Zylinder}} \right)^3 \quad (3.5)$$

$d_{Zylinder}$  ist dabei der Durchmesser des Zylinders und  $b$  bezeichnet die Länge des Kreisbogens vom Staupunkt des Zylinders bis zu der Stelle an welcher die Geschwindigkeit  $u_{Rand}$  berechnet werden soll. Das Geschwindigkeitsverhältnis  $u_{Rand}/u$  ist 0 direkt am Staupunkt und steigt anschließend bis zu einem Maximum an der Stelle  $b/d_{Faser} = 0,62$  von 1,49 an. Gleichung 3.5 gilt für eine Reynoldszahl von 122000, womit sie nicht quantitativ auf die Untersuchungen dieser Arbeit übertragen werden kann. Die Gleichung zeigt jedoch die Möglichkeit einer lokalen Strömungsgeschwindigkeit, welche höher oder niedriger als die Geschwindigkeit der ungestörten Anströmung ist. Diese Möglichkeit muss auch bei geringeren Reynoldszahlen in Betracht gezogen werden. Auf dem Zylinder abgeschiedene Partikeln beeinflussen die Strömung um den Zylinder. Für kleine Partikeln oder Partikelstrukturen kann die Strömungswiderstandskraft näherungsweise berechnet werden, indem die lokale Geschwindigkeit an der Stelle in der ungestörten Strömung um einen Zylinder, an welcher sich die Partikel / die Partikelstruktur befindet, zur Berechnung verwendet wird [Löffler, 1972].

Neben der Strömungswiderstandskraft sind die Festigkeit der Partikelstruktur  $\sigma$  und die Haftkräfte  $F_H$  zwischen Partikeln und zwischen Partikeln und Faser entscheidend bei der Ablösung von Partikelstrukturen von einer umströmten Faser. Die Zugfestigkeit einer Struktur kann mit ihrer Porosität  $\epsilon$ , der mittleren Haftkraft an den Kontaktstellen der Partikeln  $\bar{F}_H$  und dem oberflächengewichteten mittleren Durchmesser (Sauterdurchmesser) der Partikeln  $\bar{x}_2$  nach [Rumpf,

1970] berechnet werden:

$$\sigma = \frac{1 - \varepsilon \bar{F}_H}{\varepsilon \bar{x}_2^2} \quad (3.6)$$

In [Schubert, 1975] wird davon berichtet, dass Rechnungen mit Gleichung 3.6 um den Faktor 10 von experimentellen Ergebnissen abweichen können. Insbesondere muss darauf hingewiesen werden, dass die Gleichung ursprünglich für monodisperse Partikeln hergeleitet wurde und nur in erster Näherung durch Verwendung des Sauterdurchmessers auf polydisperse Partikelstrukturen übertragen werden kann [Rumpf, 1970]. Die Übertragbarkeit auf die in dieser Arbeit vorliegenden Partikelstrukturen aus polydispersen Partikeln unterschiedlichen Materials ist damit fraglich, eine besser geeignete Gleichung ist jedoch nicht bekannt.

Gängige Haftkräfte  $F_H$  können aus elektrostatischen Wechselwirkungen, Flüssigkeitsbrücken und Van-der-Waals Wechselwirkungen resultieren. Haftkräfte  $F_{H,el}$  durch elektrostatische Wechselwirkungen können für zwei Punktladungen und näherungsweise für zwei Partikeln, nach dem Coulombschen Gesetz berechnet werden [Peart, 2001]:

$$F_{H,el,OO} = \frac{q_1 q_2}{4 \pi \varepsilon_0 z^2} \quad (3.7)$$

Dabei sind  $q_1$  und  $q_2$  die elektrischen Ladungsmengen der beiden Punktladungen,  $z$  ist ihr Abstand und  $\varepsilon_0$  ist die elektrische Feldkonstante. Das Coulombsche Gesetz gilt sowohl für elektrische Leiter und Isolatoren. Die Haftkraft zwischen Partikel und Faser kann, bei Partikeln deren Durchmesser wesentlich kleiner ist als der Faserdurchmesser, durch die Haftkraft zwischen Partikel und ebener Fläche angenähert werden. Die Coulombsche Wechselwirkungskraft zwischen einer elektrisch leitfähigen, geerdeten ebenen Fläche und einer elektrisch geladenen Partikel  $F_{H,el,O|}$  folgt aus dem Prinzip der Spiegelladung/Bildladung und entspricht der Coulombkraft zwischen der elektrisch geladenen Partikel und einer sich symmetrisch zur ebenen Oberfläche gedachten Spiegelung des Partikels mit gleicher Ladung. Dementsprechend kann auch zur Berechnung der elektrostatischen Kraft zwischen Partikel und Faser das Coulombsche Gesetz (Gleichung 3.7) verwendet werden. [Peart, 2001]

Für die Berechnung der Haftkräfte durch Van-der-Waals Wechselwirkungen gibt es zwei gängige Modelle. Das Modell nach Derjaguin, Muller und Toporov (DMT-Modell) [Derjaguin et al., 1975] für harte Materialien, die sich nicht oder fast nicht an der Kontaktstelle verformen und das Modell nach Johnson, Kendall und Roberts (JKR-Modell) [Johnson et al., 1971] für weiche Materialien, bei denen die Verformung der Kontaktstelle beachtet werden muss. Welches dieser Modelle für welches Material geeigneter ist, kann anhand des dimensionslosen Parameters  $\Pi$  entschieden werden [Tsai et al., 1991]:

$$\Pi = \frac{8}{\pi} \left( \frac{4 \Delta \gamma^2 X}{9 \pi K^2 a_0^3} \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

$$K = \frac{4}{3} \left( \frac{1 - \psi_1^2}{E_1} + \frac{1 - \psi_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (3.9)$$

$$X = \frac{1}{2} \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} \quad (3.10)$$

$$\Delta \gamma = \frac{H_{1,2}}{12 \pi a_0^2} \quad (3.11)$$

mit dem kleinsten Abstand an der Kontaktstelle (Kontaktabstand)  $a_0$ , der Poisson-Zahl  $\psi$  des Materials von Körper 1 und 2, dem Elastizitätsmodul  $E$  und der Hamaker-Konstanten  $H_{1,2}$  für die Materialkombination von Körper 1 und 2. Wenn  $\Pi \ll 1$  ist, ist das DMT-Modell passender und bei  $\Pi \gg 1$  das JKR-Modell. Die Kraft zum trennen des Kontaktes der beiden Kugeln nach dem DMT-Modell ist die Gleiche wie nach dem ebenfalls geläufigen Modell nach Hamaker [Hamaker, 1937] und kann für zwei gleich große Kugeln  $F_{H,VdW,OO}$  oder eine Kugel und eine Platte  $F_{H,VdW,O|}$  mit folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$F_{H,VdW,OO} = \frac{H_{1,2}}{24} \frac{x}{a_0^2} \quad (3.12)$$

$$F_{H,VdW,O|} = \frac{H_{1,2}}{12} \frac{x}{a_0^2} \quad (3.13)$$

Die Hamaker-Konstante für unterschiedliche Materialkombinationen kann aus den Hamaker-Konstanten bei gleichen Materialien berechnet werden [Eichenlaub et al., 2002]:

$$H_{1,2} = \sqrt{H_{1,1} \cdot H_{2,2}} \quad (3.14)$$

Die dritte mögliche Haftkraft  $F_{H,fl}$  kommt durch Flüssigkeitsbrücken zustande. Flüssigkeitsbrücken können durch auskondensieren von Wasser aus der Luft an den Kontaktstellen von Partikeln entstehen. In Messungen mit dem Atomic Force Microscope (AFM) wurde eine erste Steigerung der Haftkraft, durch auskondensierte Flüssigkeit, ab einer relativen Luftfeuchte von 10% festgestellt [Thundat et al., 1993]. Eine weitere Steigerung der relativen Feuchte von 10% bis auf 70% führte zu einer Verdopplung der Haftkraft [Thundat et al., 1993]. Aus dem Freischneiden einer Flüssigkeitsbrücke an ihrer engsten Stelle mit dem Radius  $r_{min}$  und dem Bilanzieren der Kräfte folgt, dass sich die Haftkraft aus einer Randkraft  $F_R$  und einer Kapillarkraft  $F_K$  zusammensetzt. Für die Flüssigkeitsbrücke zwischen einer Kugel und einer Platte oder zwischen zwei Kugeln gilt damit [Schubert, 1982]:

$$F_{H,fl} = F_R + F_K = 2\pi r_{min} \gamma + \pi r_{min}^2 PK \quad (3.15)$$

Die Randkraft  $F_R$  kommt dabei von der Grenzflächenspannung  $\gamma$  und die Kapillarkraft  $F_K$  von der Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Brücke und der Umgebung  $p_K$ . Die Berechnung des minimalen Radius  $r_{min}$  der Brücke wurde in [Schubert, 1982] durch numerisches Lösen der Laplace-Gleichung durchgeführt. Schubert gibt Diagramme an, mit welchen die Haftkraft  $F_{H,fl}$  durch Flüssigkeitsbrücken zwischen zwei Kugeln oder zwischen einer Kugel und einer Platte, in Abhängigkeit geometrischer Größen der Brücke, bestimmt werden kann.

Die genannten Haftkräfte können gemeinsam auftreten und sich gegenseitig beeinflussen. Van-der-Waals Kräfte werden durch Flüssigkeitsbrücken verringert, weil die Hamaker-Konstante in Flüssigkeiten generell kleiner ist [Yang et al., 2016]. Coulombsche elektrostatische Kräfte können durch einen Ladungsausgleich durch Flüssigkeitsbrücken verringert werden und ein durch elektrische Ladungen erzeugtes elektrisches Feld kann Flüssigkeitsbrücken verformen [Yamamoto et al., 1995].

Die mit den vorgestellten Gleichungen berechneten Haftkräfte können stark von gemessenen Haftkräften abweichen, wenn Oberflächeneigenschaften wie die Rauigkeit der sich berührenden Körper, adsorbierte Stoffe oder Oxidschichten nicht beachtet werden. Beispielsweise wird von Messungen berichtet, in denen die Van-der-Waals-Kraft zwischen 8  $\mu\text{m}$  Glaskugeln und einer atomar glatten Mica-Oberfläche um den Faktor 51 und zwischen 8  $\mu\text{m}$  Polystyrol-Kugeln und der Mica-Oberfläche um den Faktor 178 kleiner ist, als mit dem JKR-Modell berechnet [Schaefer et al., 1995]. Dies wurde auf die Rauigkeit der Kugeloberflächen zurückgeführt [Schaefer et al., 1995]. An der Oberfläche adsorbierte Schichten aus Kohlenwasserstoffen, können die Van-der-Waals-Kraft um den Faktor 2 reduzieren [Cohen, 1992], was auch für Oxidschichten im Vergleich zu reinen metallischen Oberflächen aus Nickel beobachtet wurde [Pashley et al., 1984].

Die Temperatur und insbesondere die hohe Temperatur von Partikeln und Faser, wie sie in dieser Arbeit für die Verbrennung von Ruß notwendig ist, kann die Haftkräfte auf verschiedene Arten beeinflussen. Mögliche Mechanismen sind beispielsweise elastische Deformation, plastische Deformation, Sintern, viskoelastische Abflachungen und chemische Veränderung der Oberfläche durch Reaktion [Bebner und Löffler, 1994]. Zusätzlich kann sich die Hamaker-Konstante mit der Temperatur erhöhen, was bisher für Kupfer, Gold und Silber gezeigt wurde [Jiang und Pinchuk, 2016]. Die Haftkraft durch Flüssigkeitsbrücken nimmt unter 100°C mit steigender Temperatur zu, da die Brücken mit einer höheren Rate gebildet werden und ab 150°C mit weiter steigender Temperatur ab, da die Brücken verdampfen [Lai et al., 2015]. Eine Auswirkung der Temperatur auf die Haftkräfte durch andere auf der Oberfläche auskondensierte oder adsorbierte Stoffe, wie zum Beispiel Kohlenwasserstoffe, ist zu erwarten. Ein Beispiel für den Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit von Filterkuchen bei der Heißgasfiltration, ist die Erhöhung der Zugfestigkeit des Filterkuchens aus einer Wirbelschicht-Verbrennung von 30 auf 75  $\text{N/m}^2$ , bei

einer Temperatursteigerung von 700 auf 750°C [Hurley und Dockter, 2003].

Dieses Kapitel zeigt, dass die Strömungskräfte, welche auf die auf einer Faser abgeschiedenen Partikelstrukturen wirken, analytisch nur mit den Strömungskräften auf geometrische Grundkörper abgeschätzt werden können. Da die Widerstandsbeiwerte einer Kugel und eines Zylinders aber eine ähnliche Abhängigkeit von der Reynoldszahl aufweisen wie kubische, isometrische, plättchen- oder scheibenförmige Partikel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], wird erwartet, dass auch eine ähnliche Abhängigkeit bei Partikelstrukturen auf einer Faser vorliegt. Weil sich die Strömungsgeschwindigkeit, die Größe des Körpers und die Temperatur über die Reynoldszahl auf die Strömungswiderstandskraft auswirken, sollte der Einfluss dieser Größen auf die Strömungswiderstandskraft von Kugel, Zylinder und Partikelstruktur analog und somit über die Korrelationen für den Widerstandsbeiwert von Kugel und Zylinder beschreibbar sein. Diese Korrelationen werden deshalb im Folgenden verwendet um theoretische Erklärungen für die bei den Ablöseversuchen erhaltenen Ergebnissen zu bieten. Auch die Festigkeiten und Haftkräfte in den untersuchten Partikelstrukturen sind nicht exakt berechenbar. Grund dafür ist, dass sie aus mehreren, unterschiedlichen Partikelmaterialien bestehen, mit unterschiedlichen auf der Oberfläche adsorbierten Stoffen, wie Wasser oder Kohlenwasserstoffen und unbekanntem Oberflächeneigenschaften an den Kontaktstellen. Auch hier sollen die vorgestellten Berechnungsgleichungen nur dazu verwendet werden um theoretische Erklärungen für den experimentell beobachteten Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit, Partikelstrukturgröße und Temperatur zu finden und die neuen Ergebnisse im Kontext der Literatur zu diskutieren.

### 3.1.3 Übersicht zu den Eigenschaften von Ruß und seiner Oxidation

Eine der zentralen Fragestellungen dieser Arbeit ist, wie sich das Verschwinden einer Komponente der Partikelstruktur, durch Oxidation/Verbrennung, auf die Ablösung der Partikelstruktur von der Faser auswirkt. Als reaktive Komponente werden in dieser Arbeit verschiedene Arten von Ruß verwendet. Um den Einfluss der verschiedenen Rußarten und ihrer Verbrennung auf die Ablösung besser verstehen zu können, werden der Aufbau von Ruß, seine charakteristischen Eigenschaften und seine Verbrennung in diesem Kapitel vorgestellt.

Ruß entsteht bei der Verbrennung durch viele parallele Reaktionen und verschiedene Mechanismen, welche noch nicht vollständig aufgeklärt sind. Zusammengefasst wird Ruß in einer Gasflamme in den folgenden Schritten a bis e gebildet [Mansurov, 2005]:

- a) Gasphasenreaktion: Präkusoren wie beispielsweise Acetylen bilden polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK's) und Polyacetylen.

- b) Keimbildung: PAK's lagern sich zu Keimen zusammen.
- c) Oberflächenwachstum: Die Keime wachsen zu Primärpartikeln an, indem zusätzliche PAK's und Acetylen an der Oberfläche reagieren.
- d) Koagulation: Die Primärpartikeln können mit anderen Primärpartikeln kollidieren und über Oberflächenwachstum zu Aggregaten zusammenwachsen oder, bei zu geringen Konzentrationen an PAK's und Acetylen in der Gasphase, Agglomerate bilden.
- e) Oxidation: Teilweise Oxidation des Rußes in der Flammenfront.

In einem mit Inertgas und Kohle-Elektroden betriebenen Funkengenerator, wird Funkenruß in den folgenden Schritten a bis c gebildet [Tabrizi et al., 2009]:

- a) Verdampfung: Durch einen Funken zwischen den Elektroden verdampft Elektrodenmaterial.
- b) Keimbildung: Das verdampfte Elektrodenmaterial kondensiert aus und bildet Primärpartikeln.
- c) Kollisionswachstum: Primärpartikeln kollidieren und bilden Agglomerate.

Der allgemeine Aufbau eines Ruß-Agglomerates ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Einzelne Schichten aus Graphen formen Primärpartikeln, welche wiederum mit anderen Primärpartikeln fest verbunden sein können und auf diese Weise Aggregate bilden. Die Aggregate und Primärpartikeln können sich, über die in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Haftkräfte, zu Agglomeraten zusammenlagern. Auf der Oberfläche der Agglomerate können Kohlenwasserstoffe adsorbiert und im Inneren der Agglomerate Aschepartikeln enthalten sein. [Mansurov, 2005]

Die Anordnung der Graphenschichten im Ruß wird als Nanostruktur bezeichnet und kann bei verschiedenen Ruß-Arten variieren. Beispielsweise sind die Graphenschichten in Funkenruß, der mit Stickstoff als Inertgas hergestellt wird, schichtweise wie in Graphit angeordnet, wohingegen bei der Herstellung mit Argon als Inertgas eine unregelmäßige/amorphe Anordnung vorliegt [Hagen et al., 2020]. In Carbon Black aus dem Furnace-Verfahren liegt eine Kern-Hülle Struktur vor, in welcher die Hülle aus geordneten Graphenschichten besteht und der Kern amorph ist [Pfau et al., 2018]. Propanruß weist bei mageren/brennstoffarmen Verbrennungsbedingungen eher eine zwiebelartige und bei fetten/brennstoffreichen Verbrennungsbedingungen eher eine amorphe Anordnung der Graphenschichten auf [Ess et al., 2019]. Die Nanostruktur der Ruß-Partikeln ist ausschlaggebend für ihre Reaktivität, unter welcher der Kehrwert der Temperatur verstanden wird, bei dem die Oxidationsrate bei einem Versuch mit konstanter Temperatursteigerung am höchsten ist [Hagen et al., 2021]. Ruß mit kurzen Graphenschichten und einer breiten Verteilung

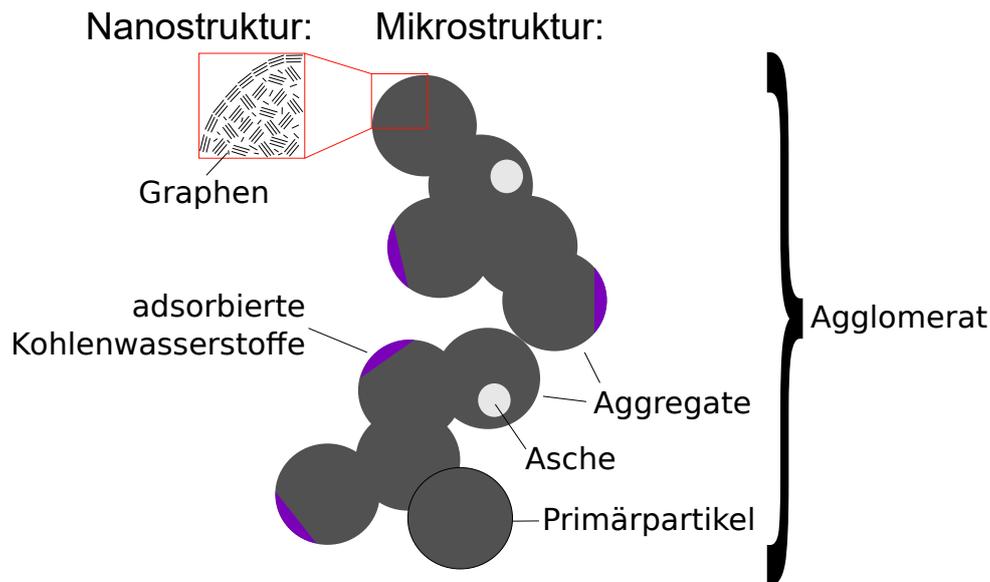


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Ruß-Agglomerates basierend auf Angaben und Darstellungen von [Matti Maricq, 2007] [Mansurov, 2005]

an Abständen der Graphenschichten ist am reaktivsten [Hagen et al., 2021]. Die Mikrostruktur ist die Anordnung der Primärpartikeln zu Aggregaten und Agglomeraten. Durchmesser für Primärpartikeln und Agglomerate sind für die verschiedenen Ruß-Arten in Tabelle 3.2 aufgeführt. Tabelle 3.3 zeigt die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Ruß-Arten.

Tabelle 3.2: Typische anzahlgewichtete Mediandurchmesser der Primärpartikeln und Agglomerate verschiedener Ruß-Arten. Die Primärpartikeldurchmesser von Funkenruß und Carbon Black wurden aus TEM-Aufnahmen bestimmt und die von Propanruß aus Messungen mit dem Atomic Force Microscope. Bei den Agglomeraten handelt es sich jeweils um den mit einem SMPS bestimmten Äquivalentdurchmessers einer Partikel gleicher elektrischer Mobilität.

Ruß-Art	Primärpartikel $x_{50,0}$ / nm	Agglomerat $x_{50,0}$ / nm
Funkenruß	3 - 5 [Hagen et al., 2021]	$\approx 90$ [Matuschek et al., 2007]
Carbon Black	16 - 54 [Hagen et al., 2021]	121 - 296 [Blackford und Simons, 1987]
Propanruß	$\approx 62$ [Moore et al., 2014]	$\approx 90$ [Matuschek et al., 2007]

Tabelle 3.3: Chemische Zusammensetzung verschiedener Ruß-Arten [Long et al., 2013].

Ruß-Art	elementarer Kohlenstoff / gew. %	organischer Kohlenstoff / gew. %
Funkenruß	70 - 94	5 - 17
Carbon Black	> 97	< 2
Propanruß	54 - 83	1 - 18

Die genannten unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Ruß-Arten, können zu unterschied-

lichen Haftkräften in Partikelstrukturen führen, welche sich nach Kapitel 3.1.1 auf die Ablösung auswirken. Durch die Oxidation von Ruß ändern sich seine Eigenschaften, was wiederum Auswirkungen auf die in dieser Arbeit betrachtete Ablösung haben kann. Im Folgenden werden kurz relevante Vorgänge bei der Oxidation von Ruß erläutert.

Bei der Oxidation von Ruß wird zwischen zwei Extremfällen unterschieden. Im ersten Fall findet die Oxidation ausschließlich an der Oberfläche der Rußpartikeln statt, welche somit von außen nach innen verbrennen. Im zweiten Fall werden zuerst Poren freigebrannt, welche die Oxidation im Inneren ermöglichen, so dass die Ruß-Partikeln von innen ausgehöhlt werden. Meist findet die Oxidation an der Oberfläche und die Oxidation im Inneren der Ruß-Partikeln gleichzeitig statt, aber je nach Art des Rußes kann die Oxidation an einer der beiden Stellen überwiegen. Ursache für die unterschiedlich starke Oxidation ist eine andere Reaktivität, hervorgerufen durch lokale Unterschiede in der Nanostruktur der Partikel. Beispielsweise oxidiert Biodiesel-Ruß zuerst an der Oberfläche, sobald die Poren freigebrannt sind und das Oxidationsmittel in das Innere der Partikel gelangt überwiegt jedoch die Oxidation im Inneren. Das Aushöhlen der Partikel erhöht die Mobilität der Graphenschichten der Hülle, wodurch sich die Partikel verformen kann. [Song et al., 2006]

Ghiassi et al. zeigt, dass Ruß bei der Oxidation fragmentieren kann. Die Ursache dafür ist, dass Ruß, welcher in mageren Verbrennungen entstanden ist, reaktive und schwache Feststoffbrücken zwischen den Primärpartikeln aufweisen kann, die bevorzugt reagieren [Ghiassi et al., 2016b] [Ghiassi et al., 2016a]. Sappok et al. berichten von einem Filterkuchen aus Ruß, der sich durch die Oxidation und ohne die Einwirkung von Strömungskräften, von einem keramischen Wandstromfilter abschälte [Sappok et al., 2013]. Dies zeigt, dass die bei der Oxidation an verschiedenen Stellen einer Partikelstruktur aus Ruß stattfindenden Vorgänge, vermutlich durch eine lokale Änderung der Haftkräfte, eine Verformung der Partikelstruktur verursachen können.

## **3.2 Material und Methoden zur Ablösung reaktiv-inerter Partikelstrukturen**

### **3.2.1 Apparatur zur Ablösung der Partikelstrukturen**

In diesem Kapitel wird eine Apparatur vorgestellt mit der die Ablösung der in in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Partikelstrukturen von einer einzelnen Faser untersucht werden kann. Dazu wird der Faserhalter aus Abbildung 2.7(b) verwendet, die Faser wie in Kapitel 2.2.3 beladen und anschließend in die Apparatur zur Untersuchung der Ablösung eingebaut. Die Aufteilung, der Abscheidung von Partikeln auf der Faser und der Ablösung von Partikeln von der Faser, auf

zwei Apparaturen ist notwendig um Messfehler, durch sich von Apparate­teilen ablö­sende Partikelstrukturen, bei den Ablöseversuchen zu vermeiden. Wie Kapitel 3.4.3 zeigen wird, führen in einer Apparatur, die nur für Ablöseexperimente verwendet wird, bereits Verschmutzungen aus vorherigen Ablöseversuchen zu Messfehlern. Bei dem Transfer der beladenen Faser aus der Apparatur zur Abscheidung in die Apparatur zur Ablösung kann es jedoch zu einer Veränderung der Partikelstruktur kommen, die nicht ausgeschlossen werden kann. Die Apparatur zur Ablösung ermöglicht es, über einen beheizten Einlass, die Partikelstruktur mit heißer Luft anzuströmen, wodurch der Ruß in der Struktur reagiert und sich Strukturbestandteile durch die wirkenden Strömungskräfte ablösen können. Die Änderung der Morphologie der Partikelstruktur wird dabei mit einer Kamera beobachtet, abgelöste Partikelstrukturen werden über eine Laserband-Streulichtmesstechnik / ein Laser Light Sheet Optical Particle Counter (LLS-OPC) detektiert und charakterisiert und anschließend auf einem Auffangfilter zur weiteren Analyse aufgefangen. Die Apparatur ist schematisch in Abbildung 3.2 gezeigt.

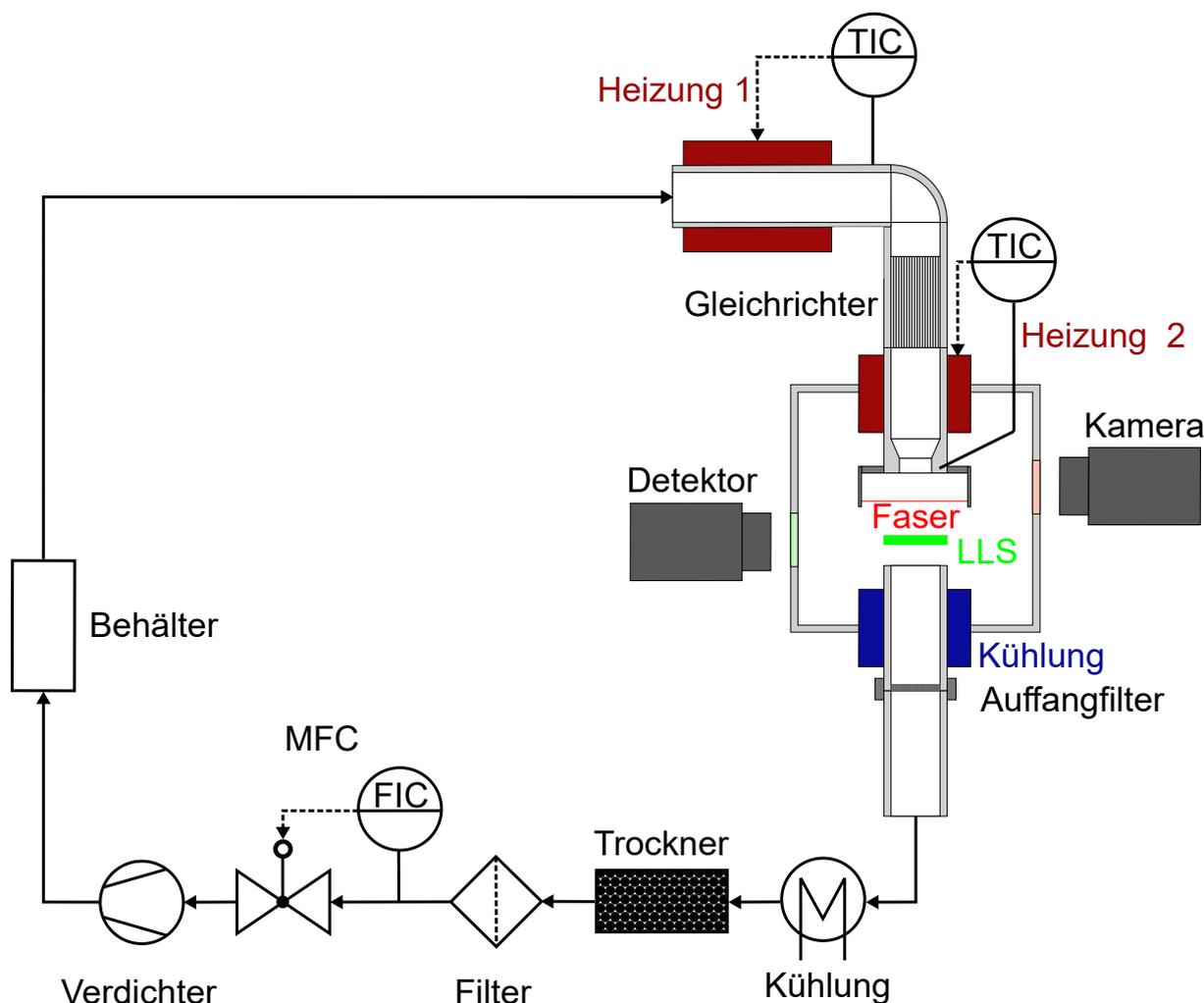


Abbildung 3.2: Schematischer Aufbau der Apparatur zur Untersuchung der Ablösung von Partikelstrukturen von einer einzelnen Faser

Die Luft wird im Kreislauf geführt, um durch gleichzeitiges hineindrücken der Luft durch den be-

heizten Einlass in die Messkammer mit der Faser und heraussaugen der Luft durch den gekühlten Auslass, einen möglichst gleichmäßigen Luftstrahl in der Kammer zu erzeugen. Die für die Strömung notwendige Druckdifferenz wird durch eine Membranpumpe (8011ZVP-35 AEE, Firma Gardner Denver Thomas GmbH) erzeugt und der Massenstrom durch einen Massendurchflussregler (MFC 1559A-100L-SV, Firma MKS Instruments Inc.) geregelt. Ein Ausgleichsbehälter (CRVZS-2, Firma Festo Vertrieb GmbH & Co. KG) ermöglicht einen gleichmäßigen Strom der Luft. In der horizontal angeordneten Heizung 1 (HotCoil 230 V/ 1600 W, max. 750°C, 250 mm lang, Firma Friedr. Freck GmbH) wird die Luft erhitzt. Die Temperatur  $T_1$  des Rohres am Austritt der Heizung 1 wird durch ein Thermoelement gemessen, das zur Regelung dient. Ein zweites Thermoelement befindet sich zum Übertemperaturschutz direkt an der Heizwendel. Heizung 1 ist horizontal angeordnet, um Strömungsinstabilitäten durch die bei der Beheizung auftretende Konvektionsströmung zu reduzieren [Wang et al., 1994] [Martínez-Suástegui et al., 2015]. Stromabwärts der Heizung 1 findet eine Umlenkung der Strömung durch einen 90° Bogen in die Vertikale statt. Diese Umlenkung dient dazu, dass der Luftstrahl vertikal von oben auf die Faser mit Partikelstruktur impaktiert und somit die Richtung der Strömung und die Richtung der Gewichtskraft auf die Partikelstruktur übereinstimmen, wodurch die abgelösten Partikelstrukturen sich durch das LLS bewegen und auf dem Auffangfilter aufgefangen werden. Zusätzlich würde sich ein heißer, horizontaler Luftstrahl in einer kälteren Umgebung nach oben biegen. Auf den Rohrbogen folgt ein Strömungsgleichrichter (Cordierit Wabenkörper, 200 cpsi, 59 mm lang,  $1,5 \cdot 1,5 \text{ mm}^2$  Kanäle, Firma Fraunhofer IKTS), der den durch die Strömungsumlenkung und die Konvektionsströmung in der Heizung 1 erzeugten Drall abbauen soll. Die aus dem Gleichrichter ausströmende Luft wird bis kurz vor die Faser weiter beheizt, um sie auf hoher Temperatur zu halten. Hierfür dient die vertikale Heizung 2 (HotCoil 230 V/ 1400 W, max. 750°C, 200 mm lang, Firma Friedr. Freck GmbH), welche nach einem Thermoelement im Düsenkörper vor der Faser geregelt wird, das die Temperatur  $T_2$  misst. Auch diese Heizung besitzt ein internes, zweites Thermoelement zum Übertemperaturschutz. Bei allen Thermoelementen der Heizungen 1 und 2 handelt es sich um Typ K/NiCr-Ni-Thermoelemente. Die außenliegenden Thermoelemente zur Messung von  $T_1$  und  $T_2$  wurden mit dem Schmelzpunkt (0°C; 1,013 bara) und dem Siedepunkt (100°C; 1,013 bara) von Wasser [Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013] sowie dem Schmelzpunkt von Zink (C09W040, 99,994%, Firma Alfa Aesar GmbH & Co. KG) von 419,5°C [Roeser und Wensel, 1935] kalibriert. Die Temperatur  $T_2$  wird stets etwas kleiner gewählt als  $T_1$ , um Strömungsinstabilitäten zu vermeiden und ein kolbenförmiges Geschwindigkeitsprofil zu begünstigen. Wäre  $T_2 > T_1$  könnte das dazu führen, dass die Temperatur im Kern der Strömung geringer ist als an der Rohrwand. Aufgrund der damit verbundenen geringeren Gasdichte an der Rohrwand und der Geschwindigkeitsgrenzschicht, könnte dies zu einer Gegenkonvektion entgegen der Richtung der Erdbeschleunigung führen, welche zu Strömungsinstabilitäten und einer schwingenden Strömung führt [Martínez-Suástegui et al., 2015]. Ist hingegen  $T_2 < T_1$ , so ist die Gasdichte an der Rohrwand höher, was die Strömung in Richtung der Erdbeschleunigung unterstützt und auf diese Art die Ausbildung eines kolbenförmigen

gen Geschwindigkeitsprofils begünstigt. Eine runde Düse, mit einem Durchmesser von 12,5 mm, richtet schließlich die heiße Gasströmung auf die Faser mit Partikelstruktur. Untersuchungen zum Geschwindigkeits- und Temperaturprofil des heißen Luftstrahles werden in Kapitel 3.2.2 gezeigt.

Die Faser mit Partikelstruktur befindet sich in einer Kammer mit optischen Zugängen. Die Kammer, als auch der gesamte Einlass und Auslass, sind aus dem hitzebeständigen Edelstahl 1.4841 gefertigt (Firma M. Woite GmbH), die optischen Zugänge in die Kammer bestehen aus Quarzglas (Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG) und die Dichtungen aus Graphit (novaphit 400, Firma Frenzelit GmbH) und Glimmer (novamica 200, Firma Frenzelit GmbH). Durch die optischen Zugänge kann die Partikelstruktur beobachtet und abgelöste Bestandteile detektiert werden. Abbildung 3.3 zeigt das optische Messsystem schematisch.

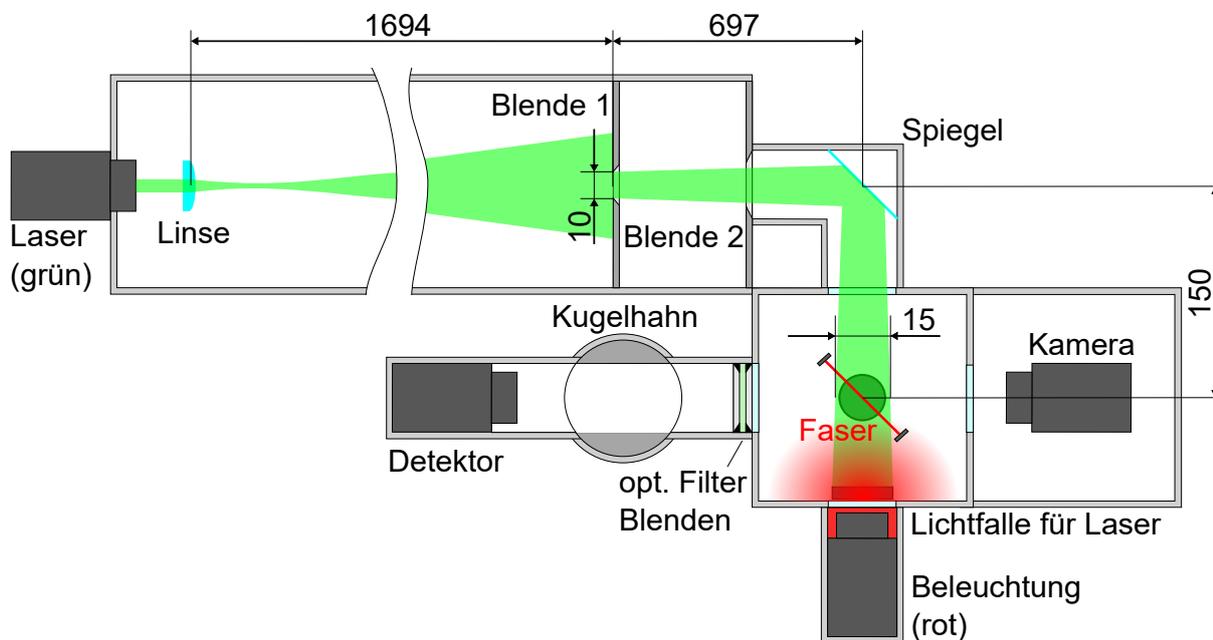


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Strahlengangs des LLS-OPC (grün) und der Positionen von Kamera und Beleuchtung (rot). Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu.

Abgelöste Partikelstrukturen können in der Apparatur über Lichtstreuung der Agglomerate im Laserband und Messung des Streulichtes mit einem Photomultiplier detektiert werden. Wurster et al. verwendeten erstmals eine ähnliche Messtechnik zur Detektion von Öltröpfen auf der Rückseite eines Filters zur Filtration von Ölnebel [Wurster et al., 2015] [Wurster, 2017]. Dabei weiteten sie einen 1 W Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 532 nm (Laser MGL-FN-532, Firma PhotonTec Berlin GmbH) mit einer Zylinderlinse zu einem 400 mm breiten Laserband auf. Aufgrund des gaußförmigen Intensitätsprofils verwendete Wurster nur den 80 mm breiten Mittelteil dieses Laserbandes für seine Messung, in dem die Intensität des Laserbandes näherungsweise konstant ist. Das von Öltröpfen gestreute Laserlicht wurde mit einem, im 90°-Winkel zum Laserband

angeordneten, Photomultiplier (P30CW5, Firma Sens-Tech Ltd) gemessen. Über die Intensität des Streulichtes wurde die Größe der Partikeln bestimmt. Auf diese Weise konnten Öltröpfen im Größenbereich von 170 bis 2340  $\mu\text{m}$  gemessen werden. [Wurster et al., 2015] [Wurster, 2017]

In dieser Arbeit wurde ein LLS-OPC analog zu dem von Wurster et al. aufgebaut und weiter entwickelt. Die Weiterentwicklung betrifft die Messung bei hoher Temperatur, die gleichzeitige Beobachtung der Vorgänge direkt über dem Laserband mit einer Kamera und die Kalibrierung für andere Partikelmaterialien. In dieser Arbeit wird ein kontinuierlicher, 1 W Laserstrahl mit 532 nm Wellenlänge, und gaußschem Intensitätsprofil (TEM00) (Laser MGL-FN-532, Firma PhotonTec Berlin GmbH) mit einer zylindrischen, plan-konvexen Linse (318322000, 61,31 mm Brennweite, Firma Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG) über eine Strecke von 1694 mm auf eine Breite von 50 mm aufgeweitet. Die Blende 1 in Abbildung 3.3 schneidet den 10 mm breiten Mittelteil, mit näherungsweise konstanter Intensität, aus dem Laserband heraus. Eine zweite Blende (Blende 2) dient dazu die Ausbreitung von Streulicht von den Schneiden der ersten Blende zu verringern und ein Spiegel lenkt das Laserband durch die Messkammer, unter den Fasern entlang, bis in eine Lichtfalle. Der Spiegel kann zur Justage des Laserbandes in der Kammer verwendet werden. Die Strecke von der 1. Blende bis zur Mitte der Messkammer beträgt 847 mm und dient dazu das bei der ersten Blende 10 mm breite Laserband auf eine Breite von 15,2 mm aufzuweiten. Damit ist das Laserband breiter als der Düsendurchmesser, wodurch alle abgelösten Partikelstrukturen durch es hindurchfliegen sollten. Eine andere Linse mit kürzerer Brennweite könnte die für die Aufweitung des Laserbandes notwendige Strecke zwar reduzieren, würde aber dazu führen, dass sich die Breite des Laserbandes im Messbereich direkt unter den Fasern stärker ändert und über die damit verbundene Änderung der Intensität des Laserbandes, die Bestimmung der Größe der Partikelstrukturen über die Streulichtintensität verfälscht wird. Eine Kombination mehrerer Linsen könnte dieses Problem zwar lösen, wäre aber wesentlich teurer als die längere Strecke. Partikelstrukturen, welche sich von der Faser ablösen und das Laserband passieren, streuen das Licht des Bandes. Dieses Streulicht wird von einem im  $90^\circ$  Winkel zum Laserband angeordneten Photomultiplier gemessen (P30CW5, Firma Sens-Tech Ltd). Über Kalibriergeraden wird die gemessene Streulichtintensität der Partikelstruktur mit einem äquivalenten Partikeldurchmesser in Verbindung gebracht. Zwischen Messkammer und Photomultiplier befinden sich zwei Blenden mit einem Durchmesser von jeweils 22 mm, um zusammen mit dem Laserband ein definiertes Messvolumen unter den Fasern zu erzeugen. Zwischen den Blenden ist ein optischer Filter eingebaut (DT-Green, Firma Optics Balzers AG), welcher nur das grüne Laserlicht zu dem Photomultiplier hindurch lässt und das rote Licht der Beleuchtung für die Kamera, sowie Infrarotstrahlung die durch die Heizungen entsteht, herausfiltert. Zusätzlich ist ein Kugelhahn eingebaut, mit welchem der Strahlengang zum Photomultiplier abgesperrt werden kann, um ihn beim Öffnen der Kammer vor Umgebungslicht zu schützen. Das Spannungssignal des Photomultipliers wird um den Faktor 4 verstärkt, gefiltert (Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 100 kHz), von einem PC-Oszilloskop (PicoScope 4224, Firma Pico Technology Ltd.) aufgenommen und an

einen Computer übertragen, auf dem es mit LabVIEW (Firma National Instruments Corporation) ausgewertet wird.

Zusätzlich zu dem LLS-OPC wird die Partikelstruktur auf der Faser durch eine CMOS USB 3.0-Kamera (acA4024-29-uc Basler ace, Firma Basler AG) mit einem Objektiv mit 6,5-fach Zoom und Feinfokus (1-6020, Firma Navitar Industries LLC) beobachtet. Die Kamera befindet sich auf einer Dreipunkthalterung, welche die Justage der Höhe und des Winkels der Kamera zur Horizontalen erlaubt. Die für die Kameraaufnahme notwendige Beleuchtung (LED-Modul 21 mm, Rot 625 nm, flood 28, IL-100, Firma StarLight Opto-Electronics GmbH & Co. KG) verwendet rotes Licht, zur Abgrenzung vom grünen Licht des Laserbandes vor dem Photomultiplier durch einen optischen Filter. Kamera und Beleuchtung werden mit Druckluft gekühlt, um sie vor der hohen Temperatur zu schützen.

Stromabwärts des Laserbandes befindet sich der mit Druckluft gekühlte Auslass aus der Messkammer. Die Kühlung dient dazu die weitere Oxidation abgelöster Partikelstrukturen im Gasstrom zu stoppen, damit sich die Partikelstrukturen auf dem Weg von der Faser zum Auffangfilter (MN QF-10  $\varnothing$  25 mm, Firma Macherey-Nagel GmbH & Co. KG) möglichst wenig verändern. Der Auslass hat einen Durchmesser von 16 mm und somit einen größeren Durchmesser als die Düse (12,5 mm), um den Anteil an abgelösten Partikelstrukturen, die auf dem Auffangfilter ankommen, zu erhöhen. Auf den Auffangfilter folgt eine Kühlschlange im Wasserbad, ein Silikagel-Trockner und ein Filter (HEPA Capsule, Firma Pall Corporation) zur Aufbereitung der Luft, bevor diese wiederum in den Massendurchflussregler gelangt.

Aufnahmen der Apparatur und des Inneren der Messkammer sind in Abbildung 3.4 gezeigt. Im Teil (a) der Abbildung ist zu erkennen, dass der Strahlengang des Lasers vollständig eingehaust ist. Die Apparatur selbst befindet sich wiederum in einer Einhausung, um eine weitere Sicherheitsstufe hinzuzufügen. Der Laser kann erst auf volle Leistung eingeschaltet werden, sobald alle Türen der äußeren Einhausung geschlossen sind. Teil (b) zeigt den Faserhalter in der Messkammer. Die Oberflächen in der Kammer sind mit schwarzem Ofenlack (2562727, Firma Spectrum Paint & Supplies) lackiert, um die Ausbreitung von Streulicht, welches nicht von Partikelstrukturen im Laserband stammt und Falschlicht in dem System zu verringern.

### **3.2.2 Methode zur Erzeugung und Charakterisierung heißer Luftstrahlen zur Ablösung von Partikelstrukturen**

In Kapitel 3.2.1 wurde das Konzept zur Erzeugung heißer Luftstrahlen bereits vorgestellt. In diesem Kapitel wird näher auf die Regelung der Temperatur und die Messung des Geschwindigkeits-

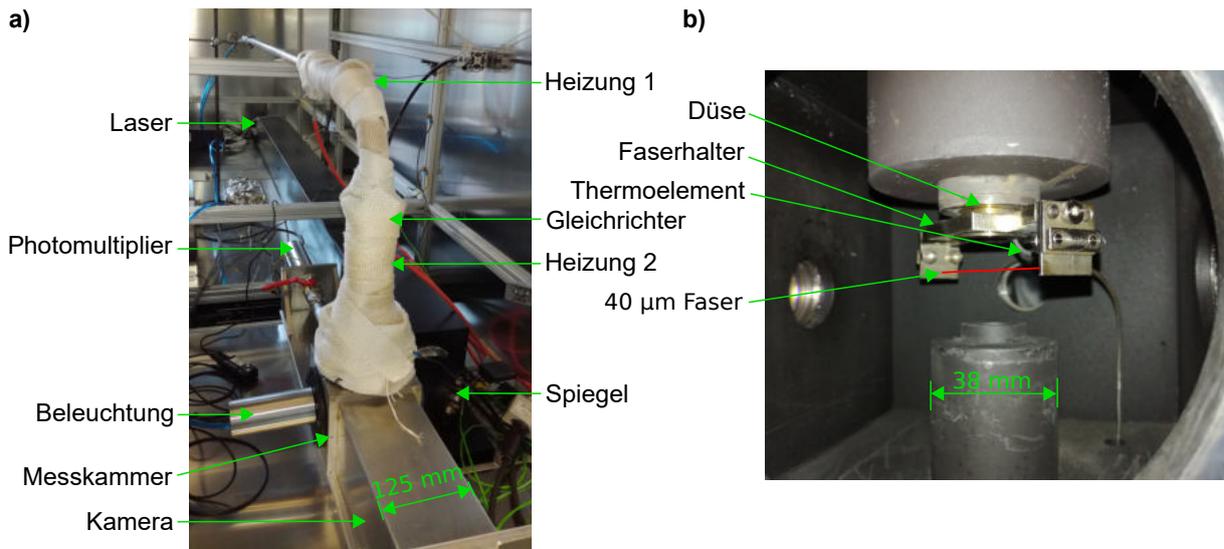


Abbildung 3.4: Aufnahmen der Apparatur zur Untersuchung der Ablösung von Partikelstrukturen von einer Faser (a) und des Inneren der Kammer mit dem Faserhalter und der rot markierten Faser (b). (modifiziert nach [Zoller et al., 2022])

und Temperaturprofils der Luftstrahlen eingegangen.

Die Regelgrößen sind die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  beider Heizungen, die in zwei ähnlich aufgebauten Regelkreisen, mit der mittleren Heizleistung der jeweiligen Heizung als Stellgröße, geregelt werden. Die Regelung findet über einen LabVIEW-Code statt. In diesem Code können Zieltemperaturen  $T_{Ziel}$  für  $T_1$  und  $T_2$  vorgegeben werden. Diese Zieltemperatur wird nicht direkt an einen PID-Regler übertragen, da dieser bei einem Aufheizvorgang von Umgebungstemperatur auf  $400^\circ\text{C}$  aufgrund der hohen Regeldifferenz überreagieren würde, was ein starkes Überschwingen zur Folge hätte. Aus diesem Grund wird für den Aufheizvorgang ein rampenartiger Verlauf der Führungsgröße  $T_{soll}$  berechnet und diese berechnete Temperatur an den PID-Regler weitergegeben. Zur Berechnung wird der folgende Verlauf verwendet:

$$T_{soll} = T_{Ziel} \left( 1 - \exp \left( -\frac{s}{T_{Ziel}}(t + t_0) \right) \right) \quad (3.16)$$

In dieser Gleichung bezeichnet  $s$  die maximale Temperatur-Steigerungs-Rate und  $t_0$  die Startzeit, welche aus der aktuellen Temperatur zum Start des Aufheizvorgangs berechnet wird. Sobald das berechnete  $T_{soll}$  nur noch  $3^\circ\text{C}$  von  $T_{Ziel}$  abweicht, wird  $T_{soll}$  gleich  $T_{Ziel}$  gesetzt. Die Differenz aus der berechneten Temperatur  $T_{soll}$  und der tatsächlichen Temperatur  $T$  ist die Regeldifferenz eines LabVIEW internen PID-Reglers. Die Anpassung der mittleren Heizleistung erfolgt anschließend über Pulsweitenmodulation, und somit über unterschiedlich lange An- und Ausperioden der Heizung. Die Pulsweite  $PW$  während einer festen Zeitperiode setzt sich aus einer vom PID-Regler aus der Regeldifferenz berechneten Zeit  $PW_{PID}$  und zwei experimentell bestimmten Zeiten  $PW_{stat}$  und  $PW_M$  zusammen.  $PW_{stat}(T_{soll})$  ist die experimentell bestimmte Pulsweite, die dafür

notwendig ist im stationären Fall, ohne Strömung, die Temperatur  $T_{soll}$  zu halten.  $PW_{stat}(T_{soll})$  gleicht somit die Wärmeverluste zur Umgebung aus. Bei Durchströmung der Heizung mit einem Massenstrom  $\dot{M}$  ist zusätzliche Leistung zur Aufheizung des Massenstroms notwendig, welche durch die Pulsweite  $PW_M(T_{soll}, \dot{M})$  zugeführt wird. Damit berechnet sich die Pulsweite zu:

$$PW(T_{soll}, T, \dot{M}, t) = PW_{stat}(T_{soll}) + PW_M(T_{soll}, \dot{M}) + PW_{PID}(T_{soll}, T, t) \quad (3.17)$$

Die mit der Apparatur aus Abbildung 3.2 und der in diesem Kapitel vorgestellten Regelung erzeugten heißen Luftstrahlen, werden mit einem Prandtl-Rohr und einem Thermoelement untersucht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Das Prandtl-Rohr besteht aus zwei Rohren mit einem Durchmesser von jeweils 1,1 mm (Abbildung 3.5(b)). Eines der Rohre ist an seiner der Strömung zugewandten Stirnseite offen, um dort den Gesamtdruck messen zu können und das andere Rohr ist an der Stirnseite verschlossen und besitzt eine seitliche Öffnung in der Rohrwand, zur Messung des statischen Drucks. Die Differenz zwischen Gesamtdruck und statischem Druck entspricht gerade dem dynamischen Druck, welcher mit einem Differenzdruckmesser (testo 521, Firma Testo SE & Co. KGaA) gemessen wird. Zur Bestimmung des Temperaturprofils des Luftstrahls, und zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit aus dem Differenzdruck, wird zusätzlich mit einem Thermoelement mit einem Durchmesser von 0,25 mm die Temperatur gemessen (Typ K - Thermoelement, Firma TC Mess- und Regeltechnik GmbH mit testo 925 Thermometer, Firma Testo SE & Co. KGaA). Zur Messung des Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils wird das Prandtl-Rohr, wie in Abbildung 3.5 gezeigt, durch den Auslass in die Messkammer eingeführt. Vertikal kann das Rohr über das Stativ verschoben werden und in der horizontalen Ebene ist eine Positionierung über die Mikrometer-Messschrauben eines xy-Positioniertisches (MYW80-SS, Firma GMT Global INC) möglich. Die Bestimmung der radialen Koordinate  $r^*$  wird durchgeführt, indem als Referenz die Rohrwand des Auslassrohres verwendet wird. Durch nicht exakt lotrechte Lage des Prandtl-Rohres, kann jedoch die bestimmte radiale Koordinate  $r^*$  von der tatsächlichen radialen Koordinate der Düse abweichen.

Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit dem Prandtl-Rohr muss es zuvor kalibriert werden. Dies ist notwendig, da die Geometrie des Kopfes die Strömung und somit die gemessene Druckdifferenz beeinflusst [Klopfenstein, 1998]. Zur Kalibrierung wird das Geschwindigkeitsprofil in einem durchströmten Rohr, mit 20 mm Durchmesser, 480 mm unterhalb eines Cordierit-Wabenkörpers als Gleichrichter, unter der Annahme gemessen, dass der gemessene Differenzdruck dem dynamischen Druck entspricht. Aus dem daraus berechneten Geschwindigkeitsprofil wird anschließend der Volumenstrom durch das Rohr berechnet. Das Verhältnis des tatsächlichen mit einem Massendurchflussregler eingestellten Volumenstromes und des aus dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil berechneten Volumenstromes, wird als Kalibrierfaktor verwendet. Für einen Volumenstrom von 100 l/min beträgt dieser Faktor 1,228 und für einen Volumenstrom von 120 l/min 1,256. Der Mittelwert aus beiden Faktoren von rund 1,24 wird als

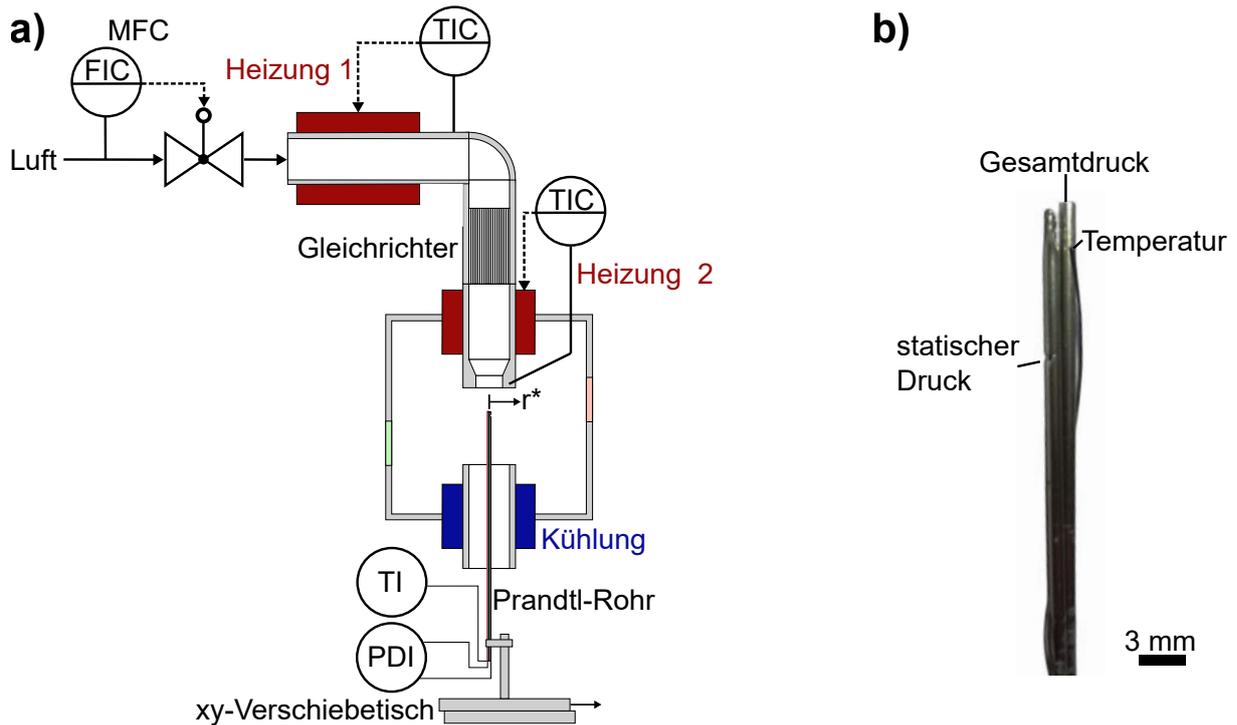


Abbildung 3.5: Aufbau zur Messung des Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils von heißen Luftstrahlen (a) und Aufnahme der Spitze des Prandtl-Rohres mit Thermoelement (b)

Kalibrierfaktor verwendet.

Eine Korrektur der gemessenen Temperatur aufgrund von Strahlungsverlusten an die Umgebung wird nicht durchgeführt. [Roberts et al., 2011] berichtet von einem Fehler von 38,3°C bei einem Messwert eines ummantelten Thermoelements von 591,8°C, was einem Messfehler von 6% entspricht. Die maximal in dieser Arbeit gemessene Temperatur beträgt 470°C und da der Messfehler durch Wärmestrahlung mit abnehmender Temperatur ebenfalls abnimmt, wird ein kleinerer Messfehler als 6% erwartet, weshalb dieser Fehler vernachlässigbar ist.

### 3.2.3 Methode zur Kalibrierung einer Laserband-Streulicht-Messtechnik zur Detektion abgelöster Partikelstrukturen

In diesem Kapitel wird zuerst vorgestellt, wie die Justage des Laserbandes erfolgt. Anschließend wird die Überprüfung der Homogenität und die Kalibrierung mit Partikeln unterschiedlichen Materials und unterschiedlicher Größe erläutert.

Die Justage des Laserbandes erfolgt bei reduzierter Leistung des Lasers, um den Laser sicher

bei offenem Strahlengang betreiben zu können. In einem ersten Schritt wird Millimeterpapier an der Blende 1 aus Abbildung 3.3 befestigt und die Position der Linse über einen Schlitten und die Neigung des Lasers über eine Schraube in seiner Bodenplatte so eingestellt, dass das LLS die Blende mittig trifft und eine Breite von 50 mm aufweist. Im zweiten Schritt wird das Millimeterpapier von der Blende 1 entfernt und zentrisch in der Messkammer aufgestellt. Der Umlenkspiegel wird so eingestellt, dass das Laserband das Millimeterpapier mittig und in der richtigen Höhe trifft.

Abbildung 3.6 zeigt den Aufbau zur Überprüfung der Homogenität des Laserbandes in dem Bereich unter der Faser. Eine schwankende Intensität des Laserlichtes in diesem Bereich führt dazu, dass eine ideal kugelförmige Partikel, einer Größe, unterschiedlich große Streulichtsignale erzeugt, wenn sie an unterschiedlichen Stellen das Laserband durchquert. Dies führt zu einem Fehler bei der Bestimmung der Größe der Partikel. Um die Homogenität des Laserbandes zu überprüfen, wird eine 34  $\mu\text{m}$  Trevira Monofil® Faser (Firma Trevira GmbH) an 5 verschiedenen Positionen lotrecht durch das Laserband geführt und die Signalspannung des Photomultipliers aufgezeichnet. Bei den überprüften Positionen handelt es sich um die Mitte / die Rotationsachse der Düse und die nächsten Positionen innerhalb des vom Düsenauslass auf das Laserband projizierten Kreises zum Einlass des LLS, zur Kamera, zur Beleuchtung und zum Detektor. Die Verstärkungsspannung des Photomultipliers beträgt hierbei 356 V.

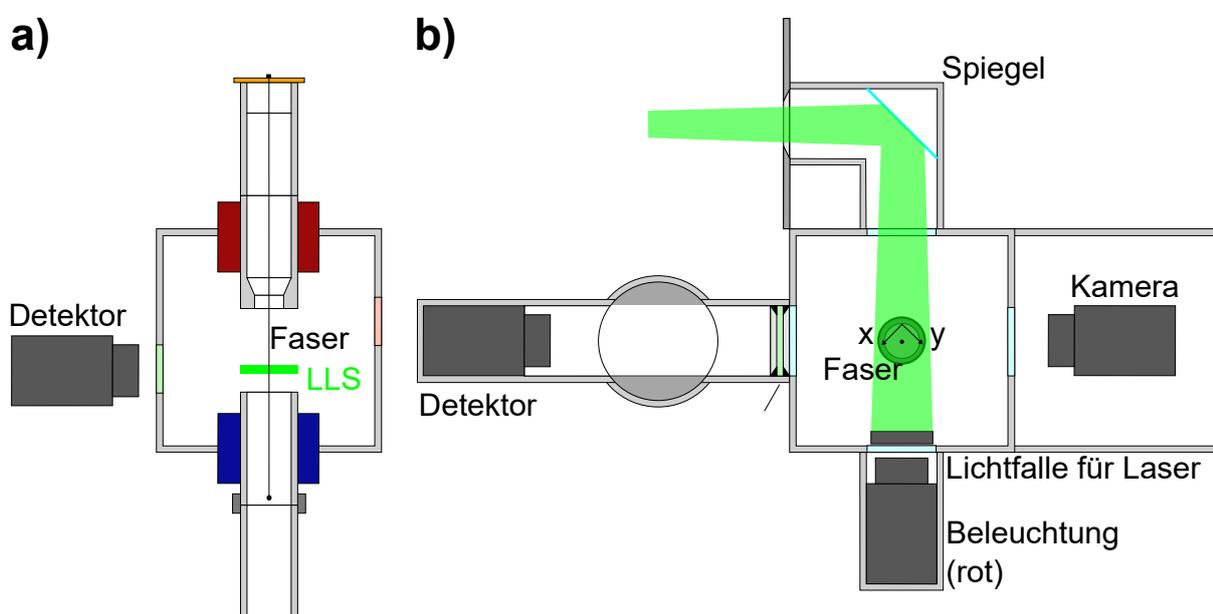


Abbildung 3.6: Vertikaler (a) und horizontaler (b) Schnitt durch den Aufbau zur Überprüfung der Homogenität der Intensität des Laserbandes. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu.

Um von der Faser abgelösten Partikelstrukturen über ihr Streulichtsignal einen Äquivalent-

durchmesser zuordnen zu können, werden Kalibrierkurven aufgenommen. Die Aufnahme von Kalibrierkurven erfolgt, indem die Streulichtsignale von Partikeln bekannter Größe und bekannten Materials gemessen werden. Die Signal-Spannung  $\hat{U}$ , die für diese Zuordnung verwendet wird, ist die Spannungsdifferenz zwischen der maximalen Spannung des Signals einer Partikel  $U_{max,P}$  und dem Mittelwert des Grundrauschens  $\bar{U}_{Rauschen}$ .

$$\hat{U} = U_{max,P} - \bar{U}_{Rauschen} \quad (3.18)$$

Durch die Subtraktion des Grundrauschens kann der Messfehler, durch ein bei verschiedenen Messbedingungen unterschiedliches Grundrauschen, reduziert werden. Beispielsweise ist das Grundrauschen höher, wenn sich eine Faser in der Messkammer befindet, da diese das Laserlicht streut. Das bei der Justage auf dem Millimeterpapier sichtbare Laserband befindet sich zwar vollständig unter der Faser, aber Laserlicht wird auch an der Lichtfalle und dem Fenster gestreut, durch welches es in die Messkammer gelangt. Dieses Streulicht kann wiederum an der Faser in Richtung Photomultiplier gestreut werden, wodurch sich das Grundrauschen erhöht.

Die Materialien der abzulösenden Partikelstruktur konnten selbst nicht zur Kalibrierung des LLS eingesetzt werden, da es nicht möglich war Agglomerate definierter Größe und Geometrie aus diesen Materialien zu erzeugen und diese Agglomerate beim Kalibriervorgang einzeln mit dem LLS zu vermessen. Zur Kalibrierung werden deshalb Glaskugeln und Steinkohlepartikeln (Prestige Aktive Steinkohle, Firma Gert Strand AB) aus unterschiedlichen Größenfraktionen und mit ähnlichen optischen Eigenschaften wie die Materialien der zu untersuchenden Partikelstrukturen verwendet. Mikroskopaufnahmen der Partikeln sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Als charakteristische Partikelgröße, zur Zuordnung zur Signal-Spannung, wird der aus Mikroskopaufnahmen bestimmte anzahlgewichtete Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers der jeweiligen Größenfraktion verwendet.

Abbildung 3.8 zeigt den Aufbau, mit welchem die Partikeln zum Kalibrieren in die Messkammer gegeben werden. Um Verluste der Partikeln auf dem Weg in die Kammer zu verringern und um die Zugabe von Partikeln bei maximaler Leistung des Lasers zu ermöglichen, bei der alle Türen des Versuchsaufbaus geschlossen sein müssen, werden die Partikeln durch ein Rohr vom Dach der Einhausung aus zugegeben. Die Messung der Signal-Spannung von Partikeln unterschiedlicher Größenfraktionen erfolgt bei Umgebungstemperatur (ca. 20°C), bei erhöhter Temperatur (ca. 400°C), mit ausgeschalteter Beleuchtung, mit angeschalteter Beleuchtung, mit drei eingebauten parallelen Fasern in der Messkammer und ohne Fasern in der Messkammer. Die Fasern und das Laserband schneiden sich dabei nicht. Auf diese Weise kann der Einfluss der Temperatur, der Beleuchtung und in der Messkammer vorhandener Fasern, auf die Messung mit dem LLS-OPC untersucht werden. Bei allen Versuchen beträgt die Verstärkungsspannung des Photomultipliers 356 V und der Volumenstrom durch die Messkammer 4 l/min.

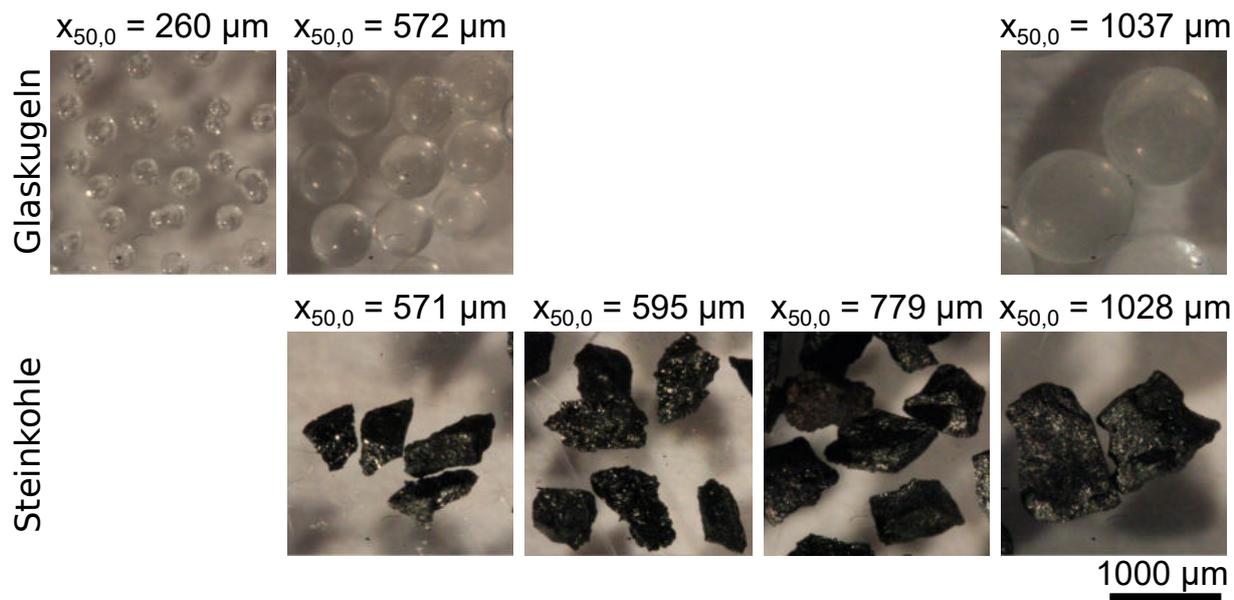


Abbildung 3.7: Glaskugeln und Steinkohlepartikeln zum Kalibrieren des LLS-OPC. Der angegebene Mediantdurchmesser ist der projektionsflächenäquivalente Durchmesser. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen.

### 3.2.4 Methode zum Auffangen und analysieren abgelöster Partikelstrukturen

Zur Analyse abgelöster Partikelstrukturen werden diese auf einem Filter aufgefangen. Da sich das Auslassrohr aus der Kammer direkt unter der Faser mit den sich ablösenden Partikelstrukturen befindet und mit 16 mm einen größeren Durchmesser als die auf der gleichen Linie liegende 12,5 mm Düse zur Anströmung hat, wird davon ausgegangen, dass nahezu alle abgelösten Strukturen auf dem Filter abgeschieden werden. Wie eine Blindprobe in Kapitel 3.4.3 belegen wird, ist diese Analysemethode anfällig für Messfehler durch Kontamination der Auffangfilter mit Partikelmaterial, das nicht von Partikelstrukturen der Faser des zugehörigen Versuchs stammt. Mögliche Quellen für dieses Partikelmaterial sind:

- a) der Herstellungs- und Verpackungsprozess des Filters
- b) die Pinzette zum Handling des Filters
- c) die Umgebungsluft (kein Reinraum)
- d) die Aufbewahrungsbox des Filters
- e) der Filterhalter, an welchem sich Spuren von Kupferpaste befinden

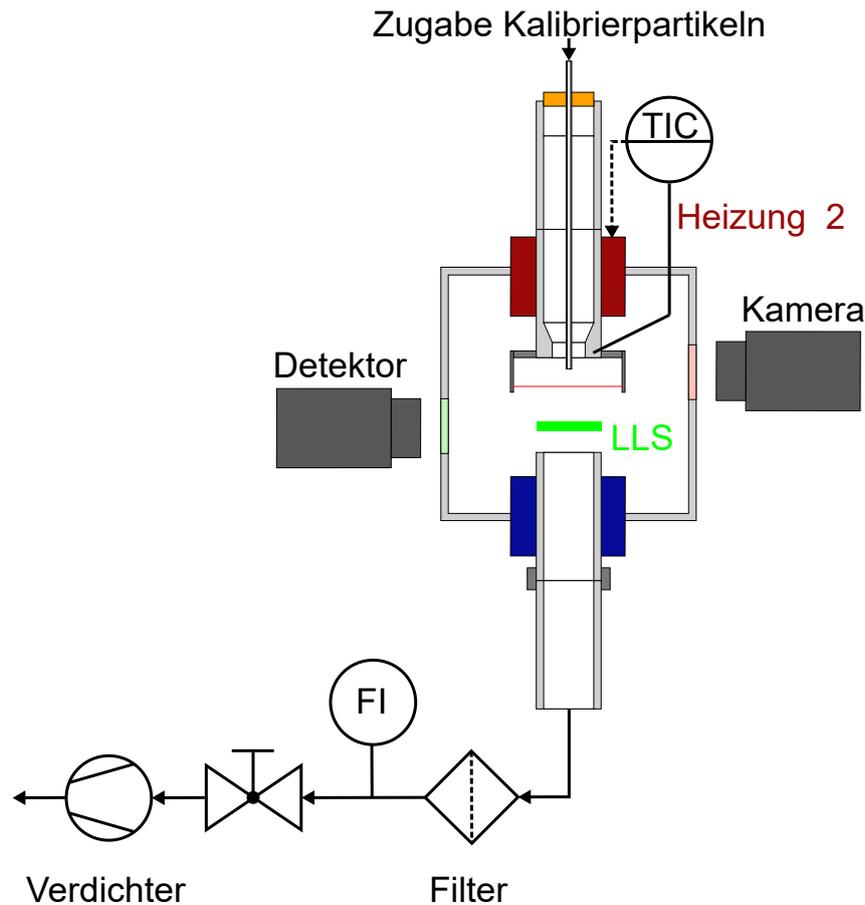


Abbildung 3.8: Aufbau zur Zugabe von Kalibrierpartikeln in die Messkammer zur Bestimmung von deren Streulichtsignal. Die Abbildung ist nicht maßstabgetreu.

- f) die Apparatur zur Untersuchung der Ablösung, die durch vorhergehende Ablöseversuche kontaminiert ist

Um die Kontamination des Auffangfilters durch Partikeln, die nicht vom eigentlichen Ablöseversuch stammen, zu reduzieren, muss auf die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung geachtet werden. Die drei wesentlichen Schritte der Versuchsdurchführung sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Nach der Entnahme aus der Verpackung werden die Filter zuerst unter dem Mikroskop untersucht. Leichte Verschmutzungen des Filters lassen sich mit einer Pinzette entfernen, stärker verschmutzte Filter werden aussortiert. Anschließend werden die geeigneten Filter einzeln in zuvor gereinigten Plastikbehältern aufbewahrt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Seite auf der später die Partikelstrukturen aufgefangen werden, nicht mit anderen Oberflächen in Kontakt kommt. Für jeden Ablöseversuch wird jeweils ein Filter mit der Pinzette aus dem Plastikbehälter entnommen und in die Filterhalterung eingebaut. Um zu vermeiden, dass durch den Einbau oder den Ausbau der beladenen Faser in die Apparatur Partikelstrukturen auf den Auffangfilter gelangen, wird zuerst die Faser und anschließend der Auffangfilter eingebaut und nach dem Versuch zuerst der Auffangfilter und anschließend die Faser ausgebaut. Dabei ist darauf zu achten, dass die zu analysierende Seite des Filters nicht zu stark über die abdichtende Fläche

des Filterhalters streift. Nach dem Ablöseversuch wird der Filter wieder mit der Pinzette aus der Apparatur entnommen und in dem Plastikbehälter zum Mikroskop transportiert. Für die Analyse unter dem Mikroskop muss der Filter wiederum aus dem Plastikbehälter entnommen werden.

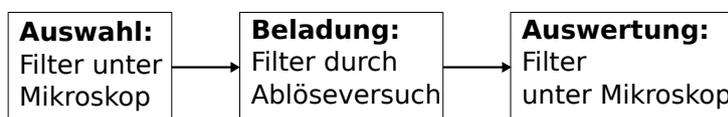


Abbildung 3.9: Schema der Methode zum Auffangen und analysieren abgelöster Partikelstrukturen auf einem Auffangfilter.

Um das Ausmaß der Kontamination der Auffangfilter quantifizieren zu können, werden Blindversuche durchgeführt. Als Blindversuch wird ein Versuch bezeichnet, bei welchem mit dem Filter die oben beschriebene und in Abbildung 3.9 dargestellte Vorgehensweise durchgeführt wird, mit dem Unterschied, dass sich bei dem Ablöseversuch keine Faser mit Partikelstruktur in der Messkammer befindet. Das heißt, dass die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit in der Apparatur so eingestellt werden, als würde ein tatsächlicher Ablöseversuch durchgeführt werden. Durch einen Vergleich der Anzahl und Größe der Partikeln, die bei einem Ablöseversuch mit Faser und Partikelstruktur auf dem Auffangfilter vorzufinden sind, mit der Anzahl und Größe der Partikeln, die bei den entsprechenden Blindversuchen, ohne Faser, auf dem Auffangfilter vorzufinden sind, ist es möglich abzuschätzen wie viele Partikeln welcher Größe tatsächlich bei dem Ablöseversuch von der Faser abgelöst wurden.

### 3.3 Durchführung der Parameterstudie zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Glas und Propanruß

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Versuche beschrieben, welche dazu dienen den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit, der Faserbeladung / der Größe der Partikelstruktur auf der Faser und der Reaktion, auf die Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln zu untersuchen. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Kapitel 3.5 dargestellt.

Die Bildung der Partikelstruktur findet Analog wie in Kapitel 2 statt, in dem die gebildeten Partikelstrukturen bereits näher untersucht wurden. Für eine bessere optische Zugänglichkeit der Faser und der Partikelstruktur, wird der in Abbildung 2.7(b) dargestellte Faserhalter verwendet. Bei der Untersuchung der Abscheidung in Kapitel 2 hat sich herausgestellt, dass insbesondere der Massenstrom an Glaskugeln starken Schwankungen unterworfen ist (Vergleich siehe Abbildung 2.13). Aus diesem Grund wird bei den hier beschriebenen quantitativen Ablöseversuchen, die aufgegebene Masse der unterschiedlichen Partikelmaterialien bei jedem einzelnen Versuch

bestimmt. Hierzu wird bei der Beladung der Faser ein Gravimetrie-Filter stromabwärts der Faser verwendet, mit welchem die Massen der verschiedenen Partikelmaterialien nach der Methode aus Abbildung 2.6 bestimmt werden. Die aufgegebene Masse der verschiedenen Partikelmaterialien wird auf die durchströmte Querschnittsfläche unmittelbar vor der Faser bezogen:

$$m/A = \frac{\text{mit dem Gravimetrie-Filter bestimmte Masse der Komponente}}{\text{durchströmte Querschnittsfläche stromaufwärts der Faser}} \quad (3.19)$$

Zusätzlich wird von jeder gebildeten Partikelstruktur eine Aufnahme unter dem Mikroskop angefertigt. Die Beladung wird bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 0,4 m/s durchgeführt und die Beladungszeit beträgt 5 Minuten für die Untersuchungen bei geringer Beladung und 60 Minuten für die Untersuchungen bei hoher Beladung. Die Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln erfolgt simultan.

Die Untersuchung der Ablösung findet mit der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Apparatur statt. Hierfür wird die Faser mit Partikelstruktur in die Messkammer eingebaut und die Ablösung durch einen Luftstrahl einer definierten Strömungsgeschwindigkeit und einer Temperatur untersucht. Bei dem Einbau der Faser ist die Pumpe ausgeschaltet, wodurch keine Luft durch die Düse strömt. Bei den Experimenten mit hoher Temperatur, findet der Einbau der Faser in die bereits heiße Messkammer statt. Ohne Durchströmung beträgt die Temperatur an der Position der Faser in diesem Fall maximal 200°C, wodurch es noch zu keiner sichtbaren Oxidation des Rußes kommt. Nach dem Einbau wird die Faser mit Partikelstruktur einem Luftstrahl mit entweder einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 0,65 m/s oder 2,5 m/s, bei einer Temperatur von entweder ca. 20°C oder ca. 400°C, ausgesetzt. Die Charakterisierung der entsprechenden Luftstrahlen wird in Kapitel 3.4.1 vorgestellt. Die Dauer der Anströmung beträgt 3 Minuten. Diese Zeit ist ausreichend, da in den Versuchen bei hoher Temperatur der sichtbare Ruß nach 30 bis 60 s verbrannt ist und keine weitere, sichtbare Änderung der Partikelstruktur mehr erfolgt. Bei jedem Ablöseversuch wird die Faser mit Partikelstruktur über eine Kamera aufgenommen, die abgelösten Partikelstrukturen mit dem LLS-OPC detektiert und mit einem Auffangfilter aufgefangen und analysiert.

### **3.4 Ergebnisse zur Charakterisierung des Materials und der Methoden zur Untersuchung der Ablösung von reaktiv-inerten Partikelstrukturen**

#### **3.4.1 Charakterisierung der zur Ablösung von Partikelstrukturen verwendeten heißen Luftstrahlen**

Eine genaue Kenntnis der für die Ablöseuntersuchungen verwendeten Luftstrahlen ist notwendig, um bei unterschiedlichen Ablösebedingungen die Ursachen für die unterschiedliche Anzahl und Größe abgelöster Partikelstrukturen ermitteln zu können. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Strömungsgeschwindigkeit und die Temperatur in der Apparatur zur Ablösung näher untersucht.

Die Funktion der in Kapitel 3.2.2 vorgestellten Regelung der beiden Heizungen wird in Abbildung 3.10 demonstriert. Die Abbildung zeigt den Aufheizvorgang von Heizung 1 auf eine Temperatur von 390°C und von Heizung 2 auf eine Temperatur von 380°C, ohne Strömung. Kurz vor Erreichen der Zieltemperaturen ist jeweils ein Knick im Temperaturverlauf zu erkennen, der dadurch verursacht wird, dass bei einer Temperaturdifferenz von 3°C zwischen der berechneten Solltemperatur des Temperaturverlaufes und der Zieltemperatur, die an den PID-Regler übergebene Solltemperatur gleich der Zieltemperatur gesetzt wird. Dies verringert die zum Aufheizen notwendige Zeit und hat nur ein geringfügiges Überschwingen über die Zieltemperatur hinaus zur Folge.

Nachdem die Temperaturen  $T_1$  des Rohres am Auslass von Heizung 1 und  $T_2$  des Düsenkörpers am Auslass von Heizung 2, eingestellt werden können, wird die Abhängigkeit der Gastemperaturen vom Volumenstrom direkt am Düsenauslass und auf der Höhe der Fasern (10 mm vom Düsenauslass entfernt), jeweils bei  $r^* = 0$ , betrachtet. Die sich bei verschiedenen Volumenströmen durch die Düse einstellenden stationären Gastemperaturen sind in Abbildung 3.11 gezeigt. An beiden Stellen nimmt die Temperatur bis zu einem Volumenstrom von 4 l/min zuerst zu und mit einer Steigerung des Volumenstromes über 4 l/min hinaus wieder ab. Da dieser Verlauf auch direkt am Düsenauslass auftritt, kann er nicht auf die Ausbreitung des Luftstrahles in der Kammer zurückgeführt werden. Berechnungen des Wärmeübergangskoeffizienten mit Korrelationen nach Gnielinski [Gnielinski, 2013] zeigen, dass der Wärmeübergangskoeffizient in dem Rohr von Heizung 2 bei einer Steigerung des Volumenstromes im Bereich unter 4 l/min um weniger als 1% zunimmt und somit nicht für die Steigerung der Gastemperatur am Düsenauslass verantwortlich sein kann. Es wird vermutet, dass heißes Gas aus der 2. Heizung bei geringen Volumenströmen eher durch Konvektionsströmung nach oben aufsteigt und aus diesem Grund erst gar nicht den Düsenauslass erreicht. Mit steigendem Volumenstrom erreicht dann immer

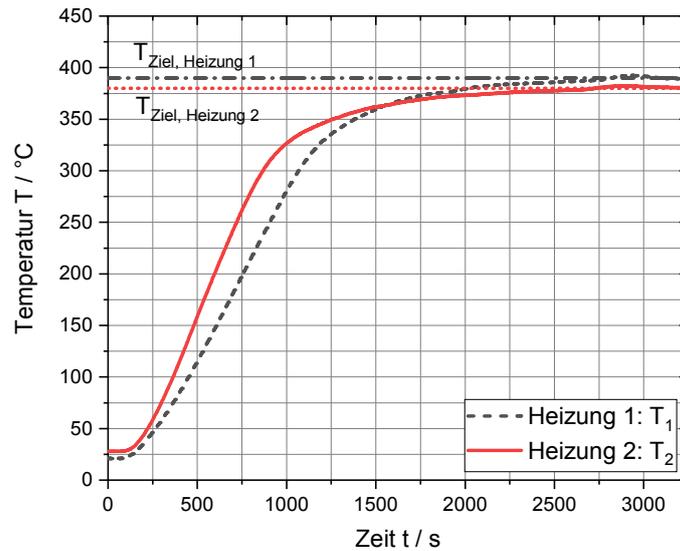


Abbildung 3.10: Temperaturverläufe eines Aufheizvorganges der beiden Heizungen ohne Durchströmung.

mehr heißes Gas den Düsenauslass, was zu einer Steigerung der dort gemessenen Temperatur führt. Die maximal auf der Höhe der Faser gemessene Temperatur beträgt  $470^{\circ}\text{C}$  und ist damit höher als die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ . Die Ursache hierfür ist, dass die Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  außerhalb der Heizungen und somit in kälteren Bereichen, gemessen werden. Der Abfall der Temperatur bei einer Steigerung des Volumenstromes über  $4\text{ l/min}$  hinaus, ist auf die Reduzierung der Verweilzeit des Gases in den Heizungen zurückzuführen. Im Volumenstrombereich von  $2$  bis  $8\text{ l/min}$  liegt die Temperatur auf der Höhe der Faser unter der Temperatur am Düsenauslass. Dies ist auf die Abkühlung des Gases im Luftstrahl zurückzuführen. Eine Verringerung der Gastemperatur mit zunehmendem Abstand vom Auslass einer Düse, wurde auch bereits von Seban et al. [Seban et al., 1978] festgestellt. Bei höheren Volumenströmen ist die Differenz der Gastemperatur am Düsenauslass und derjenigen auf der Höhe der Fasern kleiner. Mögliche Gründe hierfür sind die geringere Zeit zum Abkühlen des Strahles und die stärkere Aufheizung der Umgebungsluft in der Kammer, durch den höheren Wärmeeintrag. Auch Seban et al. konnten feststellen, dass mit steigender Strömungsgeschwindigkeit die Temperaturdifferenz zwischen Düsenauslass und weiter vom Düsenauslass entfernten Positionen abnimmt [Seban et al., 1978].

Im idealen Fall sollte die in Abbildung 3.11, bei einer radialen Position des Strahles von  $r^* = 0$  auf der Höhe der Fasern, gemessene Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte angeströmte Länge der Fasern konstant sein, um einheitliche Ablösebedingungen zu gewährleisten. Dies wurde durch Messung der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile mit dem in Abbildung 3.5 vorgestellten Prandtl-Rohr untersucht. Abbildung 3.12 zeigt die Ergebnisse

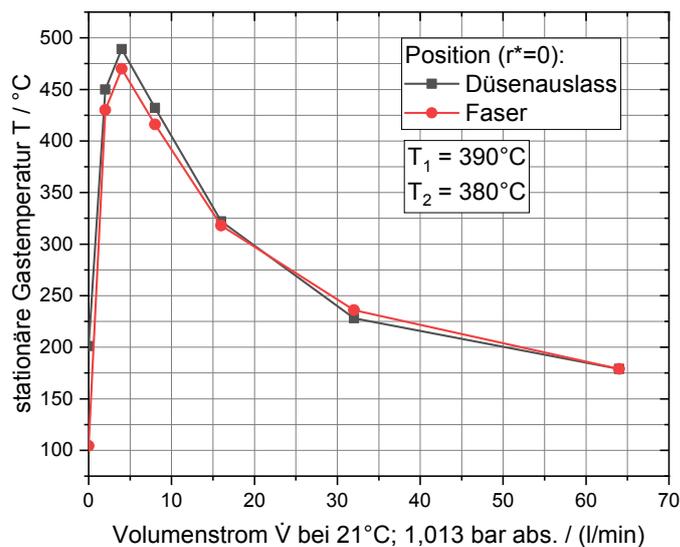


Abbildung 3.11: Stationäre Gastemperaturen am Düsenauslass und auf der Höhe der Fasern (10 mm vom Düsenauslass entfernt) bei verschiedenen Volumenströmen durch die Düse.

bei verschiedenen Volumenströmen durch die Düse und unterschiedlichen Temperaturen der Heizungen. Aufgrund baulicher Restriktionen kann nicht bis ganz an den Rand des Strahles gemessen werden. Die Geschwindigkeitsprofile zeigen einen Bereich näherungsweise konstanter Strömungsgeschwindigkeit, für eine radiale Koordinate  $r^*$  von  $-3$  bis  $+3$  mm. Darüber hinaus fällt die Geschwindigkeit stark ab. Die mit dem Prandtl-Rohr bestimmten Strömungsgeschwindigkeiten sind größer für höhere Volumenströme und Temperaturen, was mit den Erwartungen übereinstimmt. Eine starke zeitliche Schwankung der gemessenen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit, welche für eine Strömungsinstabilität sprechen würde, konnte nicht festgestellt werden. Die Temperaturprofile haben einen M-förmigen Verlauf. Eine mögliche Ursache für diesen Verlauf ist die Beheizung des Gases in den Heizungen über die Rohrwand, die dazu führt, dass sich das Gas in der Nähe der Rohrwand schneller erwärmt, als im Kern der Strömung. Für diese Ursache spricht, dass die gemessene Temperaturdifferenz zwischen dem Kern der Strömung und den beiden Maxima des Profils mit steigendem Volumenstrom und somit mit geringerer Verweilzeit des Gases in der Heizung, zunimmt, weil in dieser kurzen Zeit nur das Gas in der Heizung wesentlich aufheizen kann, das sich direkt an der Rohrwand befindet. Wird die Temperatur  $T_1$  auf  $400^\circ\text{C}$  erhöht und die Temperatur  $T_2$  auf  $300^\circ\text{C}$  verringert, kann die Temperaturdifferenz zwischen dem lokalen Minima im Kern der Strömung und den lokalen Maxima am Rand verringert werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass von Heizung 1 bis zur Position der Faser eine höhere Verweilzeit für den Temperatureausgleich vorliegt, als von Heizung 2 bis zur Position der Faser. Eine weitere Homogenisierung des Temperaturprofils kann durch eine größere Verweilzeit oder Mischelemente in den Heizungen realisiert werden. Die in der Legende

angegebenen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten  $\bar{u}$  wurden mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$ , der Temperatur  $T_2$  und dem Düsendurchmesser  $d_{Düse}$  berechnet. Bei den geringen Volumenströmen von 20 l/min, stimmt die auf diese Weise berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit dem Plateau der lokalen Geschwindigkeit  $u$  überein. Bei dem hohen Volumenstrom ist die berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit höher als das Maximum der lokalen Geschwindigkeit, weil die Gastemperatur wesentlich kleiner als die Düsentemperatur  $T_2$  ist.

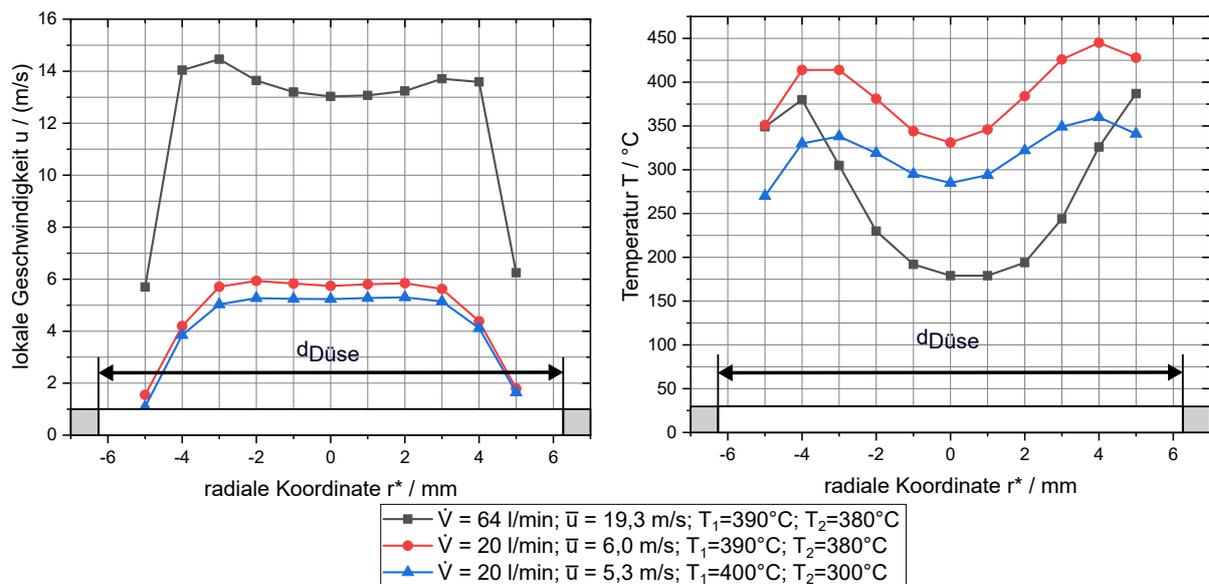


Abbildung 3.12: Geschwindigkeits- und Temperaturprofile von verschiedenen heißen Luftstrahlen, auf der Höhe der Faser (10 mm vom Düsenauslass entfernt), im stationären Fall.(modifiziert nach [Zoller et al., 2022])

Das Geschwindigkeitsprofil der tatsächlich in den Ablöse-Untersuchungen verwendeten Freistrahlen, bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von 0,65 m/s und 2,5 m/s, konnte mit dem Prandtl-Rohr nicht gemessen werden, da der entsprechende Differenzdruck zu gering ist. Nichtsdestotrotz wurden die Ablöse-Untersuchungen mit diesen geringeren mittleren Geschwindigkeiten durchgeführt, um näher an Strömungsgeschwindigkeiten in realen Filtern zu sein. Aufgrund der vergleichmäßigen Wirkung von Düsen auf die Strömung [Wehrum et al., 1978] [Kümmel, 2007], wird aber weiterhin von einem kolbenförmigen Strömungsprofil ausgegangen. Die Temperaturprofile bei den beiden Geschwindigkeiten und den in den Ablöseuntersuchungen verwendeten Temperaturen von  $T_1$  und  $T_2$  sind in Abbildung 3.13 dargestellt. Bei diesen Geschwindigkeiten liegt kein M-förmiges Temperaturprofil mehr vor, was über die höhere Verweilzeit des Gases in den Heizungen erklärt werden kann. Die Abnahme der Temperatur zu den Rändern des Strahles ist vermutlich auf die kältere Umgebungsluft in der Kammer zurückzuführen, welche den Strahl von außen abkühlt.

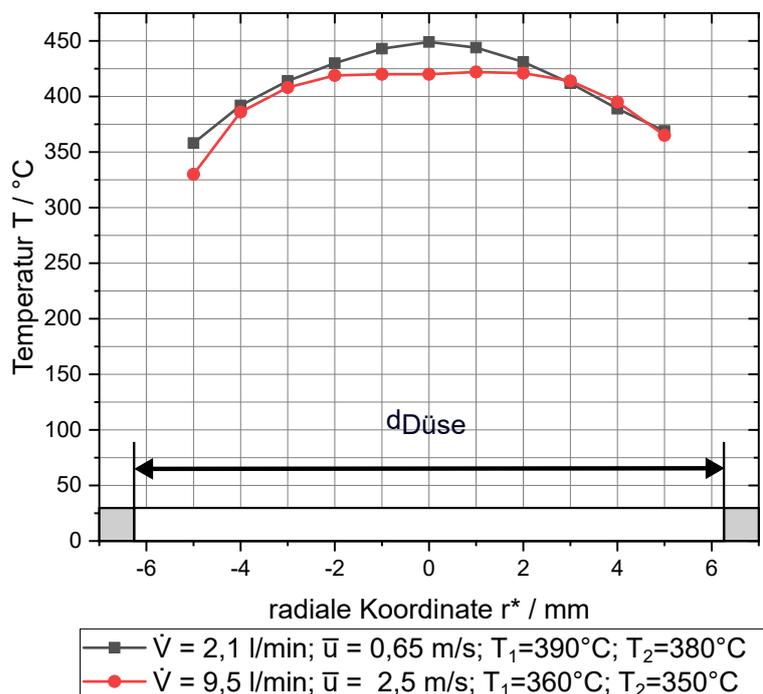


Abbildung 3.13: Temperaturprofile der Luftstrahlen auf der Höhe der Faser (10 mm vom Düsenauslass entfernt), bei den in den Ablöse-Untersuchungen verwendeten Bedingungen.

### 3.4.2 Charakterisierung der Laserband-Streulicht-Messtechnik zur Detektion abgelöster Partikelstrukturen

Zur Messung von abgelösten Strukturen wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Laserband-Streulichtmesstechnik (LLS-OPC) weiterentwickelt (siehe Kapitel 3.2.1). Die Weiterentwicklung besteht in der Messung bei hohen Temperaturen, in der gleichzeitigen Durchführung von Kameraaufnahmen in derselben Messkammer wie die LLS-OPC Messung und in der Kalibrierung für unterschiedliche Partikelmaterialien. In diesem Kapitel wird deshalb der Einfluss der Temperatur, der Beleuchtung für die Kameraaufnahmen, der in der Messkammer vorhandenen Fasern und des Partikelmaterials, auf die LLS-OPC-Messung untersucht. Zuvor wird die Homogenität des Laserbandes überprüft und die Größenbestimmung von Partikeln und Agglomeraten mit dieser Messtechnik anhand von Einzelsignalen unterschiedlich großer Partikeln erläutert.

Zur Untersuchung der Homogenität des Laserbandes wird eine 34  $\mu\text{m}$  Faser an 5 verschiedenen Stellen lotrecht durch das Laserband geführt und das Spannungssignal des Photomultipliers aufgezeichnet. Abbildung 3.14 zeigt eine Interpolation dieser 5 Messwerte mit dem in Abbildung 3.6 eingeführten Koordinatensystem, bei welchem sich die nächsten Positionen zum Einlass des Laserbandes, zum Detektor, zur Lichtfalle und zur Kamera jeweils in den Ecken befinden. Es ist

anzumerken, dass diese Interpolation mit lediglich 5 Messwerten durchgeführt wurde und die Positionierung der Faser grob ist. Die Messwerte des Spannungssignals liegen in einem Bereich von 330 bis 490 mV. Das Verhältnis der maximalen zur minimalen Spannung beträgt damit 1,48. Damit kann der maximale Messfehler durch die Inhomogenität des Laserbandes auf die Bestimmung des Durchmessers einer Kugel abgeschätzt werden. Die Streulichtintensität  $I_{Streu,Kugel}$  einer Kugel im  $90^\circ$  Winkel zum einfallenden Laserstrahl ist, bei einem Kugeldurchmesser weit oberhalb der Wellenlänge des Lichtes, proportional zur Projektionsfläche der Kugel und somit proportional zum quadrierten Kugeldurchmesser  $d_{Kugel}$  [Xu, 2002] [Berry, 1923].

$$I_{Streu,Kugel} \sim d_{Kugel}^2 \quad (3.20)$$

Aufgrund dieses Zusammenhanges ist das Verhältnis vom maximal bestimmten Kugeldurchmesser zum minimal bestimmten Kugeldurchmesser, ein und derselben Kugel, gleich der Wurzel aus dem Verhältnis des maximalen Spannungssignals zum minimalen Spannungssignal und somit 1,22. Der durch die Inhomogenität des Laserbandes verursachte Messfehler, bei der Größenbestimmung einer Kugel mit dem LLS-OPC, beträgt demzufolge maximal 22%. Ein Vergleich mit der Literatur zeigt, dass die Abweichung des Spannungssignals in einem ähnlichen Bereich liegt. Wurster et al. geben eine maximale Abweichung des Spannungssignals von dem mittleren Spannungssignal von 20% an, wohingegen sie bei dem vorliegenden LLS-OPC 22% beträgt [Wurster, 2017]. In Abbildung 3.14 ist zu erkennen, dass das Spannungssignal zunimmt, wenn die Faser sich näher an der Lichtfalle befindet. Eine Ursache hierfür ist, dass die Lichtfalle nicht das gesamte Laserlicht absorbiert, sondern einen Anteil des Lichtes streut. Eine Faser, die sich in der Messkammer und im Beobachtungsbereich des Photomultipliers befindet, kann dieses an der Lichtfalle gestreute Licht wiederum in Richtung des Photomultipliers streuen. Die Intensität des von der Lichtfalle gestreuten Lichtes nimmt mit dem Abstand von der Lichtfalle ab, wodurch eine Faser, welche sich näher an der Lichtfalle befindet, eine höhere Intensität des von der Lichtfalle gestreuten Lichtes in Richtung Photomultiplier streut.

Abbildung 3.15 zeigt die Verläufe des Spannungssignals  $U$  für die Messung der in Abbildung 3.7 vorgestellten Kalibrierpartikeln. Der in der Legende angegebene anzahlgewichtete Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers wurde dabei durch Mikroskopie der entsprechenden Größenfraktionen ermittelt. Das Spannungssignal nimmt bei allen gemessenen Partikeln zuerst zu, durchläuft ein Maximum und fällt anschließend wieder ab. Die Ursache für diesen Verlauf ist das gaussförmige Intensitätsprofil des Laserbandes in vertikaler Richtung, welchem das Partikel beim Durchqueren des Laserbandes ausgesetzt ist. Das Maximum des Spannungssignals ist größer für größere Partikeln, was zur Größenbestimmung mittels dieser Messtechnik verwendet wird. Insbesondere bei Glaskugeln nimmt das Maximum mit steigendem Durchmesser der Glaskugeln stark zu, was auf die bereits angesprochene quadratische Abhängigkeit der Streulichtintensität vom Durchmesser der Glaskugeln hindeutet. Das maximale Spannungssignal ist

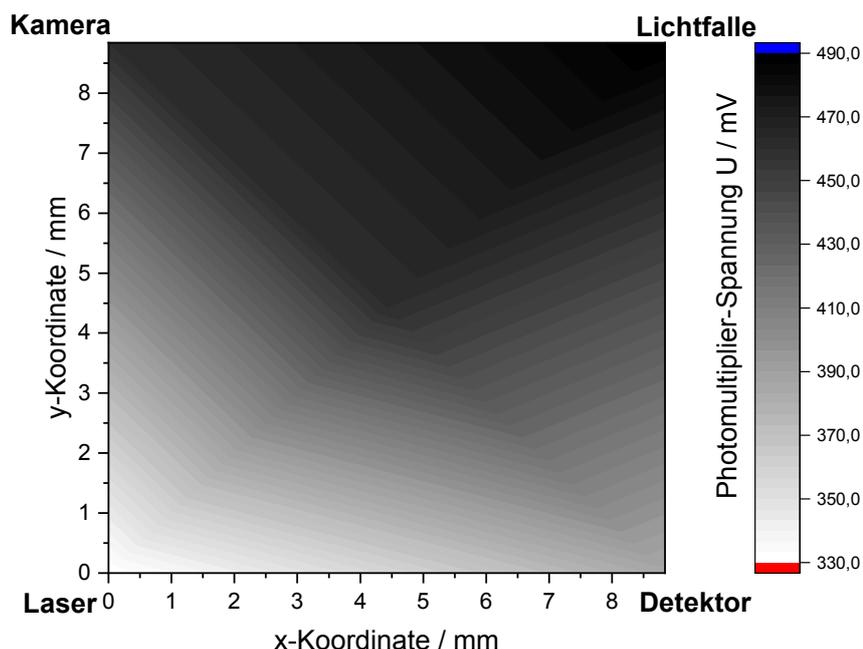


Abbildung 3.14: Spannungssignal einer Faser, die lotrecht durch das Laserband führt. Das Spannungssignal wurde an den 4 Ecken und in der Mitte des Diagrammes gemessen und dazwischen interpoliert. Die Verstärkungsspannung des Photomultipliers beträgt 356 V.

bei Steinkohle-Partikeln wesentlich geringer als bei Glaskugeln. Die Ursache hierfür wird in den anderen optischen Eigenschaften gesehen. Die Verläufe mit kleinerem maximalen Spannungssignal sind weiter nach links verschoben. Der Grund dafür ist, dass der Auslöser des Oszilloskopes auf ein Spannungssignal von 0,1 V eingestellt ist und eine feste Anzahl an Messwerten vor und nach dem Auslösen abgespeichert wird. Aus diesem Grund schneiden sich alle dargestellten Verläufe bei 0,1 V. Im rechten Diagramm ist zu erkennen, dass ein Grundrauschen im Bereich von 0,04 bis 0,05 V vorliegt. Dieses Grundrauschen hängt von den Umgebungsbedingungen ab. Aus diesem Grund wird für die Zuordnung von Partikelgröße zum Spannungssignal nicht das Maximale Spannungssignal verwendet sondern die als Signal-Spannung  $\hat{U}$  bezeichnete Differenz vom Maximum des Spannungssignals und dem Mittelwert des Grundrauschens.

Um den Einfluss der Beleuchtung, der in der Nähe des Laserbandes vorhandenen Fasern und der Temperatur, auf die Messung mit dem LLS-OPC zu untersuchen und um Kalibriergeraden für Glaskugeln und kohlenstoffbasierte Partikeln zu erhalten, wurden die Signal-Spannungen der Kalibrierpartikeln bei unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Die Spannung des Auslösers wird bei diesen Messungen an das jeweilige Grundrauschen angepasst und ist doppelt so groß wie der Mittelwert des Grundrauschens. Tests zeigen, dass auch das Maximum des Rauschens unter

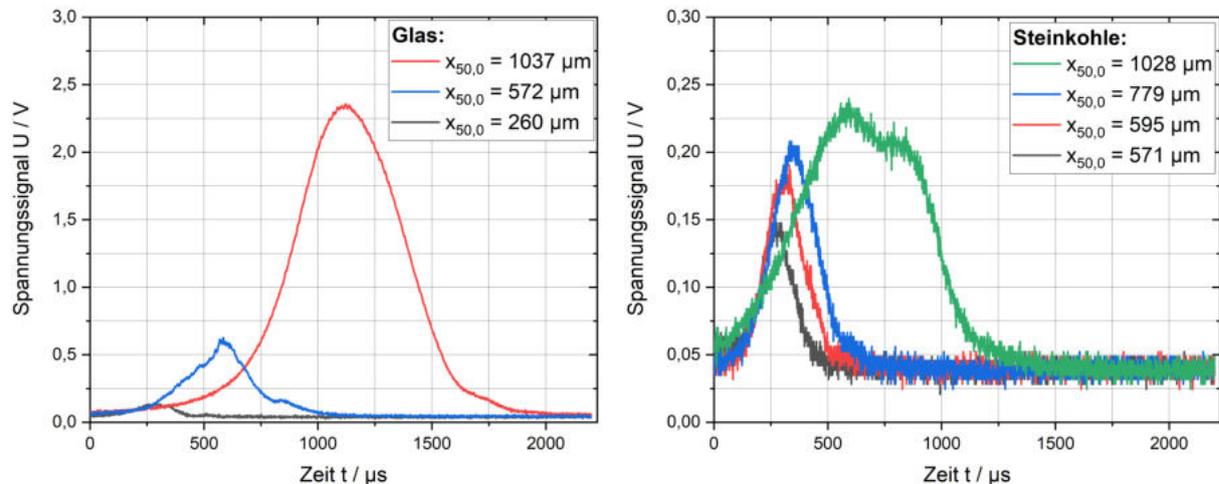


Abbildung 3.15: Verläufe des Spannungssignals für unterschiedliche Partikeln die das Laserband durchqueren. Die Verstärkungsspannung des Photomultipliers beträgt 356 V.

diesem Wert liegt. Abbildung 3.16 zeigt den Einfluss der roten Beleuchtung für die Kameraaufnahme auf die Größenbestimmung der Partikeln. In der Abbildung ist kein systematischer Einfluss der Beleuchtung auf die Signal-Spannung zu erkennen. Dies bedeutet, dass der optische Filter seine Funktion erfüllt und gleichzeitige Kameraaufnahmen in der Messkammer möglich sind. Die Signal-Spannungen der Steinkohlepartikeln streuen stark, was über ihre unregelmäßige Form und ihre optisch inhomogenen Eigenschaften begründet werden kann. In Abbildung 3.17 sind ähnliche Versuche mit oder ohne Fasern in der Messkammer dargestellt. Bei den Glaskugeln ist ein Trend zu höheren Signal-Spannungen bei Versuchen mit Fasern in der Kammer zu erkennen. Die höhere Signal-Spannung lässt sich dadurch erklären, dass das Streulicht der Partikeln, welches sich ohne die Fasern ungestört vom Photomultiplier weg ausbreiten könnte, an den Fasern gestreut wird und somit doch teilweise im Photomultiplier landet. Der Einfluss auf die Messung von an den Fasern gestreutem Laserlicht, das beispielsweise aus der Lichtfalle stammt, wird gering eingeschätzt, da dieses zum Grundrauschen beiträgt, das bei der Berechnung der Signal-Spannung herausgerechnet wird. Der Einfluss der Temperatur ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Die Signal-Spannungen der Glaskugeln bei hoher Temperatur sind etwas geringer als die bei geringer Temperatur. Ein Effekt der hierbei eine Rolle spielen könnte ist, dass der heiße Luftstrahl wie eine thermische Gaslinse fungiert, die das Laserband weiter aufweitet, weil heiße Luft einen geringeren Brechungsindex als kalte Luft hat [Beck, 1964]. Ein weiterer Effekt ist die Änderung des Brechungsindex mit der Temperatur. Der Brechungsindex von Glas und somit der Reflexionsgrad, nimmt mit der Temperatur zu [Waxler und Cleek, 1973], was dem Gaslinsen-Effekt entgegenwirkt. Der letzte mögliche Effekt ist die Verkleinerung der Steinkohlepartikeln aufgrund von Oxidation. Dieser Effekt kann ausgeschlossen werden, da Steinkohle bei den vorliegenden Temperaturen und Verweilzeiten nicht optisch erkennbar oxidiert, was experimentell durch einen Aufenthalt der Partikeln für eine Minute in einem 500°C heißen Ofen bestätigt wurde. Da die Abweichung der Signal-Spannungen bei unterschiedlichen Temperaturen

innerhalb der Standardabweichung liegt, ist der Einfluss der Temperatur auf die Messung jedoch vernachlässigbar.

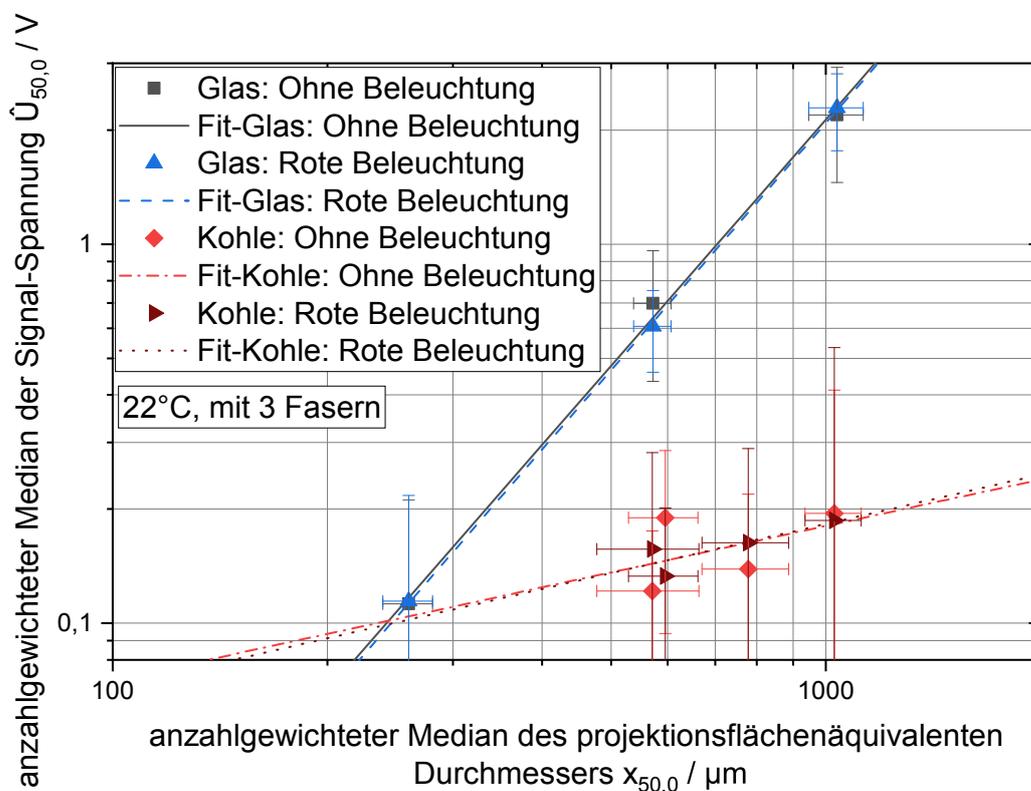


Abbildung 3.16: Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden einmal mit und einmal ohne rote Beleuchtung in der Messkammer durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022])

Die in den Abbildungen 3.16, 3.17 und 3.18 dargestellten Fit-Kurven an die Messdaten basieren auf der folgenden Gleichung:

$$\frac{\hat{U}_{50,0}}{V} = \xi \cdot \left( \frac{x_{50,0}}{\mu m} \right)^\theta \quad (3.21)$$

In dieser Gleichung ist  $\hat{U}_{50,0}$  der anzahlgewichtete Median der Signal-Spannung in Volt und  $x_{50,0}$  der anzahlgewichtete Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmesser in  $\mu m$ . Die beiden Fit-Parameter  $\xi$  und  $\theta$  sind für die verschiedenen Fälle in Tabelle 3.4 aufgeführt. Für die Glaskugeln ist die Potenz des projektionsflächenäquivalenten Durchmesser in den Fit-Funktionen  $\theta$  ca.

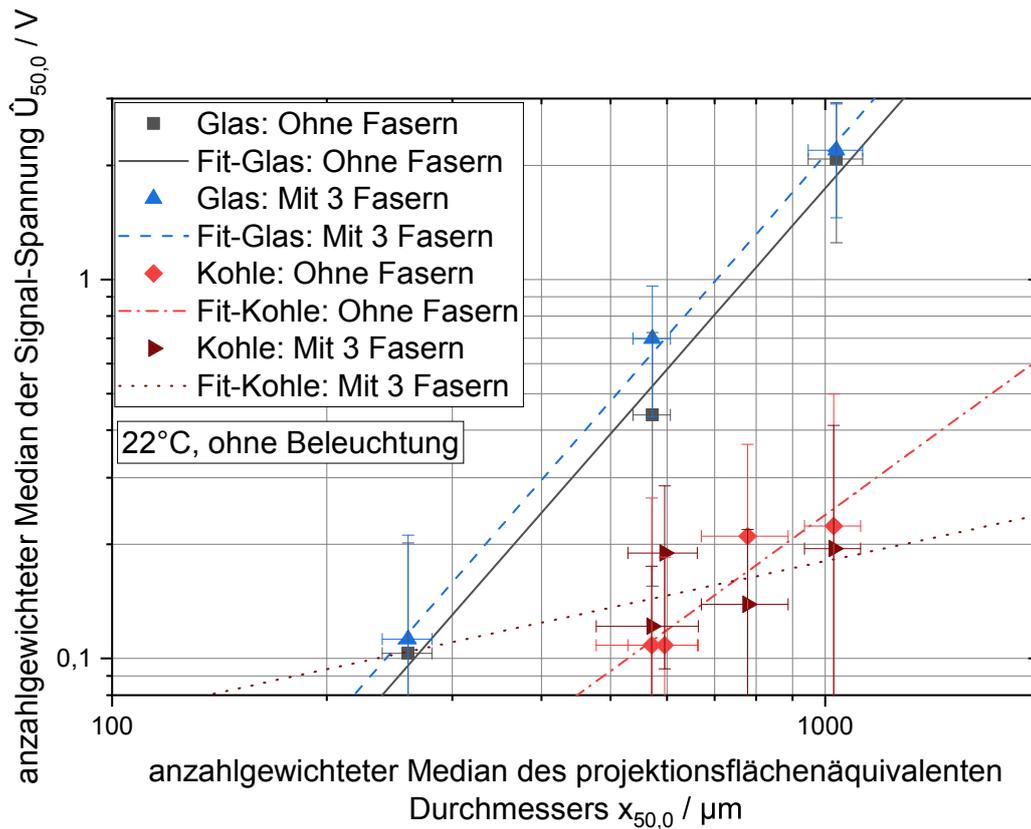


Abbildung 3.17: Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden einmal mit und einmal ohne drei unbeladene, parallele Fasern in der Messkammer durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022])

2,2 und damit nahe an dem theoretischen Wert von 2, für die Streulichtintensität an Kugeln im  $90^\circ$  Winkel zum einfallenden Lichtstrahl und bei einem Kugeldurchmesser der viel größer als die Wellenlänge des Lichtes ist (siehe Formel 3.20) [Xu, 2002] [Berry, 1923]. Die Steinkohlepartikeln zeigen hingegen mit einem  $\theta$  von minimal 0,204 eine teilweise schwache Abhängigkeit der Signal-Spannung von dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser der Partikeln. Neben ihrer unregelmäßigen Form, könnte dafür ihre optisch inhomogene Oberfläche verantwortlich sein. Aufnahmen der Steinkohle-Partikeln in Abbildung 3.7 zeigen, dass diese einzelne stark reflektierende Stellen aufweisen. Es ist möglich, dass die gemessene Signal-Spannung der Steinkohlepartikeln hauptsächlich von der Anzahl, Größe und Orientierung dieser stark reflektierenden Stellen abhängt.

Der Bereich messbarer Partikelgrößen wird nach unten durch das Rauschen und nach oben

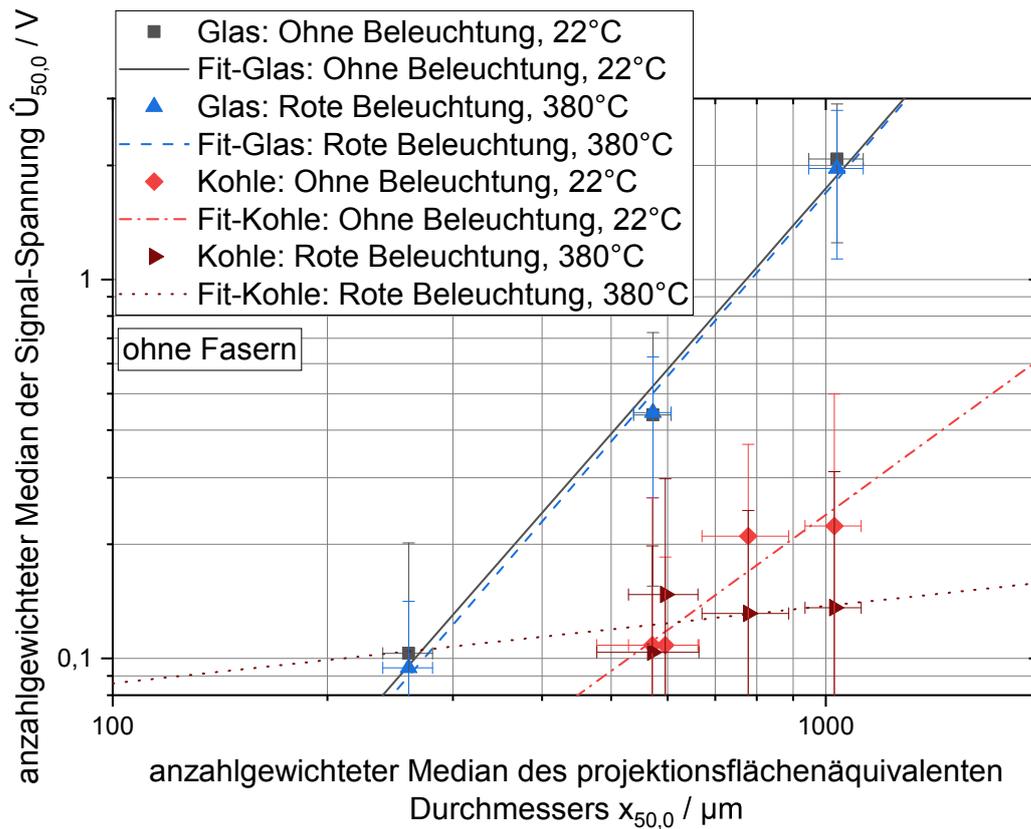


Abbildung 3.18: Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden bei einer Temperatur des Düsenkörpers  $T_2$  von 22°C und von 380°C durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022])

durch die maximale Spannung des Messbereiches des Oszilloskopes oder durch die Größe des Laserbandes beschränkt. Mit den Fit-Parametern aus Tabelle 3.4 kann aus diesen Grenzen ein Messbereich für Glaskugeln von 256 bis 1561  $\mu m$  und für Steinkohlepartikeln von 372 bis 15000  $\mu m$  berechnet werden.

Die vorgestellten Ergebnisse zur Kalibrierung des LLS-OPC zeigen, dass seine Anwendbarkeit bei der Untersuchung der Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer einzelnen Faser eingeschränkt ist. Aus dem Messbereich des LLS-OPC folgt, dass weder die einzelnen Glaskugeln ( $x_{50,3} = 5,5 \mu m$ ) noch die Propanruß-Agglomerate ( $x_{50,3} = 0,461 \mu m$ ), welche zur Bildung der Partikelstrukturen auf der Faser verwendet werden, gemessen werden können. Aus diesem Grund müssen zur Anwendung dieser Messtechnik Partikelstrukturen ausreichender Größe auf der Faser gebildet werden, damit die Ablösung messbarer Teile der

Tabelle 3.4: Fit-Parameter der Gleichung 3.21 für die in den Abbildungen 3.16, 3.17 und 3.18 gezeigten Messdaten.

Material	Beleuchtung	T <sub>2</sub> / °C	Fasern	ξ / 1	θ / 1
Glas	nein	22	ja	7,22 · 10 <sup>-7</sup>	2,157
Glas	ja	22	ja	6,69 · 10 <sup>-7</sup>	2,165
Glas	nein	22	nein	6,06 · 10 <sup>-7</sup>	2,153
Glas	ja	380	nein	4,86 · 10 <sup>-7</sup>	2,181
Glas (alle Fälle)	ja & nein	22 & 380	ja & nein	6,14 · 10 <sup>-7</sup>	2,164
Steinkohle	nein	22	ja	1,08 · 10 <sup>-2</sup>	0,407
Steinkohle	ja	22	ja	9,25 · 10 <sup>-3</sup>	0,432
Steinkohle	nein	22	nein	1,86 · 10 <sup>-5</sup>	1,370
Steinkohle	ja	380	nein	3,35 · 10 <sup>-2</sup>	0,204
Steinkohle (alle Fälle)	ja & nein	22 & 380	ja & nein	2,81 · 10 <sup>-3</sup>	0,603
Steinkohle & Glas (alle Fälle)	ja & nein	22 & 380	ja & nein	1,07 · 10 <sup>-4</sup>	1,201

Partikelstruktur möglich ist. Des Weiteren ist die Bestimmung eines Äquivalentdurchmessers der abgelösten Struktur, der möglichst nah an einer tatsächlichen geometrischen Abmessung der Struktur liegt, wie zum Beispiel dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser, nicht möglich. Der Grund dafür ist, dass die abgelösten Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln nicht sphärisch sind und aus Komponenten mit stark unterschiedlichen optischen Eigenschaften bestehen. Ein Vergleich abgelöster Strukturen kann somit lediglich über einen streulichtäquivalenten Durchmesser erfolgen. Ähnlich zu der an Steinkohlepartikeln untersuchten Lichtstreuung, könnten einzelne Glaskugeln, auf der Oberfläche der Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln, besonders stark streuen und damit die Streulichtintensität bestimmen. Die Streulichtintensität von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln hängt damit nicht nur von der Größe der Struktur sondern auch von dem Anteil an Glaskugeln auf der Oberfläche der Struktur und ihrer Orientierung relativ zum Laserband ab. Die Anwendbarkeit dieser Messtechnik beschränkt sich somit auf den Fall, in welchem zuerst Partikelstrukturen ausreichender Größe auf der Faser gebildet werden, dann bei möglichst geringer Strömungsgeschwindigkeit der gesamte Propanruß in der Struktur oxidiert wird und erst nach vollständiger Oxidation eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zur Untersuchung der Ablösung erfolgt. Mit dieser Vorgehensweise konnten mit dem LLS-OPC erfolgreich abgelöste Partikelstrukturen gemessen werden. Mit dieser Methode kann jedoch nicht untersucht werden, ob sich während der Oxidation des Rußes kurzzeitig Partikelstrukturen bilden, die bereits bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten abgelöst werden, als die Partikelstrukturen aus Glaskugeln, welche nach vollständiger Oxidation vorliegen. Auch die Verwendung des LLS-OPC als reiner Detektor für Agglomerate aus Propanruß und Glaskugeln, ohne Durchführung einer Größenbestimmung, ist kritisch zu hinterfragen. Der Grund hierfür ist, dass mit steigendem Oxidationsgrad des Rußes der Reflexionsgrad ab-

gelöster Partikelstrukturen zunimmt, wodurch auch kleinere Partikelstrukturen vom LLS-OPC detektiert werden können, was die Interpretation der Abhängigkeit der Anzahl an abgelösten und detektierten Partikelstrukturen von der Zeit erschwert. Auf diese Weise kann nichtsdestotrotz eine Aussage getroffen werden bis zu welchem Zeitpunkt, nach Start der Anströmung und Oxidation, die Ablösung ausreichend großer Agglomerate beobachtet werden kann. Die Information über das zeitliche Ende der Ablösevorgänge ermöglicht Rückschlüsse darauf ob sich die Agglomerate alleine aufgrund der Strömungskräfte direkt beim Start der Anströmung oder unterstützt durch die Oxidation, zu einem späteren Zeitpunkt, ablösen.

### **3.4.3 Blindversuch der Methode zum Auffangen abgelöster Partikelstrukturen**

Wie in Kapitel 3.4.2 dargestellt wurde ist das LLS-OPC zur Bestimmung der Größe und Anzahl abgelöster Partikelstrukturen nur eingeschränkt anwendbar. Aus diesem Grund erfolgt die Bestimmung der Größe und Anzahl abgelöster Partikelstrukturen im folgenden Kapitel 3.5 mit dem Auffangfilter. Der Auffangfilter befindet sich bei den Ablöseversuchen stromabwärts der Faser, sodass abgelöste Partikelstrukturen von ihm aufgefangen werden und analysiert werden können. Auf den in Kapitel 3.2.4 vorgestellten Wegen ist es möglich, dass der Auffangfilter mit Partikeln kontaminiert wird, die nicht vom eigentlich zu untersuchenden Ablöseversuch stammen. In diesem Kapitel werden deshalb Blindversuche vorgestellt, um das Ausmaß der Kontamination evaluieren zu können. Bei einem Blindversuch wird mit dem Auffangfilter fast identisch verfahren wie bei einem normalen Versuch, nur dass sich bei dem Versuch keine Faser mit Partikelstruktur in der Messkammer befindet.

Abbildung 3.19 zeigt die Anzahl der nach den Blindversuchen auf dem Auffangfilter vorhandenen Agglomerate eingeteilt in 10  $\mu\text{m}$  breite Größenklassen. Auch wenn bei diesen Versuchen keine Faser in der Messkammer vorhanden war, wird die Anzahl an abgelösten Agglomeraten auf die gleiche Faserlänge von 12,5 mm, wie in den Versuchen mit Faser, bezogen. Insgesamt nimmt die Anzahl an Partikeln/Agglomeraten mit zunehmendem Durchmesser ab. Der maximal beobachtete Agglomerat-Durchmesser beträgt 115  $\mu\text{m}$ .

Ein Vergleich der Agglomerate aus den Blindversuchen, mit denen aus Versuchen mit beladener Faser, ist in Abbildung 3.20 gezeigt. Zwei der drei gezeigten Partikelstrukturen aus den Blindversuchen sehen ähnlich aus wie die Strukturen aus den Versuchen mit Faser. Vermutlich stammen die Agglomerate aus vorhergehenden Ablöseversuchen. Die Agglomerate aus vorhergehenden Ablöseversuchen könnten sich zum Beispiel bei der Demontage der Faser aus der Messkammer (ohne Strömung durch die Düse) abgelöst haben. Die aufgefangenen Partikelstrukturen aus den Ablöseversuchen mit Faser haben eine unregelmäßige Form und enthalten teilweise Glaskugeln.

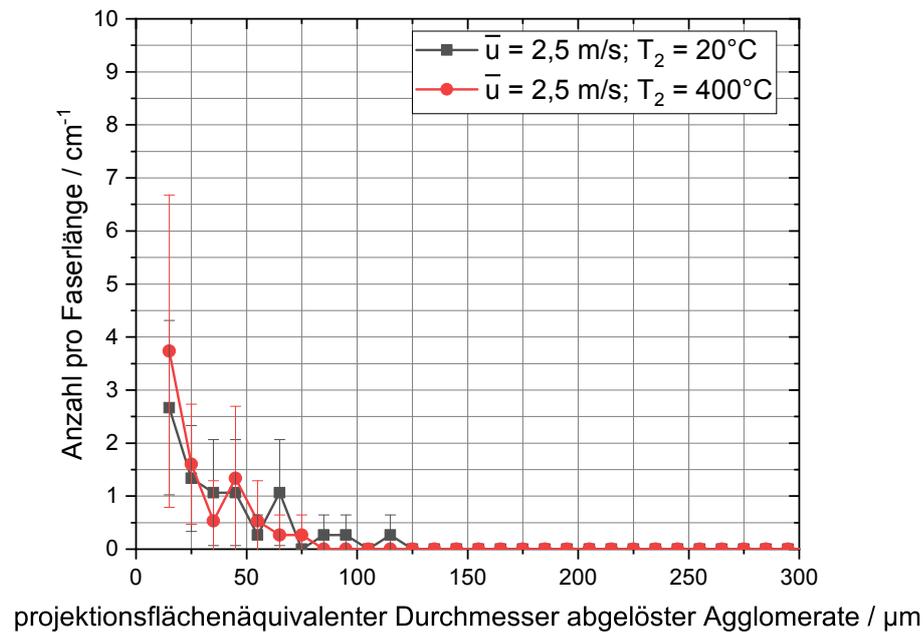


Abbildung 3.19: Anzahl und Größe von Agglomeraten auf dem Auffangfilter bei Ablöseversuchen ohne Faser in der Messkammer (Blindversuch). Jeder Datenpunkt repräsentiert mindestens drei Messungen. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.

Die Glaskugeln alleine sind nur schwer, zum Beispiel anhand ihres Schattens oder an noch an ihnen haftenden Rußpartikeln, von dem Filtermedium zu unterscheiden. Aus diesem Grund kann mit dieser Messmethode ein Messfehler durch Übersehen von kleinen Agglomeraten aus Glaskugeln nicht ausgeschlossen werden.

Ein weiterer Messfehler könnte daraus resultieren, dass sich die Agglomerate beim Aufprall auf dem Filter so orientieren, dass sie eine möglichst große Kontaktfläche mit dem Filter aufweisen. Durch diese Orientierung beim Aufprall sind die aus diesen Bildaufnahmen bestimmten Äquivalentdurchmesser tendenziell größer, als dies ohne Orientierung der Fall wäre.

Aus den in 3.4.2 gezeigten Ergebnissen zur Charakterisierung der Laserband-Streulicht-Messtechnik und den in diesem Kapitel vorgestellten Versuchen zum Auffangfilter, ergeben sich die in Abbildung 3.21 gezeigten Messbereiche. Die Laserband-Streulicht-Messtechnik weißt hierbei einen kleineren Messbereich der Größe abgelöster Partikelstrukturen auf, kann jedoch kontinuierlich während des Ablöseversuches messen, während der Auffangfilter einen größeren Messbereich für die Größe aufweist und den Zeitpunkt der Ablösung einzelner Agglomerate nicht erfassen kann. Die untere Messgrenze für die Partikelgröße wird beim Auffangfilter durch die teilweise hohe Anzahl an Partikeln bei dem Blindversuch bestimmt (siehe hierzu Abbildung 3.19), während die obere Messgrenze nur durch den Querschnitt des Auslassrohres beschränkt wird.

a) Ohne Faser;  $\bar{u} = 2,5 \text{ m/s}$ ;  $T_2 = 20^\circ\text{C}$



b) Mit Faser;  $m/A = 0,48 \text{ mg/mm}^2$ ;  $\bar{u} = 2,5 \text{ m/s}$ ;  $T_2 = 20^\circ\text{C}$



Abbildung 3.20: Partikelstrukturen auf einem Auffangfilter bei Blindversuchen (a) oder Versuchen mit beladener Faser in der Messkammer (b). Der Maßstab gilt für alle Abbildungen.

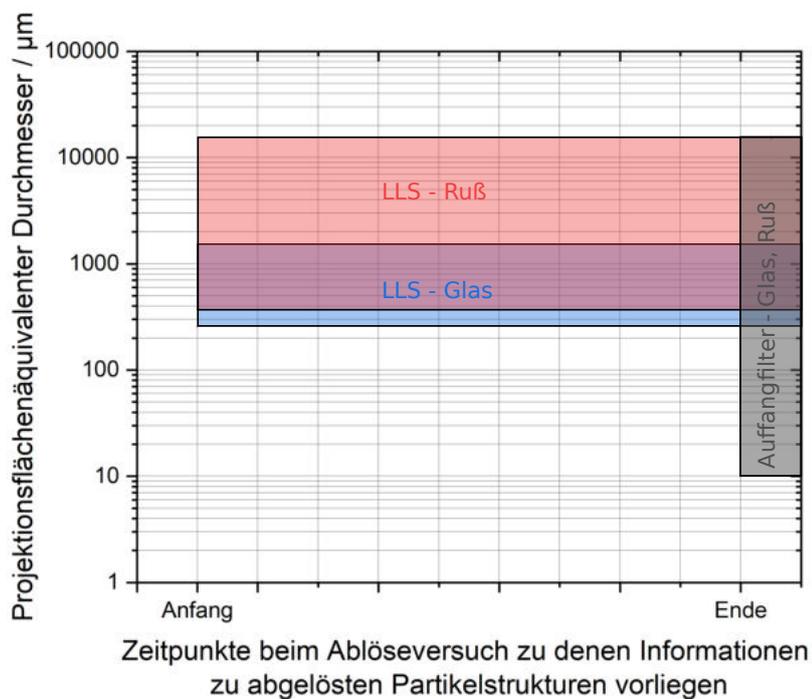


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung der Messbereiche der bei den Ablöseversuchen verwendeten Partikelmesstechnik.

### 3.5 Ergebnisse der Parameterstudie zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Glas und Propanruß

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit bei der Ablösung, der Einfluss der Faserbeladung / der Größe an Partikelstrukturen auf der Faser und der Einfluss der Temperatur und damit der Reaktion, auf die Anzahl und Größe der von einer Faser abgelösten Partikelstrukturen untersucht. Dazu werden zwei verschiedene mittlere Strömungsgeschwindigkeiten  $\bar{u}$  bei der Ablösung von 0,65 und 2,5 m/s, zwei verschiedene Mengen  $m/A$  an insgesamt bei der Strukturbildung aufgegebenen und auf den durchströmten Querschnitt bezogenen Partikelmassen von ca. 0,05 und 0,5 mg/mm<sup>2</sup> und zwei Temperaturstufen  $T_2$  von 20 und 400 °C verwendet. Im Unterkapitel 3.5.1 werden zuerst die für die Ablöseexperimente erzeugten Partikelstrukturen aufgeführt, welche in den folgenden Kapiteln 3.5.2, 3.5.3 und 3.5.4 zur Untersuchung der Ablösung verwendet werden.

#### 3.5.1 Für die Ablöseexperimente verwendete beladene Fasern und Versuchsbedingungen

Von den in Kapitel 2 vorgestellten Partikelstrukturen wird die in Abbildung 2.19 vorgestellte Partikelstruktur für die Parameterstudie zur Ablösung benutzt. In Abbildung 3.22 ist diese Partikelstruktur schematisch dargestellt, mit einem roten Kasten markiert und in den Kontext der Partikelstrukturen aus der Literatur und aus Kapitel 2 eingeordnet.

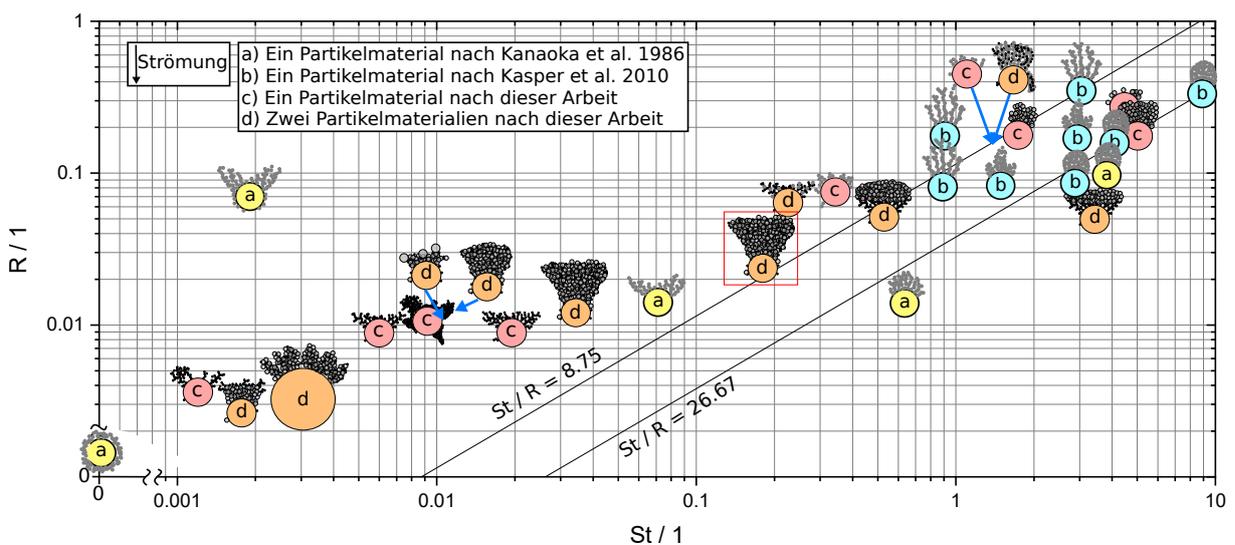


Abbildung 3.22: Einordnung der Partikelstrukturen aus Kapitel 2 in die Literatur. Die mit einem roten Kasten markierte Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln wird für die Parameterstudie zur Ablösung verwendet.

Bilder der Partikelstrukturen sind zusammen mit den Parametern für ihre Bildung und denen für die Ablöseexperimente in den Abbildungen 3.23 und 3.24 dargestellt. In den beiden Abbildungen sind bereits Ergebnisse der Ablöseexperimente angegeben, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird. Die Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln erfolgt simultan und die Strömungsrichtungen sind bei Ablösung und Abscheidung identisch. Die Versuchsnummer in der ersten Zeile bezeichnet dabei die Reihenfolge der Versuche. Aufeinanderfolgende Versuche gleicher Parameter wurden möglichst vermieden, um systematische Einflüsse vorhergehender Versuche auszuschließen. Auf den Abbildungen der Rückseite der Faser sind bei der geringen Beladung (Abbildung 3.23) nur schwer Partikelstrukturen zu erkennen, Aufnahmen bei höherer Vergößerung in Abbildung 3.25 zeigen jedoch Partikelstrukturen, die eine ausreichende Größe vorweisen um auf dem Auffangfilter sichtbar zu sein. Das in Versuch Nr. 8 sichtbare größere Agglomerat wurde vermutlich nicht auf der Faser gebildet, sondern möglicherweise stromaufwärts der Faser von einem Apparateteil abgelöst und anschließend auf der Faser abgeschieden. Die Aufnahmen bei hoher Beladung in Abbildung 3.24 zeigen, dass die Partikelstrukturen von Versuch zu Versuch variieren. Dies ist zum einen auf die statistische Natur der Abscheidung zurückzuführen, bei der nicht immer alle Partikeln an der gleichen Position und in der gleichen Reihenfolge stromaufwärts der Faser zugegeben werden und zum anderen auf die schwankenden Massenströme.

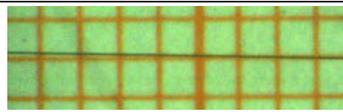
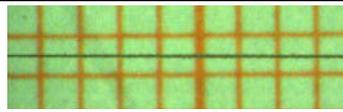
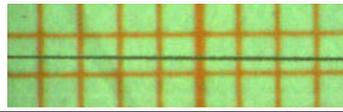
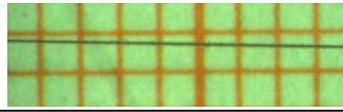
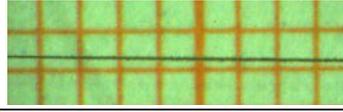
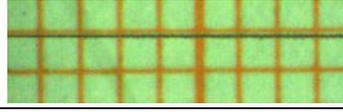
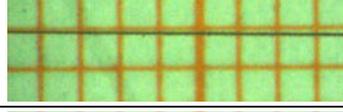
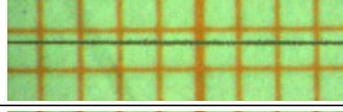
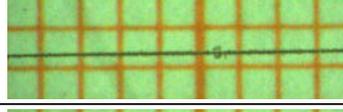
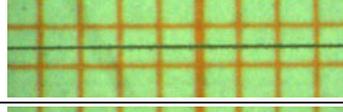
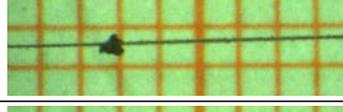
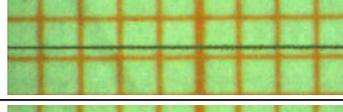
Versuchsreihenfolge  Abbildung der Abströmseite der Faser vor dem Ablöseversuch  3 mm 	1		3		5		2		4		6		10		11		12		7		8		9			
	Abscheidung Ruß: m/A / (mg/mm <sup>2</sup> )	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
	Abscheidung Glas:m/A / (mg/mm <sup>2</sup> )	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	
	Abscheidung: Geschwindigkeit $\bar{u}$ / (m/s)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
	Ablösung: Geschwindigkeit $\bar{u}$ / (m/s)	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	2,5	20	20	2,5	2,5	20	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	2,5	2,5	400	2,5	2,5	
	Ablösung: Temperatur T <sub>2</sub> / °C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	Anzahl abgelöster Agglomerate / #	2	5	3	28	3	2	28	2	2	2	3	2	2	2	9	9	10	6	6	6	6	6	6	24	
	Abgelöstes Agglomeratvolumen / m <sup>3</sup>	3,1·10 <sup>-14</sup>	2,8·10 <sup>-14</sup>	2,3·10 <sup>-13</sup>	3,5·10 <sup>-12</sup>	2,3·10 <sup>-13</sup>	3,1·10 <sup>-14</sup>	7,2·10 <sup>-14</sup>	5,6·10 <sup>-14</sup>	7,2·10 <sup>-14</sup>	3,1·10 <sup>-14</sup>	7,3·10 <sup>-13</sup>	7,3·10 <sup>-13</sup>	3,9·10 <sup>-13</sup>	3,9·10 <sup>-13</sup>	1,5·10 <sup>-13</sup>	1,5·10 <sup>-13</sup>	5,8·10 <sup>-14</sup>	5,8·10 <sup>-14</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	4,9·10 <sup>-13</sup>	

Abbildung 3.23: Übersicht der Versuche zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer einzelnen 40 µm Stahlfaser bei geringer Beladung.

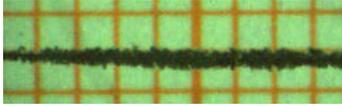
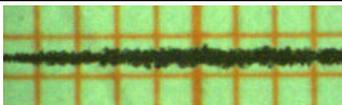
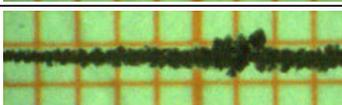
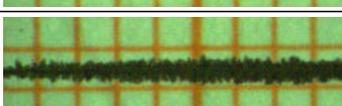
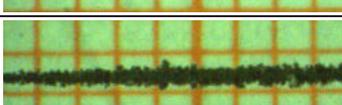
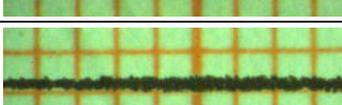
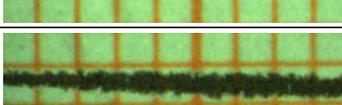
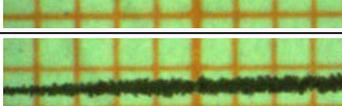
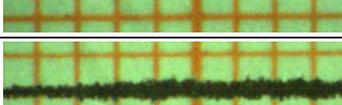
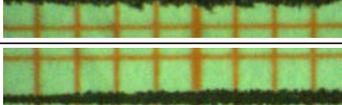
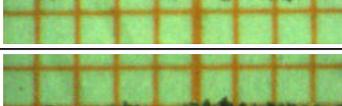
Versuch	14	19	21	13	18	20	16	22	24	15	17	23	
Abbildung der Abströmseite der Faser vor dem Ablöseversuch  													
	Abscheidung Ruß: m/A / (mg/mm <sup>2</sup> )	0,21	0,25	0,23	0,21	0,20	0,21	0,21	0,24	0,23	0,21	0,20	0,25
	Abscheidung Glas:m/A / (mg/mm <sup>2</sup> )	0,20	0,23	0,25	0,31	0,17	0,10	0,25	0,40	0,37	0,11	0,21	0,49
	Abscheidung: Geschwindigkeit $\bar{u}$ / (m/s)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Ablösung: Geschwindigkeit $\bar{u}$ / (m/s)	0,65	0,65	0,65	2,5	2,5	2,5	0,65	0,65	0,65	2,5	2,5	2,5
	Ablösung: Temperatur T <sub>2</sub> / °C	20	20	20	20	20	20	400	400	400	400	400	400
Anzahl abgelöster Agglomerate / #	4	3	7	60	47	20	2	2	3	3	15	14	
Abgelöstes Agglomeratvolumen / m <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>-13</sup>	3,2·10 <sup>-14</sup>	6,5·10 <sup>-14</sup>	1,2·10 <sup>-11</sup>	2,7·10 <sup>-11</sup>	2,4·10 <sup>-12</sup>	3,1·10 <sup>-14</sup>	9,9·10 <sup>-15</sup>	3,·10 <sup>-13</sup>	2,5·10 <sup>-13</sup>	1,1·10 <sup>-13</sup>	2,0·10 <sup>-13</sup>	

Abbildung 3.24: Übersicht der Versuche zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer einzelnen 40 µm Stahlfaser bei hoher Beladung.

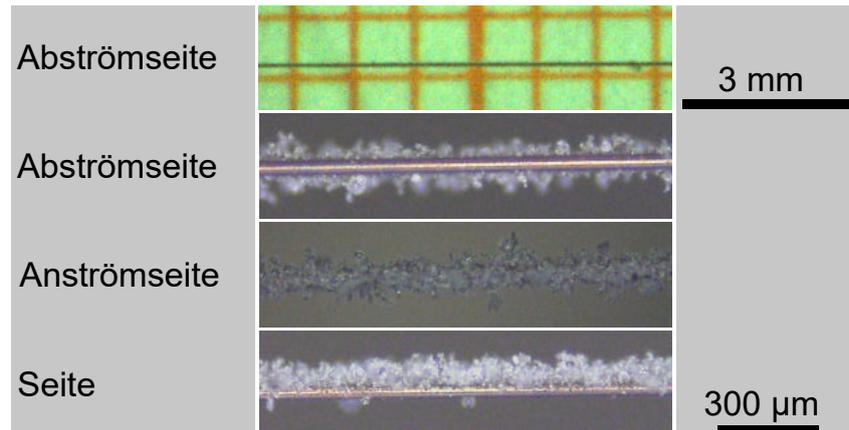


Abbildung 3.25: Partikelstruktur auf einer einzelnen Faser, nach simultaner Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{u}$  von 0,4 m/s, einer aufgegebenen Menge an Glaskugeln von  $m/A = 0,03 \text{ mg/mm}^2$  und einer aufgegebenen Menge an Propanruß von  $m/A = 0,02 \text{ mg/mm}^2$ . Die untere Skala gilt für die unteren drei Bilder und in der Seitenansicht ist die Strömung von oben nach unten.

Die Geschwindigkeits- und Temperaturverläufe bei den Ablöseversuchen aus den Abbildungen 3.23 und 3.24 sind in Abbildung 3.26 gezeigt. Bei der geringen Temperatur ist die Temperatur des Düsenkörpers  $T_2$  eingezeichnet, da diese in dem vorliegenden Fall nicht von der Temperatur an der Faser abweicht. Bei der hohen Temperatur ist die Temperatur aus Kalibrierungsmessungen mit einem Thermoelement auf der Höhe der Faser (10 mm vom Düsenaustritt entfernt, bei  $r^* = 0$ ) eingezeichnet. Da die Temperatur an der Faser mit einem Handmessgerät bestimmt wurde, ist ein zeitlicher Versatz zu dem automatisch aufgezeichneten Geschwindigkeitsverlauf vorhanden.

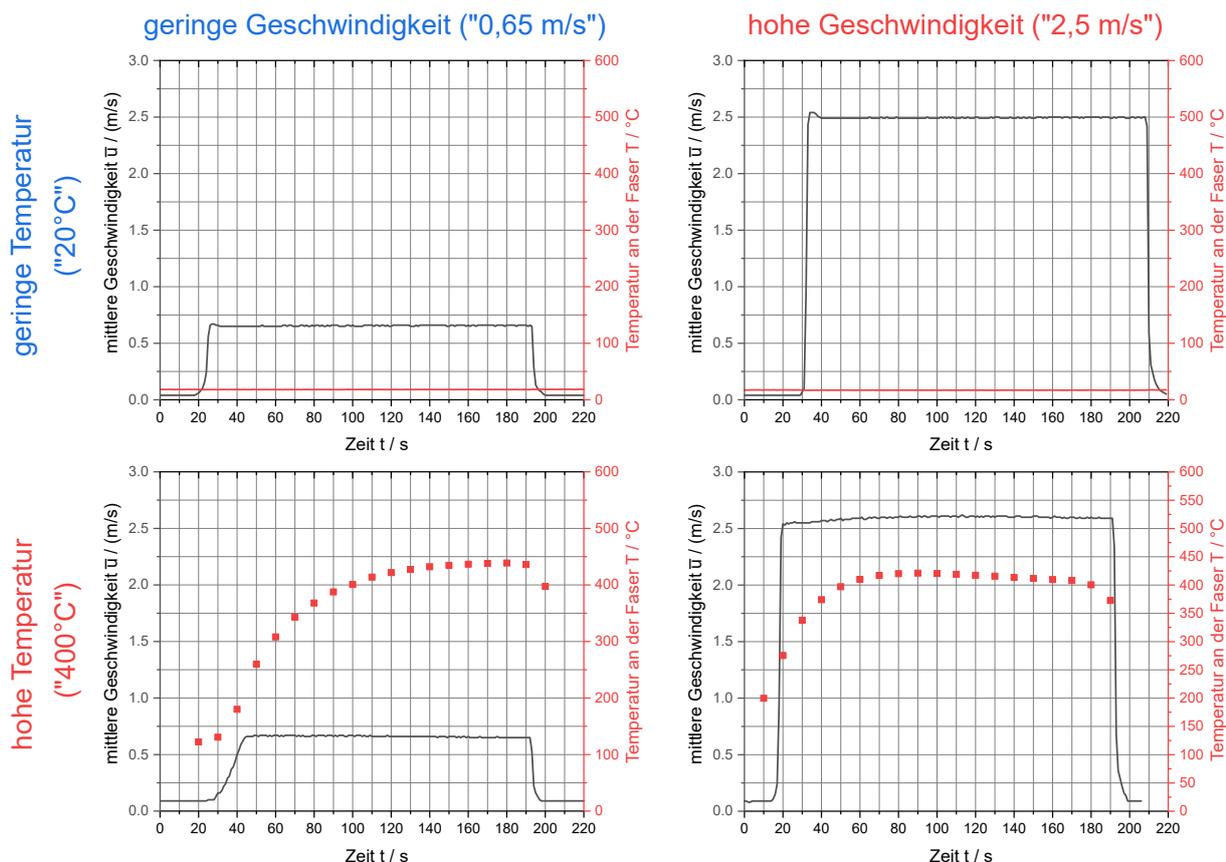


Abbildung 3.26: Geschwindigkeits- und Temperaturverläufe der Ablöseversuche aus den Abbildungen 3.23 und 3.24

### 3.5.2 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ablösung

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit, bei den Ablöseexperimenten, auf die Größenverteilung abgelöster Partikelstrukturen ist in Abbildung 3.27 dargestellt. Die Abbildung enthält vier Diagramme für vier verschiedene Kombinationen an Temperatur und Faserbeladung. In jedem der vier Diagramme sind jeweils die Ergebnisse für Ablöseexperimente mit geringer (0,65 m/s) und mit hoher (2,5 m/s) Strömungsgeschwindigkeit angezeigt, um den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ablösung bei den unterschiedlichen Kombinationen von Faserbeladung und Temperatur zu zeigen. Als Referenz sind zusätzlich in jedem Diagramm die Ergebnisse für die Blindversuche ohne Faser dargestellt. Die Faserlänge  $l_{Faser}$ , auf welche die Anzahl abgelöster Agglomerate bezogen wird, ist gleich dem Düsendurchmesser von 12,5 mm. Die Abbildung zeigt die Größenverteilungen bei Verwendung des projektionsflächenäquivalentem Durchmessers, der als Durchmesser eines Kreises mit gleicher Projektionsfläche wie die auf dem Auffangfilter gefundene Partikelstruktur verstanden wird.

Abbildung 3.27 zeigt, dass die Anzahl der pro Faserlänge abgelösten Agglomerate nur in den Experimenten bei geringer Temperatur und hoher Beladung über der des Blindversuches liegt und

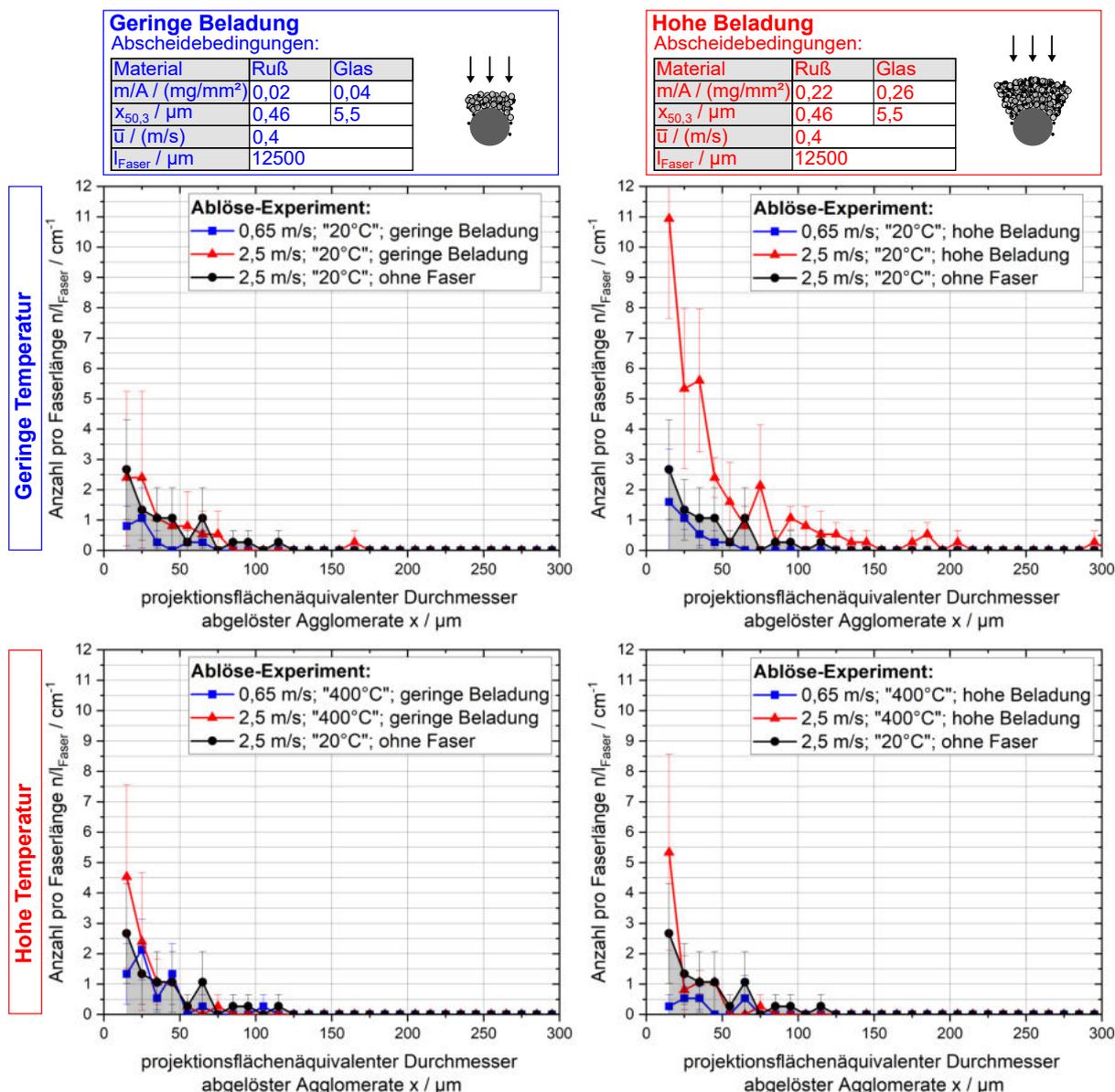


Abbildung 3.27: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10 μm Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde.

nur für diese Kombination an Parametern der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit beobachtet werden kann. In diesem Fall führt eine höhere Strömungsgeschwindigkeit zu mehr abgelösten Agglomeraten.

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Ablösung kann auf die Strömungswiderstandskraft zurückgeführt werden. Um dies zu zeigen wird die Strömungswiderstandskraft auf

eine Kugel und einen Zylinder in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit mit den Formeln 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4, mit den Dichten und Viskositäten von Luft aus Tabelle 3.5 berechnet. Eine Kugel beziehungsweise ein Zylinder, sind dabei Näherungen der Form der abgelösten Partikelstruktur. Die reale Partikelstruktur weist zwar keine ideale Zylinder oder Kugelform auf, da aber viele verschiedene Geometrien einen ähnlichen Verlauf des Widerstandsbeiwertes über der Reynoldszahl wie eine Kugel oder ein Zylinder vorweisen [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ermöglicht diese Näherung den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Widerstandskraft und die Ablösung qualitativ zu diskutieren. Die geringe oder hohe Beladung der Faser wird über einen geringen ( $10\ \mu\text{m}$ ) oder hohen ( $300\ \mu\text{m}$ ) Durchmesser der Kugel / des Zylinders beschrieben. Es wird angenommen, dass die Länge des Zylinders gleich seinem Durchmesser ist. Die berechneten Strömungswiderstandskräfte sind für analoge Kombinationen von Temperatur und Beladung, wie in Abbildung 3.27, in Abbildung 3.28 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Strömungswiderstandskraft unter allen betrachteten Bedingungen mit der Strömungsgeschwindigkeit zunimmt und somit eine Erklärung für die größere Anzahl abgelöster Agglomerate bei höherer Strömungsgeschwindigkeit ist.

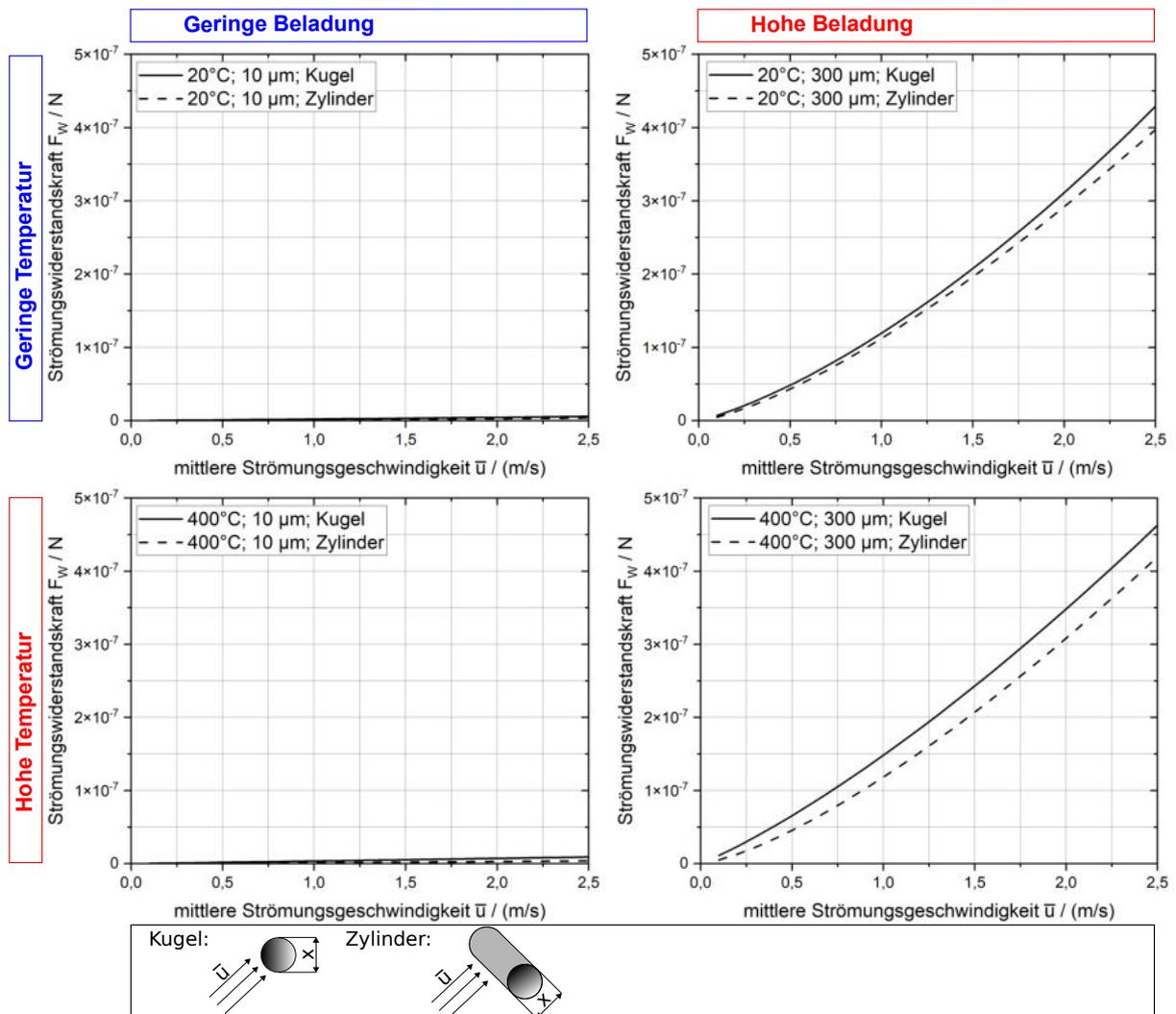


Abbildung 3.28: Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über der Strömungsgeschwindigkeit. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der Strömungsgeschwindigkeit, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten.

### 3.5.3 Einfluss der Beladung auf die Ablösung

Der Einfluss der Beladung der Faser mit Partikelmaterial auf die Größenverteilung abgelöster Partikelstrukturen ist in Abbildung 3.29 dargestellt. Bei den Versuchen mit geringer Beladung wurden ca.  $0,05 \text{ mg/mm}^2$  und bei denen mit hoher Beladung  $0,5 \text{ mg/mm}^2$  an Partikelmaterial bezogen auf den Anströmquerschnitt zugegeben. Die vier Diagramme für verschiedene Kombinationen an Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit zeigen jeweils Ergebnisse von Versuchen mit geringer und hoher Beladung.

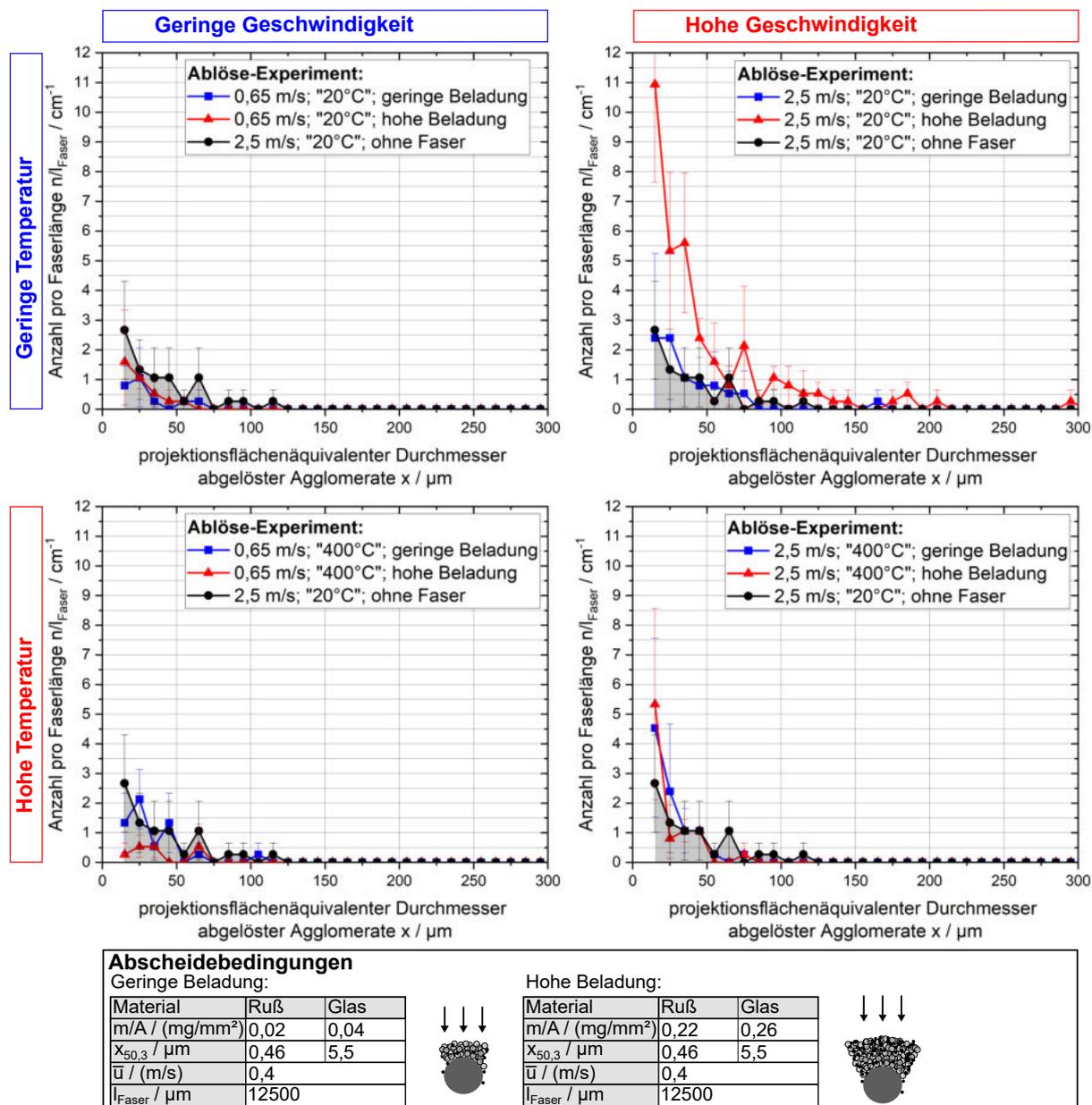


Abbildung 3.29: Einfluss der Beladung auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10 μm Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde.

Abbildung 3.29 zeigt, dass nur bei geringer Temperatur und hoher Strömungsgeschwindigkeit die Anzahl abgelöster Agglomerate wesentlich über dem Blindversuch liegt, und nur für diesen Fall Aussagen über den Einfluss der Beladung auf die Ablösung getroffen werden können. Für diese Kombination an Parametern steigt die Anzahl abgelöster Agglomerate mit der Beladung der Faser.

Um eine Erklärung für den Einfluss der Beladung auf die Ablösung zu finden, ist die Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder für die verschiedenen Kombinationen an Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit in Abbildung 3.30 dargestellt. Die Berechnung erfolgt analog wie in Kapitel 3.5.2. Der Einfluss der Beladung wird dabei über eine Variation des Durchmessers  $x$  des Zylinders / der Kugel ausgedrückt, da auch die Partikelstrukturen auf der Faser mit steigender Beladung größer werden. Für alle betrachteten Parameterkombinationen steigt die Strömungswiderstandskraft mit steigendem Durchmesser an. Eine mögliche Erklärung für die höhere Anzahl abgelöster Agglomerate bei höherer Beladung ist somit die höhere Strömungswiderstandskraft auf die Partikelstruktur.

Neben der Strömungswiderstandskraft ist eine weitere Erklärung für die höhere Anzahl abgelöster Agglomerate bei höherer Beladung, dass mehr Partikelmaterial auf der Faser vorhanden ist, welches sich von dieser Ablösen kann. Mehr Partikelmaterial führt zusätzlich dazu, dass die Wahrscheinlichkeit für festigkeitsverringende Fehler der Partikelstruktur, wie Hohlräume, Kerben oder Risse, größer ist. Des Weiteren nimmt die Gewichtskraft auf die Partikelstruktur mit der Beladung der Faser zu, welche die Ablösung begünstigen kann.

Bei hoher Beladung hat die Partikelstruktur auf der Faser eine ausreichende Größe um bei den Ablöseexperimenten sichtbar zu sein. Abbildung 3.31 zeigt Ausschnitte von Videoaufnahmen der Versuche mit hoher Faserbeladung. Die Abbildung der Partikelstruktur wird zu den Rändern hin unscharf, was auf die  $45^\circ$  Anordnung der Faser relativ zur Betrachtungsrichtung der Kamera zurückzuführen ist. In den Versuchen mit Reaktion / bei hoher Temperatur ist eine Änderung der Farbe der Partikelstruktur erkennbar, welche durch die Oxidation von Ruß verursacht wird. Anhand der Videoaufnahmen ist zu erkennen, dass der Großteil der Partikelstrukturen auf der Faser haften bleibt.

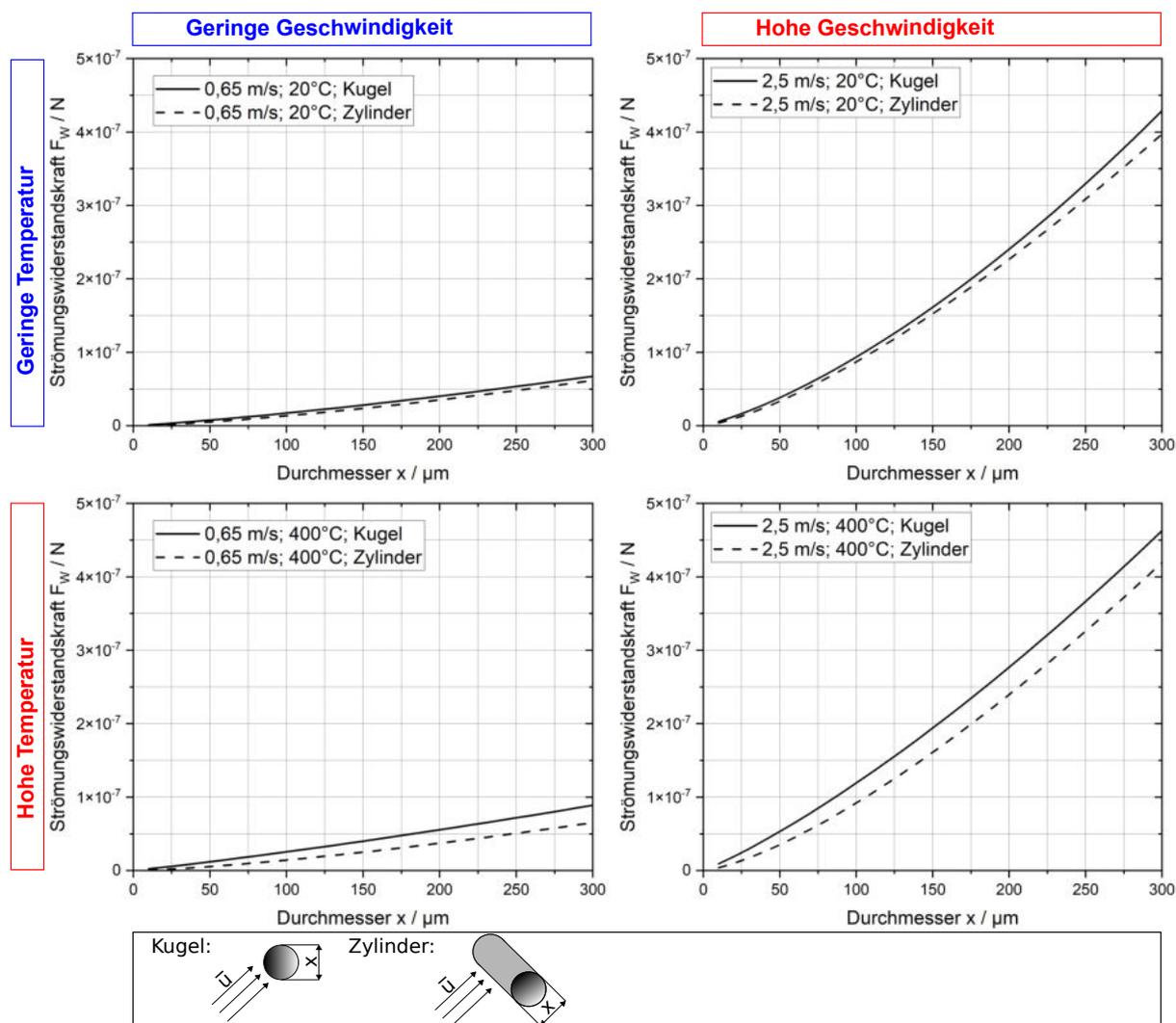


Abbildung 3.30: Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über deren Durchmesser. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der charakteristischen Länge, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der charakteristischen Länge auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten.

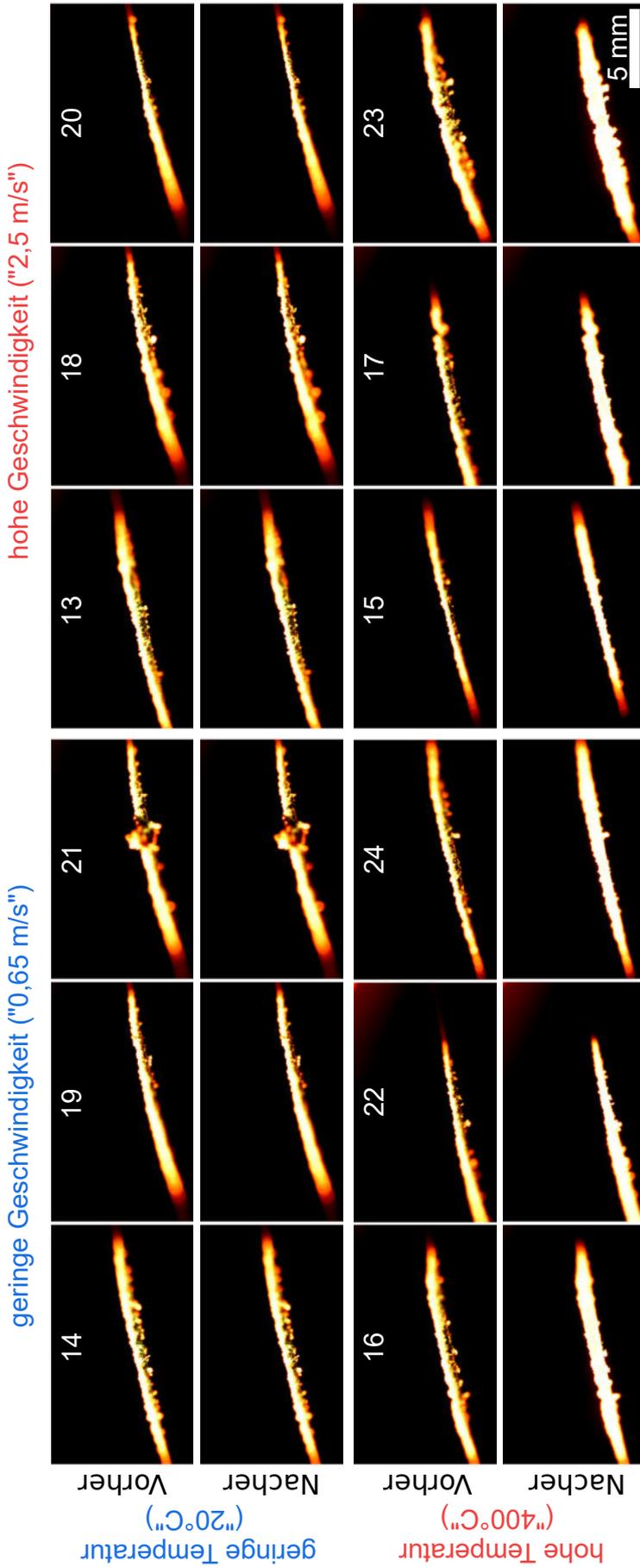


Abbildung 3.31: Aufnahmen der in die Messkammer eingebauten Fasern aus der Abbildung 3.24 vor und nach dem Ablöseversuch.

### 3.5.4 Einfluss der Temperatur und der damit verbundenen Reaktion auf die Ablösung

Eine Temperatur über 350°C führt zur Oxidation des Propanrußes und damit zu seinem Verschwinden aus der Partikelstruktur. Der Einfluss der Temperatur und damit der Reaktion, auf die Anzahl abgelöster Agglomerate ist für vier Kombinationen an Strömungsgeschwindigkeit und Beladung in Abbildung 3.32 dargestellt.

Bei den vier in Abbildung 3.32 gezeigten Parameterkombinationen lösen sich nur bei hoher Geschwindigkeit und hoher Beladung signifikant mehr Agglomerate als im Blindversuch ab, weshalb nur für diese Kombination der Einfluss der Temperatur betrachtet werden kann. In dem vorliegenden Fall führt die hohe Temperatur und die damit verbundene Reaktion, zu einer geringeren Anzahl an abgelösten Agglomeraten. Dieser Trend ist eindeutig, da Abbildung 3.24 zeigt, dass sich selbst bei dem Versuch ohne Reaktion mit der geringsten Anzahl abgelöster Partikelstrukturen (20 Stück bei Versuch Nr. 20) mehr Partikelstrukturen mit einem größerem aus dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser berechneten Volumen ablösen als in dem entsprechenden Versuch mit Reaktion, in dem sich die meisten Partikelstrukturen abgelöst haben (15 Stück bei Versuch Nr. 17).

Analog zu den Kapiteln 3.5.2 und 3.5.3, wird eine Änderung der Strömungswiderstandskraft als Erklärung in Betracht gezogen. Hierfür ist die berechnete Strömungswiderstandskraft für die vier Parameterkombinationen und in Abhängigkeit von der Temperatur, in Abbildung 3.33 aufgetragen.

Abbildung 3.33 zeigt, dass im betrachteten Parameterbereich die Strömungswiderstandskraft von 20°C bis 400°C insgesamt zunimmt, was für eine Zunahme der Anzahl abgelöster Agglomerate mit der Temperatur sprechen würde. In den Experimenten wurde jedoch eine Abnahme der Anzahl abgelöster Agglomerate mit höherer Temperatur beobachtet. Eine Reaktion führt zusätzlich zu einer Änderung der Größe der Partikelstruktur. Da die Strömungsgeschwindigkeit in den Versuchen aber schneller ihren maximalen Wert erreicht, als der Propanruß reagiert ist, liegt zumindest Anfangs die ganze Strukturgröße bei voller Strömungsgeschwindigkeit vor. Aus diesen Gründen kann die Strömungswiderstandskraft die experimentellen Beobachtungen zum Einfluss der Temperatur auf die Ablösung nicht erklären. Deshalb werden im Folgenden Überlegungen zu dem Einfluss der Reaktion auf die Haftkräfte und die Festigkeit der Struktur aufgeführt. In Abbildung 3.34 sind die Haftkräfte zwischen zwei gleich großen und kugelförmigen Partikeln, aus unterschiedlichen Materialien und bei unterschiedlichen Kontaktabständen dargestellt. Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.5 aufgeführt. Durch Auswertung des in Gleichung 3.8 eingeführten  $\Pi$ -Parameters, mit den in Tabelle 3.5 aufgeführten Stoffgrößen,

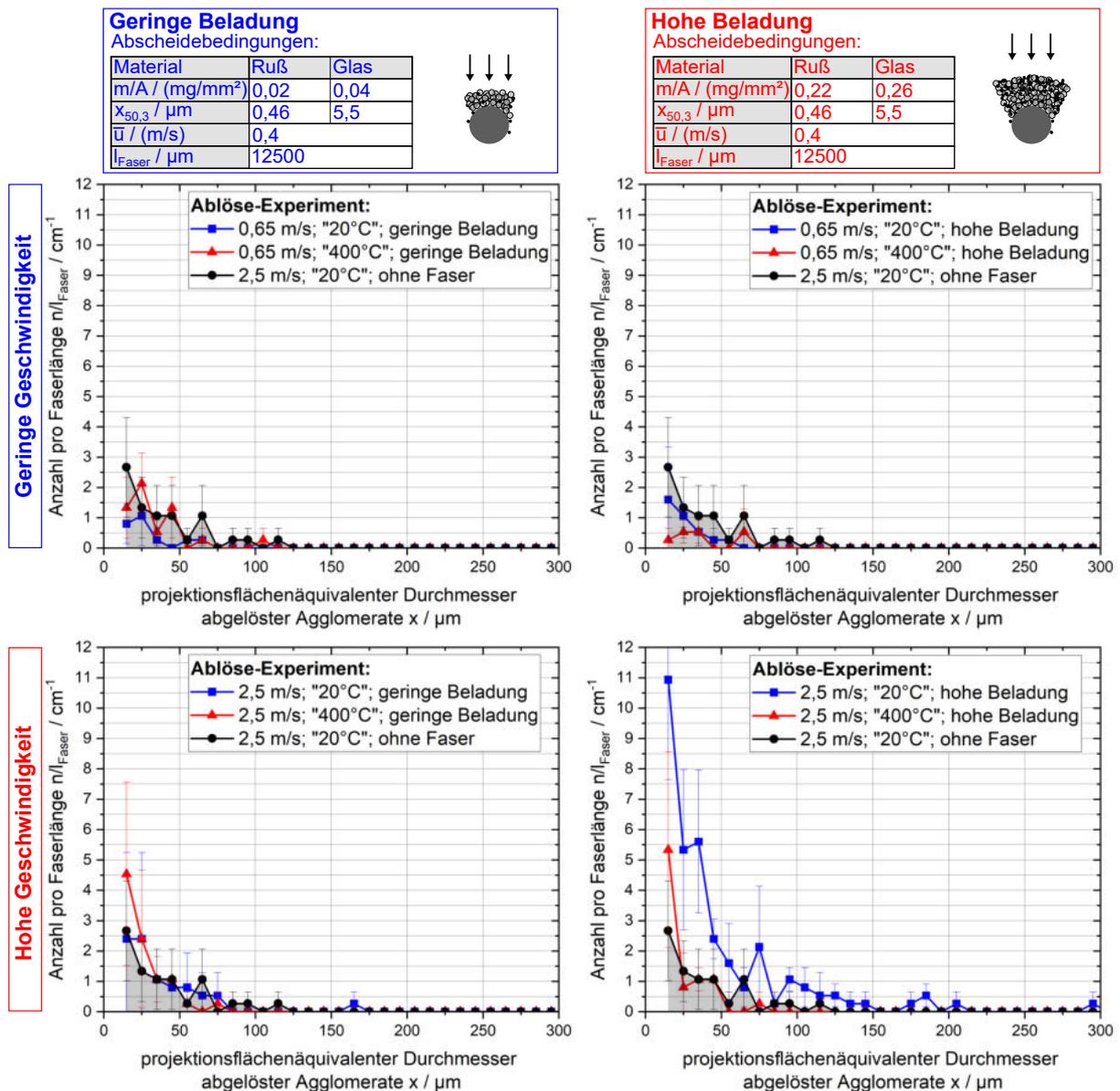


Abbildung 3.32: Einfluss der Temperatur auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10 μm Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde.

kann festgestellt werden, dass die Berechnung der VdW-Kraft nach dem Ansatz von Hamaker (Gleichung 3.12) zulässig ist. Die in Abbildung 3.34 gezeigten Tendenzen der Einflussgrößen auf die Haftkräfte verhalten sich im Fall eines Kugel-Wand Kontaktes ähnlich. Bei einem Kugel-Wand Kontakt sind die Haftkräfte generell größer als bei einem Kugel-Kugel Kontakt, da die Oberflächenelemente der beteiligten Körper, im Bereich der Kontaktstelle, einen geringeren mittleren Abstand voneinander aufweisen. Durch eine Reaktion nimmt der Sauterdurchmesser einer

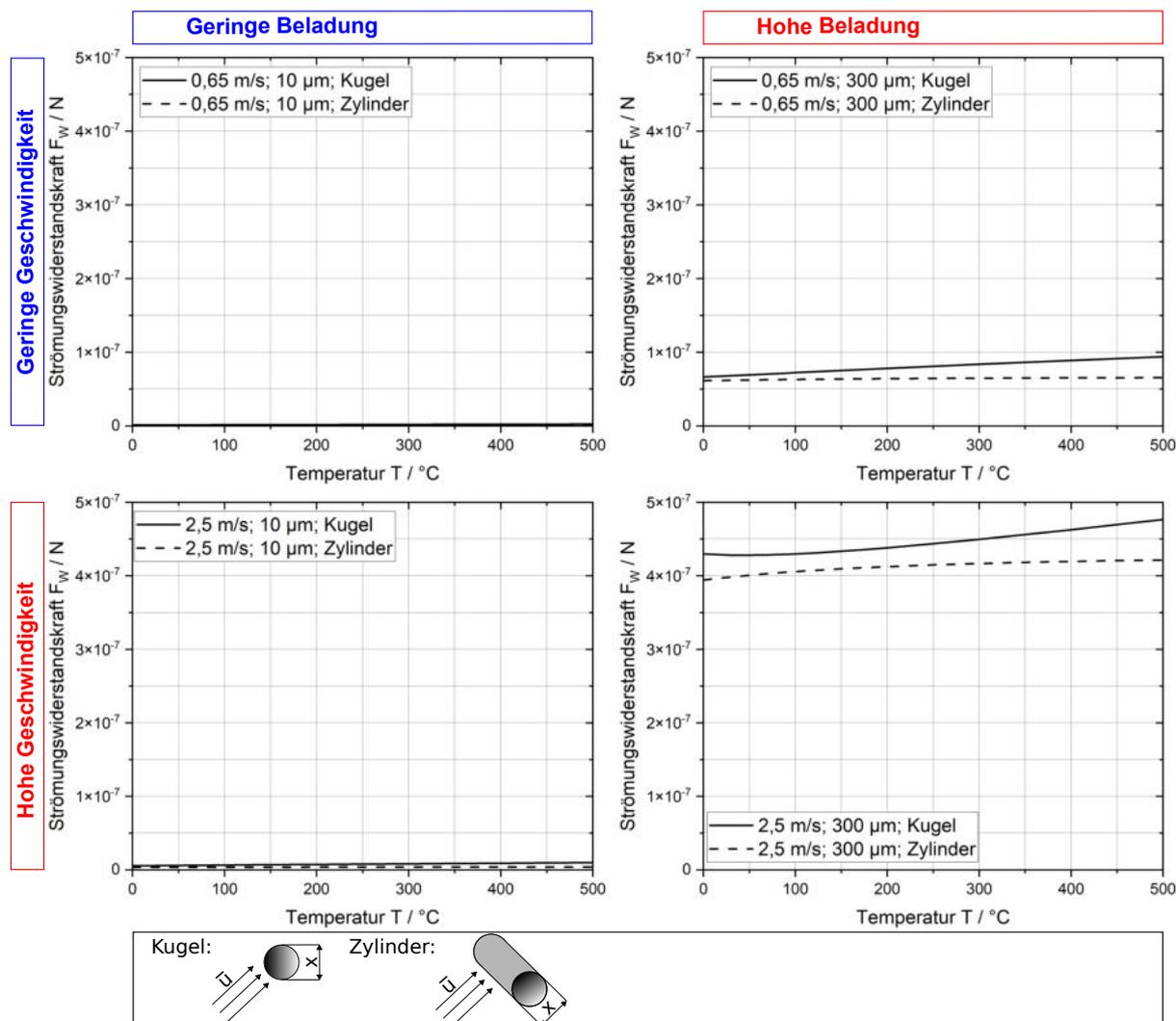


Abbildung 3.33: Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über der Temperatur. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der Temperatur, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der Temperatur auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten.

reaktiv-inerten Partikelstruktur mit kleinen reaktiven Partikeln und großen inerten Partikeln zu. Ein Vergleich mit Abbildung 3.34 zeigt, dass dadurch auch tendenziell die Haftkräfte zunehmen (rote Pfeile im Diagramm). Dies würde dafür sprechen, dass sich im Falle mit Reaktion weniger Partikelstrukturen ablösen, was der experimentellen Beobachtung entspricht. Die Änderung der chemischen Zusammensetzung wirkt dieser Tendenz leicht entgegen, da Ruß eine höhere Hamaker-Konstante, als auch eine höhere elektrische Ladung, aufweist als Glas. Die Flüssigkeitsbrücken trocknen bei der hohen Temperatur der Ablöseversuche mit Reaktion aus, während unklar ist, ob auch eine vollständige Trocknung in den Ablöseversuchen bei Umgebungstemperatur stattfindet. Tendenziell spricht die Trocknung der Flüssigkeitsbrücken für eine höhere

Anzahl abgelöster Agglomerate bei erhöhter Temperatur. Ein weiterer Parameter, der bei den in Abbildung 3.34 gezeigten Haftkräften für eine Verringerung der Anzahl abgelöster Agglomerate mit der Temperatur spricht, ist der Kontaktabstand  $a_0$ , der hier auch einen zusätzlichen Abstand durch Rauigkeiten der Oberfläche enthält. Eine Verringerung dieses Abstandes, zum Beispiel durch Abflachung von Oberflächenunebenheiten oder durch Verbrennung kleiner Rußpartikeln, die bei geringer Größe wie Abstandshalter wirken können, welche die Haftkräfte reduzieren, führt zu einer Erhöhung der Haftkraft. Des Weiteren könnten bei der hohen Temperatur weitere Haftkräfte als die in Abbildung 3.34 aufgeführten hinzu kommen. Ursachen für solche weiteren Haftkräfte könnten Feststoffbrücken, durch beim Trocknen der Flüssigkeitsbrücken auskristallisierte Stoffe, Sinterbrücken und Flüssigkeitsbrücken durch auf der Oberfläche des Rußes adsorbierte Kohlenwasserstoffe sein. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Änderung der Haftkräfte bei erhöhter Temperatur bei den meisten Mechanismen, wie zum Beispiel bei der Ausbildung von Sinterhälsen, nicht instantan stattfindet, sondern eine gewisse Zeit benötigt wird. Da die Faser mit Partikelstruktur vor der Anströmung in die heiße Messkammer bei 100 bis 200°C eingebaut wird, ist zumindest in diesem Temperaturbereich ca. eine Minute Verweilzeit vor dem Start der Anströmung vorhanden.

Tabelle 3.5: Für die theoretische Analyse verwendete Parameter.

Parameter	Symbol	Wert	Quelle
Dichte von Luft bei 20°C	$\rho_F$	1,189 kg/m <sup>3</sup>	Span [2013]
Dichte von Luft bei 400°C	$\rho_F$	0,517 kg/m <sup>3</sup>	Span [2013]
Dichte von Ruß	$\rho_P$	2200 kg/m <sup>3</sup>	Tsai et al. [1991]
Dichte von Glas	$\rho_P$	2500 kg/m <sup>3</sup>	Kelly [1973]
Kinematische Viskosität von Luft bei 20°C	$\nu_F$	15,32 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	Span [2013]
Kinematische Viskosität von Luft bei 400°C	$\nu_F$	64,35 · 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	Span [2013]
Hamaker-Konstante Graphit-Graphit	$H_{C,C}$	46,9 · 10 <sup>-20</sup> J	Dahneke [1972]
Hamaker-Konstante SiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub>	$H_{SiO_2,SiO_2}$	8,53 · 10 <sup>-20</sup> J	Dahneke [1972]
Porosität eines Ruß-Filterkuchens	$\epsilon$	0,95	Kim et al. [2009]
Porosität Partikelstruktur nach Oxidation	$\epsilon$	0,975	Eigene Rechnung
Poissonzahl Graphit	$\psi_C$	0,16	Kelly [1973]
Poissonzahl Glas	$\psi_{Glas}$	0,2	Dahneke [1972]
Elastizitätsmodul Graphit	$E_C$	6,75 · 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	Tsai et al. [1991]
Elastizitätsmodul SiO <sub>2</sub>	$E_{SiO_2}$	7,23 · 10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	Kelly [1973]
Kontaktabstand	$a_0$	0,4 nm	Götzinger und Peukert [2004]
Grenzflächenspannung Wasser-Luft	$\gamma$	72,7 mN/m	Räbiger und Schlüter [2013]
Elektrische Ladung pro Masse von Propanruß	$q/m$	1232 pAs/mg	Eigene Messung
Elektrische Ladung pro Masse von Glaskugeln	$q/m$	90 pAs/mg	Eigene Messung

Neben den Haftkräften an den einzelnen Kontaktstellen ändert die Reaktion auch die Festigkeit der Partikelstruktur über die Änderung des Aufbaus der Struktur an sich, der durch die Porosität  $\epsilon$  und den Sauterdurchmesser der in der Struktur enthaltenen Partikeln  $\bar{x}_2$  beschrieben werden

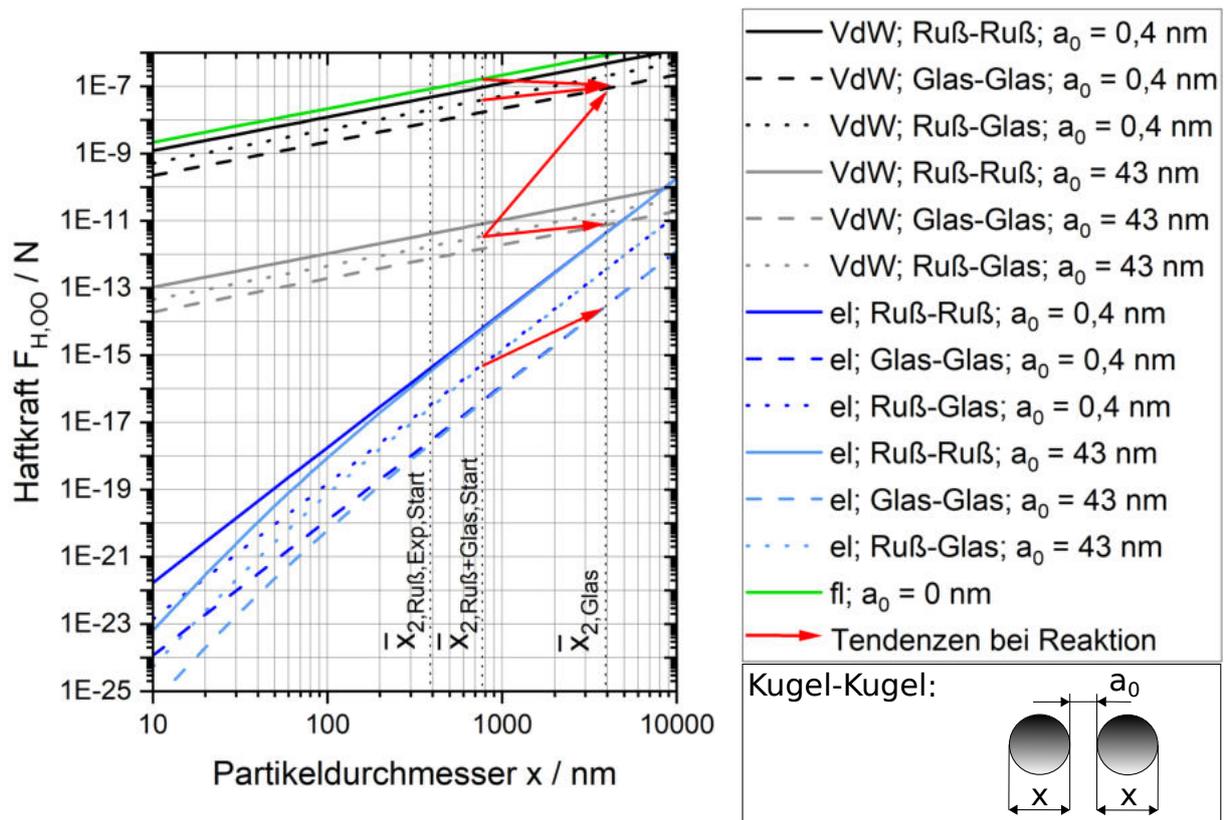


Abbildung 3.34: Theoretisch berechnete Van-der-Waals (VdW), elektrostatische (el) und Flüssigkeitsbrücken-Kräfte (fl) zwischen zwei kugelförmigen Partikeln gleichen Durchmessers, bei unterschiedlichen Materialkombinationen und Kontaktabständen  $a_0$ . Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.5 aufgeführt. Die roten Pfeile zeigen vom Anfangszustand zum Endzustand bei der Verbrennung von Ruß.

kann. Abbildung 3.35 zeigt die mit Gleichung 3.6 berechnete Festigkeit der Partikelstruktur, bezogen auf die mittlere Haftkraft einer Kontaktstelle. Mit zunehmendem Sauterdurchmesser nimmt die Festigkeit bei gleich bleibender Haftkraft somit ab, da die Anzahl an Kontaktstellen pro Volumen der Partikelstruktur abnimmt. Da die vollständige Oxidation des Propanrußes, in der Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln, zu einer Zunahme des Sauterdurchmessers führt, ist somit mit einer Abnahme der Festigkeit pro mittlerer Haftkraft der Partikelstruktur zu rechnen. Die Videoaufnahmen aus Abbildung 3.31 haben gezeigt, dass die Projektionsfläche der Partikelstruktur bei der Oxidation des Rußes näherungsweise konstant bleibt. Dies spricht dafür, dass die Oxidation von Ruß zu einer Abnahme des Feststoffvolumens in der Struktur führt, das gesamte Strukturvolumen jedoch konstant bleibt und somit die Porosität  $\epsilon$  zunimmt. Eine steigende Porosität hat, nach Abbildung 3.35, eine Verringerung der Festigkeit der Struktur zur Folge. Auch dies würde dafür sprechen, dass die Anzahl abgelöster Agglomerate in Versuchen mit Reaktion höher sein sollte als in Versuchen ohne Reaktion.

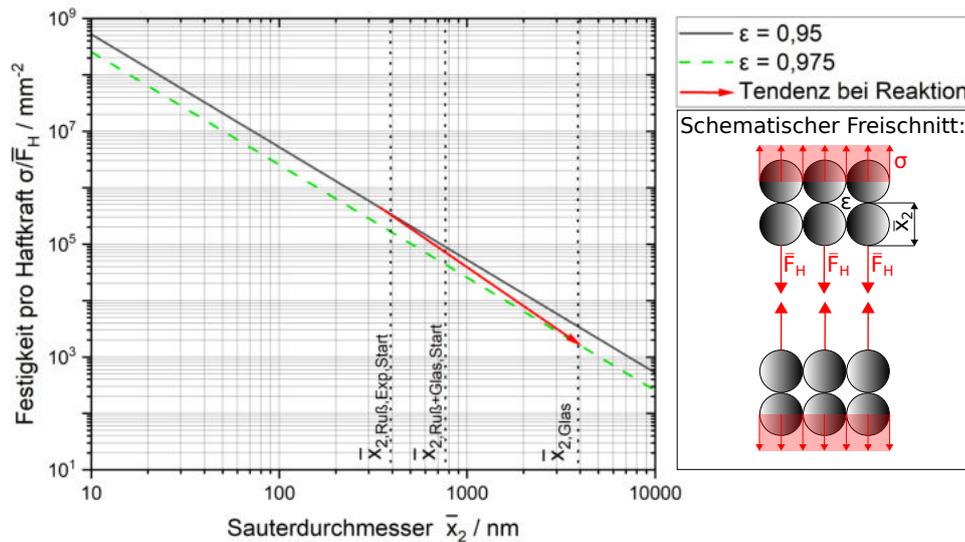


Abbildung 3.35: Auf die mittlere Haftkraft einer Kontaktstelle bezogene Festigkeit der Partikelstruktur, für unterschiedliche Sauterdurchmesser  $\bar{x}_2$  der Partikeln in der Struktur und unterschiedliche Porositäten. Der rote Pfeil zeigt vom Anfangszustand zum Endzustand bei der Verbrennung von Ruß.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der tatsächliche Aufbau und die Haftsituation in einer Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln weitaus komplexer ist als mit den vorgestellten einfachen Rechnungen analytisch beschrieben werden kann.

Zusammenfassend lässt sich die in den Experimenten beobachtete geringere Anzahl abgelöster Strukturen in Experimenten mit Reaktion / mit hoher Temperatur, im Vergleich zu Experimenten ohne Reaktion / mit geringer Temperatur nach den genannten Überlegungen und Rechnungen nur durch eine Erhöhung der Haftkraft begründen.

### 3.6 Untersuchungen der Übertragbarkeit der Erkenntnisse zur Ablösung auf Partikelstrukturen aus anderen Partikelmaterialien

Zur Untersuchung des Einflusses des reaktiven und des inerten Partikelmaterials auf die Ablösung werden die Partikelstrukturen aus Propanruß, Funkenruß, Carbon Black, Glaskugeln, Flugasche und Siliziumkarbid verwendet, deren Morphologie bereits in Kapitel 2.4 untersucht wurde. Die Bildung der Partikelstrukturen erfolgt analog zu Kapitel 2.4, allerdings ist die Beladungszeit bei allen Partikelmaterialien, außer Carbon Black, von einer Stunde auf zwei Stunden erhöht, um größere Partikelstrukturen und somit mehr und größere abgelöste Agglomerate zu erhalten. Um die Verformung und Umlagerung der verschiedenen Ruß-Arten bei der Reaktion besser beobachten zu können, werden die Untersuchungen nicht mit der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten

Apparatur durchgeführt. Zu diesem Zweck befindet sich die Faser mit Partikelstruktur bei dem Ablöseversuch unter einem Mikroskop (Wild M3C, Firma Leica Camera AG) und wird mit heißer Luft aus einem horizontalen Rohrofen (MTF 12/25/400, Firma Carbolite Gero GmbH & Co. KG) angeströmt. Da Carbon Black reaktionsträger ist als Propanruß, wird bei den Versuchen eine Temperatur von 528 bis 555°C verwendet, die am Ende der Beobachtungszeit durch Berühren der umströmten Faser mit einem Thermoelement ermittelt wird. Um Strömungsgeschwindigkeiten zu untersuchen, welche näher an in der Filtration üblichen Geschwindigkeiten liegen, aber dennoch Ablösevorgänge hervorrufen, wird eine mittlere Geschwindigkeit von ca. 0,8 m/s bei den Ablöseversuchen verwendet. Da in der Literatur [Jankowska et al., 2000] [Qian et al., 1997b] eine leichte Begünstigung der Ablösung dadurch festgestellt wurde, dass die Strömungsrichtung bei der Ablösung der Strömungsrichtung bei der Abscheidung entgegengesetzt ist, wird hier nun zusätzlich eine entgegengesetzte Strömungsrichtung verwendet.

Repräsentative Aufnahmen aus den Ablöseversuchen mit unterschiedlichen reaktiven Materialien sind in Abbildung 3.36 dargestellt. Die Zeitpunkte, für die Aufnahmen gezeigt werden, orientieren sich daran wann eine signifikante Änderung der Struktur zu erkennen ist. Die Partikelstruktur aus Propanruß wird dabei durch Oxidation kontinuierlich kleiner, ohne dass ein Ablösevorgang erkennbar ist. Bei der Partikelstruktur aus Carbon Black ist ein Umlagerungsvorgang und die Ablösung eines großen Agglomerates zu beobachten. Auch bei Funkenruß kann die Ablösung beobachtet werden. Die Unterscheidung zwischen Ablösung und Umlagerung anhand von Videoaufnahmen ist nicht immer eindeutig wie in den hier gezeigten Fällen für Carbon Black und Funkenruß möglich. Abbildung 3.36 zeigt große Unterschiede bei der Ablösung unterschiedlicher reaktiver Materialien. Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass sich nicht nur das Partikelmaterial sondern auch die Morphologie der Partikelstrukturen unterscheidet.

Abbildung 3.37 zeigt analoge Ablöseversuche mit Propanruß und verschiedenen inerten Materialien. Bei der Kombination von Propanruß und Glaskugeln kann das Umklappen eines kleinen Strukturbestandteiles beobachtet werden. Alleine auf Basis der Betrachtung der Kontur von Partikelstruktur und Faser, würde das beobachtete Umklappen fälschlicherweise als Ablösen identifiziert werden. Eine abrupte Farbänderung der umliegenden Struktur gibt jedoch den Hinweis darauf, dass es sich nicht um Ablösung, sondern um Umklappen handelt. Dieses Beispiel zeigt, dass bei der Auswertung von Videoaufnahmen nicht immer eindeutig zwischen Umlagerung/Umkappen und Ablösung unterschieden werden kann. Auf dieser Aufnahme scheint der Propanruß trotz gleichzeitiger Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln eher im Bereich der Faser vorzufinden zu sein. Dieser Trend wurde in den Untersuchungen zur Morphologie der Partikelstruktur (siehe Abbildung 2.17) nicht gesehen, was vermutlich auf die verschiedenen Beleuchtungsmethoden zurückzuführen ist. In Abbildung 3.37 findet eher eine Durchlicht-Beleuchtung und in Abbildung 2.17 eine Aufsicht-Beleuchtung Anwendung. Aufgrund der Transparenz der Glaskugeln, sind bei der Durchlicht-Beleuchtung Bereiche größerer Schichtdicke und größerer

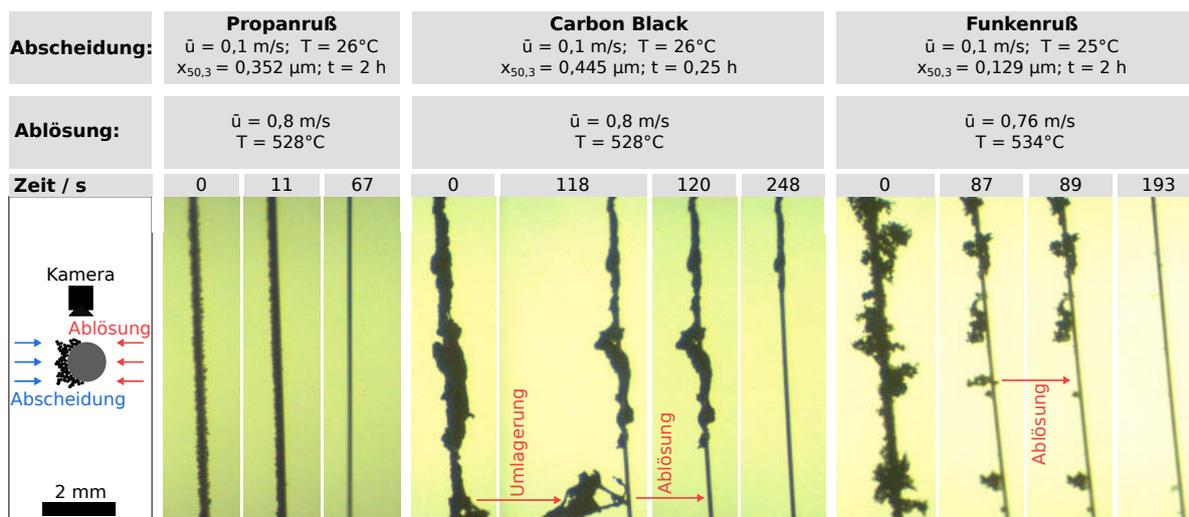


Abbildung 3.36: Anströmung von Partikelstrukturen aus verschiedenen reaktiven Materialien, auf einer 40 µm Stahlfaser, mit heißer Luft. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen.

Rußkonzentration dunkler. Beides liegt vermutlich im Fall von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln in der Nähe der Faser vor, da die Glaskugeln eher durch Trägheit an der Anströmseite der Partikelstruktur abgeschieden werden, während Propanruß durch Diffusion auch vermehrt an den Seiten der Partikelstruktur abgeschieden werden kann. Bei der Anströmung mit heißer Luft oxidiert der Ruß, wodurch die Struktur heller und transparenter wird. In dem Ablöseversuch mit Propanruß und Flugasche ist keine Ablösung, Umlagerung oder Reaktion zu erkennen. Es ist möglich, dass der Propanruß oxidiert, aber aufgrund der Farbe und Transparenz der Flugasche keine Änderung der Struktur ersichtlich ist. Eine weitere mögliche Erklärung ist eine Inhibition der Oxidation von Propanruß durch die Flugasche oder eine bessere Wärmeabfuhr. Der Ablöseversuch mit Propanruß und Siliziumkarbid zeigt eine Veränderung der Struktur durch die Oxidation von Propanruß. Es ist kein eindeutiger Ablösevorgang zu erkennen.

Eine quantitative Auswertung von Videoaufnahmen der in den Abbildungen 3.36 und 3.37 gezeigten Versuche ist über die Projektionsfläche von Faser und Partikelstruktur möglich. Die Bestimmung der Projektionsfläche erfolgt dabei analog wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben. Abbildung 3.38 zeigt die Projektionsflächen über der Zeit des Ablöseversuches.

Der Start der Anströmung findet im Zeitbereich von 10 bis 25 Sekunden statt und ist mit Umlagerungsvorgängen der Struktur, wie z.B. dem Ausrichten der Struktur und dem Umklappen von Dendriten in Strömungsrichtung verbunden. Es folgt eine Abnahme der Projektionsfläche durch die Oxidation des reaktiven Materials. Diese Abnahme ist bei Partikelstrukturen ohne Inertmaterial stärker ausgeprägt, da die ganze Partikelstruktur verbrennen kann. Die Änderungsrate der Projektionsfläche kann zur Abschätzung der Reaktionsgeschwindigkeit verwendet werden.

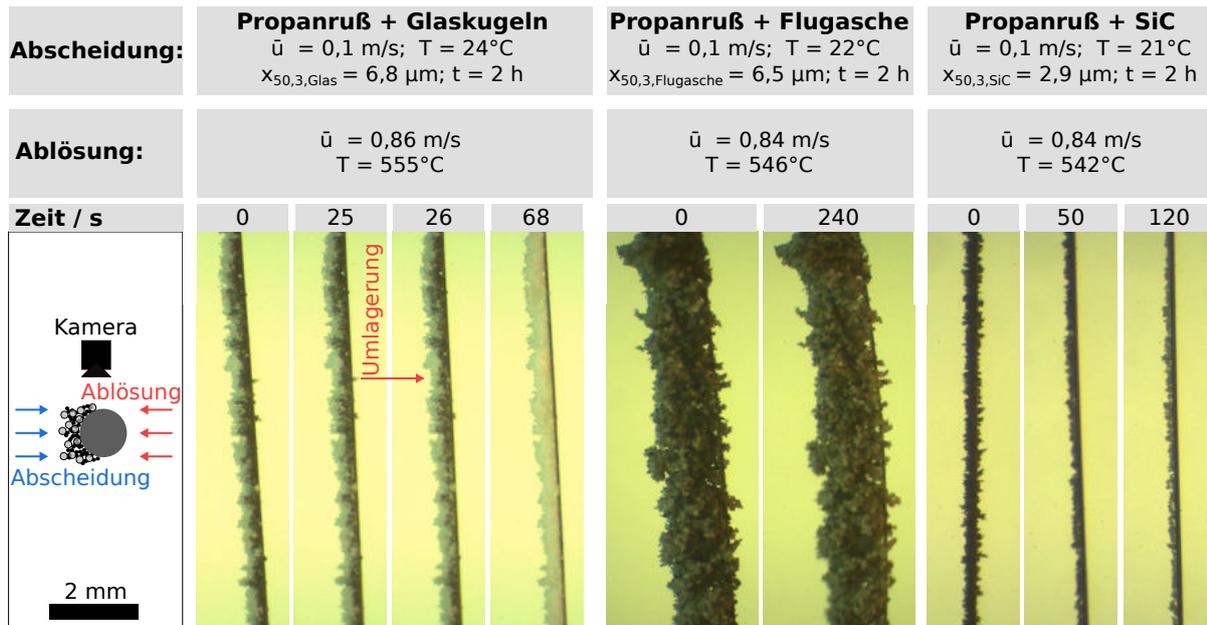


Abbildung 3.37: Anströmung von Partikelstrukturen aus Propanruß und verschiedenen inerten Materialien, auf einer  $40 \text{ }\mu\text{m}$  Stahlfaser, mit heißer Luft. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen.

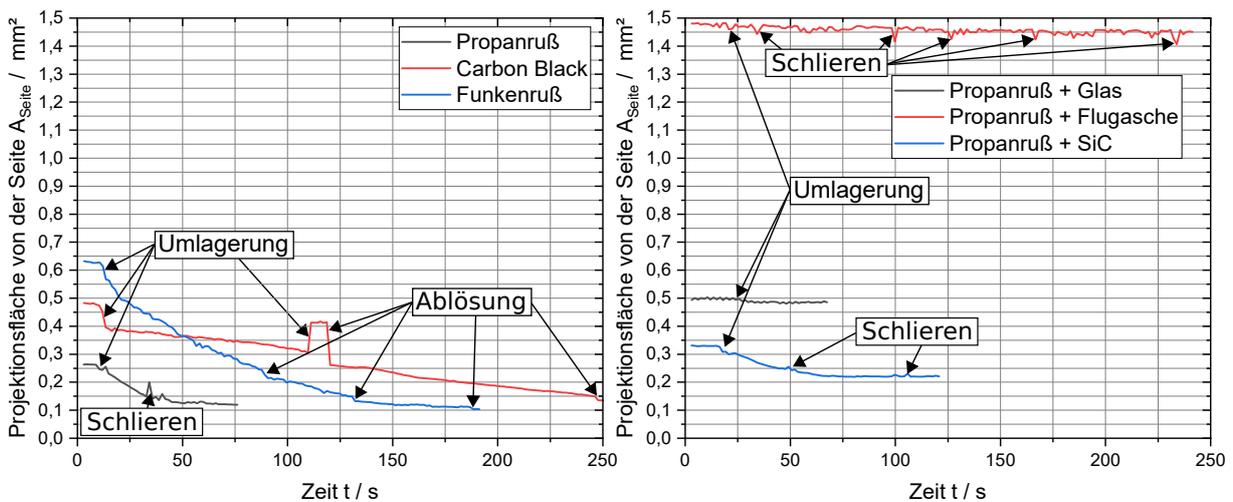


Abbildung 3.38: Projektionsflächen der in den Abbildungen 3.36 und 3.37 dargestellten Fasern mit Partikelstruktur, über der Zeit des Ablöseversuchs. Die Identifikation von Umlagerung, Ablösung und Schlieren findet über visuelle Auswertung des Videomaterials statt.

Bei Propanruß beträgt die mittlere Änderungsrate der Projektionsfläche in der Zeit von 20 bis 30 Sekunden  $-4500 \text{ }\mu\text{m}^2/\text{s}$ , bei Carbon Black  $-768 \text{ }\mu\text{m}^2/\text{s}$  in der Zeit von 20 bis 100 Sekunden und bei Funkenruß  $-4440 \text{ }\mu\text{m}^2/\text{s}$  in der Zeit von 25 bis 50 Sekunden. Ergebnisse von Hagen et al. zeigen, dass verschiedene Arten von Carbon Black eher eine geringe Reaktivität haben, Funkenruß je nach Bildungsbedingungen tendenziell eine hohe Reaktivität aufweist und typische Verbrennungsruße wie der aus einer Acetylenflamme oder aus der Verbrennung von Diesel eher

eine mittlere bis hohe Reaktivität [Hagen et al., 2021]. Die ermittelten Änderungsraten der Projektionsflächen passen somit zu der von Hagen et al. bestimmten Reaktivität. Es sei darauf hingewiesen, dass die Änderungsrate der Projektionsfläche neben der Reaktivität des Rußes auch von der Temperatur, sowie dem Wärme- und Stofftransport abhängt. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Reaktivität/ der Änderungsrate der Projektionsfläche und der Ablösung kann anhand dieser Ergebnisse nicht gefunden werden, da sowohl bei hoher (Funkenruß) als auch bei niedriger (Carbon Black) Reaktivität Ablösevorgänge beobachtet werden können und bei ähnlicher Reaktivität (Propanruß und Funkenruß) im einen Fall Ablösevorgänge auftreten und im anderen nicht. Da die Ablösung und auch die Umlagerung meist unmittelbar und schnell auftritt (siehe Abbildung 3.38), sobald die dafür notwendige Strömungswiderstandskraft erreicht oder die Struktur ausreichend geschwächt ist, wird vermutet, dass die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Ablösung meist eine untergeordnete Rolle spielt. Während der Reaktion wird die Projektionsfläche zusätzlich von Schlieren und Ablösevorgängen verändert. Schlieren treten aufgrund des heißen Luftstrahles auf, mit welchem die Partikelstruktur angeströmt wird und führen zu unscharfen und schwankenden Bildern. Ein abrupter Abfall der Projektionsfläche kann ein Hinweis auf eine Ablösung sein. Aufgrund der Schlieren und der Umlagerungsvorgänge ist für die Identifikation eines Ablösevorganges jedoch eine genaue Betrachtung der Videoaufnahme notwendig. Wie am Beispiel des vorgestellten Versuchs mit Propanruß und Glaskugeln ersichtlich wird, ist die Betrachtung der Videoaufnahme aber nicht immer hinreichend um eine Ablösung von einer Umlagerung zu unterscheiden. In dem Versuch mit Carbon Black ist eine starke Zunahme der Projektionsfläche bei 110 Sekunden zu erkennen, deren Ursache die Umlagerung der Partikelstruktur ist, welche in Abbildung 3.36 dargestellt wurde.

Um die Ursache für das unterschiedliche Ablöseverhalten der verschiedenen reaktiven Materialien weiter zu untersuchen, sind in Abbildung 3.39 REM-Aufnahmen der Materialien gezeigt. Die aus den Aufnahmen abgeschätzten mittleren Primärpartikeldurchmesser  $\bar{x}_{0,prim}$  und die gemessenen volumengewichteten Medianwerte der Äquivalentdurchmesser, der bei der Abscheidung aufgegebenen Agglomerate  $x_{50,3}$ , sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst. Da bei Funkenruß und Carbon Black Ablösevorgänge beobachtet werden konnten, aber nicht bei Propanruß, dessen volumengewichteter Mediandurchmesser der Agglomerate  $x_{50,3}$  zwischen denen von Funkenruß und Carbon Black liegt, kann kein eindeutiger Einfluss der Größe, der bei der Abscheidung aufgegebenen Agglomerate, auf die Ablösung festgestellt werden. Propanruß weist die kleinste Größe an Primärpartikeln  $\bar{x}_{0,prim}$  auf und zeigt als einziges reaktives Material bei den untersuchten Bedingungen keine Ablösevorgänge. Da jedoch die Primärpartikeln von Funkenruß ebenfalls wesentlich kleiner sind als die Primärpartikeln von Carbon Black und bei Funkenruß die Ablösevorgänge auch erst nach einer gewissen Zeit der Oxidation auftreten, nach der die Primärpartikeln vermutlich auch an Größe verloren haben, ist auch kein eindeutiger Einfluss der Größe der Primärpartikeln auf die Ablösung zu erkennen. Anhand der vorliegenden Daten kann somit kein Einfluss der Dispersität des reaktiven Partikelmaterials auf seine Ablösung von einer einzelnen

Faser festgestellt werden.

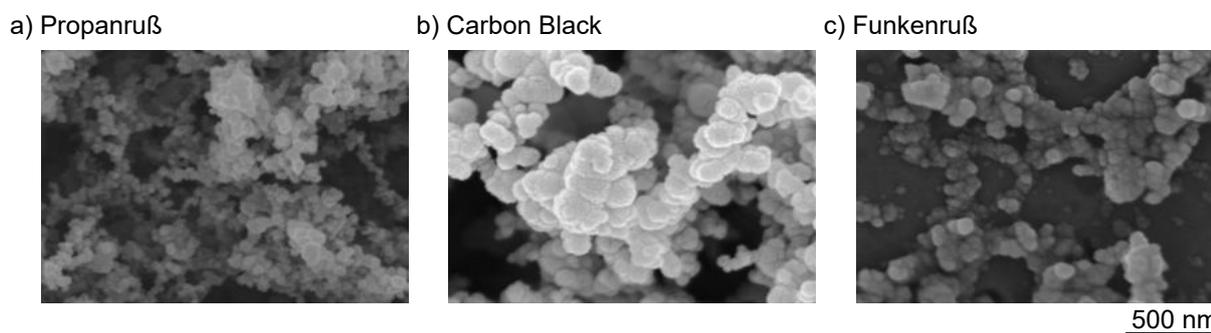


Abbildung 3.39: REM-Aufnahmen von auf einem Quarzfaserfilter abgeschiedenen Propanruß (a) und Carbon Black (b), sowie von auf einer Nucleopore-Membran abgeschiedenem Funkenruß (c).

Tabelle 3.6: Anzahlgewichteter Median des projektionsflächenäquivalenten Primärpartikeldurchmessers und des Äquivalentdurchmessers gleicher elektrischer Mobilität der Agglomerate für die verschiedenen reaktiven Materialien.

Material	Primärpartikel $x_{50,0}$ / nm	Agglomerate $x_{50,0}$ / nm
Propanruß	45	158
Carbon Black	114	215
Funkenruß	62	76

Neben der Größe der Agglomerate und Primärpartikeln der Reaktivpartikeln unterscheiden sich weitere Parameter, wie die chemische Zusammensetzung, die Nanostruktur, die Oberflächenbeschaffenheit und die Morphologie der abgeschiedenen Partikelstruktur bei den in Abbildung 3.36 beobachteten Ablöse- und Umlagerungsvorgängen verschiedener Ruß-Arten. Aufgrund dieser vielen Unterschiede kann mit den vorliegenden Daten keine eindeutige Ursache für die unterschiedlichen beobachteten Vorgänge gefunden werden. Es wird vermutet, dass das unterschiedliche Ablöseverhalten der verschiedenen reaktiven Materialien hauptsächlich auf die Haftkräfte und ihre Änderung bei der Reaktion zurückzuführen ist. Der Grund für diese Vermutung ist zum einen, dass wie in der Literaturübersicht zu nicht reaktiven Ablösevorgängen in Kapitel 3.1.1 dargestellt, die Haftkräfte einen signifikanten Einfluss auf die Ablösung haben. Zum anderen können sich Haftkräfte stark ändern, wenn sich die Oberflächeneigenschaften an den Kontaktstellen ändern (vergleiche Kapitel 3.1.2), was bei den unterschiedlichen Mechanismen bei der Verbrennung von Ruß, die in Kapitel 3.1.3 vorgestellt wurden, wahrscheinlich der Fall ist. Gestützt wird diese Vermutung durch das von Sappok et al. beobachtete Abschälen eines Filterkuchens, der sich bei der Oxidation und ohne jegliche äußere Kräfte, wie zum Beispiel Strömungskräfte, von selbst verformt [Sappok et al., 2013].

### 3.7 Fazit zur Ablösung von Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln

Die Kenntniss der Bedingungen, unter welchen sich auf Filterfasern abgeschiedene Strukturen wieder ablösen, ermöglicht es die Ablösung gezielt zu vermeiden, um beispielsweise die Emissionen des Filters zu verringern, oder die Ablösung im Zuge der Regeneration/Reinigung des Filters gezielt herbeizuführen. In der Literatur wurde vor dieser Arbeit nur von Ablöse-Untersuchungen nicht reaktiver Partikelstrukturen von zylindrischen Kollektoren berichtet. In diesem Kapitel wurde deshalb die Ablösung von Partikelstrukturen aus reaktiven und inerten Partikeln von einer einzelnen 40 µm Stahlfaser untersucht. Hierfür wurden Partikelstrukturen unterschiedlicher Größe, unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, unterschiedliche Materialien und unterschiedliche Temperaturen verwendet. Hohe Temperaturen führen dabei zu einer Reaktion (Oxidation/Verbrennung) des reaktiven Partikelmaterials und damit zum Verschwinden von Bestandteilen aus der Partikelstruktur.

Zur Untersuchung des Einflusses der Größe der abgeschiedenen Partikelstruktur, der Strömungsgeschwindigkeit bei der Ablösung und der Reaktion, auf die Ablösung, wurden Partikelstrukturen aus Propanruß ( $x_{50,3} = 461 \text{ nm}$ ) und Glaskugeln ( $x_{50,3} = 5,5 \text{ µm}$ ) verwendet. Die Partikelstrukturen wurden durch gleichzeitige Abscheidung beider Komponenten bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit stromaufwärts der Faser von 0,4 m/s gebildet. Es wurden zwei verschiedene Beladungszustände realisiert. Bei niedriger Beladung wurden ca. 0,02 mg Propanruß und 0,04 mg Glaskugeln pro  $\text{mm}^2$  durchströmter Querschnittsfläche und bei hoher Beladung ca. 0,22 mg Propanruß und 0,26 mg Glaskugeln pro  $\text{mm}^2$  durchströmter Querschnittsfläche zugegeben. Die Untersuchung der Ablösung mit den Strukturen der verschiedenen Beladungszustände erfolgte jeweils bei niedriger (0,65 m/s) und hoher (2,5 m/s) Strömungsgeschwindigkeit, sowie niedriger (ca. 20°C) und hoher (ca. 400°C) Temperatur. Die Richtung der äußeren Strömung war bei der Abscheidung und der Ablösung identisch. Dabei konnte Folgendes bei den untersuchten Bedingungen festgestellt werden:

- In Versuchen mit geringer Temperatur und hoher Strömungsgeschwindigkeit konnten 2 bis 28 Agglomerate, bei Versuchen mit geringer Beladung der Faser und 20 bis 60 Agglomerate bei hoher Beladung der Faser, auf dem Auffangfilter gefunden werden. Unter diesen Bedingungen führt eine höhere Beladung somit zu mehr Ablösungen.
- Bei geringer Temperatur und hoher Beladung wurden bei Versuchen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit 20 bis 60 abgelöste Agglomerate und bei Versuchen mit geringer Strömungsgeschwindigkeit 3 bis 7 abgelöste Agglomerate entdeckt. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit führt in diesem Fall zu mehr Ablösungen.
- Ein Vergleich der Versuche bei hoher Beladung und hoher Strömungsgeschwindigkeit zeigt, dass sich bei erhöhter Temperatur und der mit dieser verbundenen Reaktion 3 bis

15 Agglomerate ablösen, wohingegen sich bei geringer Temperatur 20 bis 60 Agglomerate ablösen. Die hohe Temperatur und Reaktion wirkt damit, bei den untersuchten Bedingungen, der Ablösung entgegen.

- Bei allen untersuchten Bedingungen ändert sich während des Ablöseversuches die Größe der per Kamera beobachteten Partikelstruktur nicht erkennbar, was zeigt, dass der Großteil der Partikelstrukturen an der Faser haften bleibt.

Der Einfluss der Beladung und der Strömungsgeschwindigkeit konnte über die Strömungswiderstandskraft erklärt werden. Eine eindeutige Ursache, für den Einfluss der Reaktion/Temperatur auf die Ablösung, konnte nicht gefunden werden. Der Einfluss der Partikelmaterialien auf die Ablösung wurde mit Propanruß ( $x_{50,3} = 461$  nm), Carbon Black ( $x_{50,3} = 445$  nm), Funkenruß ( $x_{50,3} = 129$  nm), als reaktive/brennbare Materialien und Glaskugeln ( $x_{50,3} = 5,5$   $\mu$ m), Flugasche ( $x_{50,3} = 6,5$   $\mu$ m) und Siliziumkarbid ( $x_{50,3} = 2,9$   $\mu$ m), als inerte Materialien untersucht. Bei der Anströmung von Partikelstrukturen aus Carbon Black oder Funkenruß auf einer einzelnen Faser mit heißer Luft, fanden ausgeprägtere Umlagerungsvorgänge und mehr Ablösungen statt als bei Partikelstrukturen aus Propanruß.

Für die Durchführung der genannten Untersuchungen wurden neue Messmethoden entwickelt. Es fanden drei verschiedene Methoden Anwendung:

- Ein Laserband-Streulichtpartikelmessgerät (LLS-OPC) wurde, zur Messung abgelöster Partikelstrukturen bei hoher Temperatur und bei gleichzeitiger Beleuchtung der Messkammer für Videoaufnahmen, entwickelt und kalibriert. Der Einfluss der Temperatur, der Beleuchtung und in der Messkammer vorhandener Fasern, auf das Messsignal lag innerhalb der Standardabweichung des Messsignals und kann damit vernachlässigt werden. Das Messsignal der für die Kalibrierung verwendeten Steinkohlepartikeln lag bei gleichem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser bis zu einer Größenordnung unter dem Messsignal von Glaskugeln, was zeigt, dass sich unterschiedliche optische Eigenschaften der Partikeln stark auf die mit dieser Methode bestimmte Partikelgröße auswirken können. Aufgrund der nicht sphärischen Form abgelöster Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln und ihrer Oberfläche, welche aus Partikelmaterialien mit stark unterschiedlichen optischen Eigenschaften besteht, kann die Größe abgelöster Partikelstrukturen mit dieser Messtechnik nur grob abgeschätzt werden. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass alle bei der Parameterstudie abgelösten Partikelstrukturen unter der Messgrenze des LLS-OPC liegen. Die untere Messgrenze des LLS-OPC liegt bei 256  $\mu$ m für Glaskugeln und 372  $\mu$ m für Steinkohlepartikeln.
- Das Auffangen und anschließende Analysieren abgelöster Partikelstrukturen auf einem Filter. Diese Methode wurde zur Bestimmung der Größe und Anzahl abgelöster Partikelstrukturen verwendet, ist jedoch fehleranfällig aufgrund von Verschmutzungen des

Filters durch fremde Partikeln und eines geringen Kontrastes zwischen Filtermedium und Glaskugeln.

- Das Filmen der Partikelstruktur bei der Ablösung mit einer Kamera und die anschließende Bildauswertung anhand der Projektionsfläche von Partikelstruktur und Faser. Diese Methode eignet sich besonders um die Umlagerungsvorgänge der Partikelstruktur auf der Faser zu untersuchen, kann jedoch nicht immer eindeutig zwischen Ablösung und Umlagerung unterscheiden.

Neben diesen Messmethoden wurde eine Apparatur zur Erzeugung heißer Luftstrahlen entwickelt und charakterisiert, die zur Anströmung in den Ablöseversuchen dient.

## 4 Zusammenfassung

Bei dem Betrieb von Filtern zur Abgasreinigung ist die Morphologie abgeschiedener Partikelstrukturen [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012] und die Möglichkeit der Reinigung/Regeneration des Filters durch Ablösung abgeschiedener Partikelstrukturen [Sappok et al., 2013] von Relevanz für den Abscheidegrad, den Energieverbrauch und die Standzeit des Filters. Dies kann auch in anderen Anwendungen, wie beispielsweise bei Wärmetauschern [Dai et al., 2013] oder Reaktoren [Salgansky et al., 2017] der Fall sein, in denen sich Partikelstrukturen auf zylindrischen Kollektoren ablagern. Obwohl Aerosole in technischen Anwendungen mehrere Partikelmaterialien, wie z.B. Ruß und Asche enthalten können [Wang et al., 2020] [Ghidossi et al., 2009], wurde die Morphologie und die Ablösung von Partikelstrukturen auf einzelnen Filterfasern bisher nur mit jeweils einem Partikelmaterial untersucht [Kanaoka et al., 1986] [Kasper et al., 2010] [Löffler, 1972]. Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb die Morphologie von Partikelstrukturen aus mehreren Partikelmaterialien und Partikelgrößen, sowie ihre Ablösung von der Faser durch Anströmung zu untersuchen. Insbesondere sollte bei der Ablösung der Einfluss der Reaktion einer reaktiven Komponente der Partikelstruktur, die durch die Reaktion in gasförmige Produkte verwandelt wird, bestimmt werden.

Die Morphologie von auf Filterfasern abgeschiedenen Partikelstrukturen ist von besonderem Interesse, da die Strukturen als zusätzliche Kollektoren wirken, welche den Abscheidegrad und den Druckverlust beeinflussen [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012]. Aus diesem Grund wurde die Morphologie im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2) näher untersucht. Zur Bildung der Partikelstrukturen wurden mit einem Rußgenerator, einem Feststoffdispersiergerät und einem Funken-generator verschiedene Aerosole erzeugt, charakterisiert und die Partikel auf einer einzelnen Stahlfaser mit einem Durchmesser von 40 µm, 150 µm oder 1200 µm abgeschieden. Die dabei verwendeten Partikelmaterialien sind Propanruß ( $x_{50,3} = 325$  bis 461 nm), Carbon Black ( $x_{50,3} = 445$  nm), Funkenruß ( $x_{50,3} = 129$  nm), Glas ( $x_{50,3} = 5,5$  bis 11,0 µm), Flugasche ( $x_{50,3} = 6,5$  µm) und Siliziumkarbid ( $x_{50,3} = 2,9$  µm). Diese Materialien wurden im Hinblick auf die Ablöseuntersuchungen ausgewählt, in denen verschiedene Kohlenstoff-basierte Materialien unterschiedlicher Reaktivität und verschiedene inerte Materialien mit unterschiedlichen Schmelzpunkten und Partikelgrößenverteilungen von Interesse sind. Bei der Abscheidung wurden verschiedene lokale Strömungsgeschwindigkeiten von 0,06 m/s, 0,2 m/s, 0,6 m/s, 0,8 m/s und 1,4 m/s verwendet. Aerosole die unterschiedliche Partikelmaterialien enthalten wurden dabei durch Mischung von Aerosolen die nur ein Partikelmaterial enthalten erzeugt. Insbesondere wurden Mischungen aus Propanruß und verschiedenen, gegen oxidative Bedingungen inerte, Partikelmaterialien verwendet. Die Untersuchung der Morphologie abgeschiedener Partikelstrukturen erfolgte durch Lichtmikroskopie und anschließende Bildanalyse.

Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass bei der Abscheidung von Partikeln eines einzigen Materials Partikelstrukturen auf der Faser entstehen, deren Morphologie gut anhand dimensionsloser Kennzahlen und den Angaben aus der Literatur vorhergesagt werden konnte. Die simultane Abscheidung zweier verschiedener Partikelmaterialien mit unterschiedlicher Partikelgrößenverteilung resultiert jedoch in Partikelstrukturen, deren Morphologie nicht anhand der gängigen dimensionslosen Kennzahlen vorhergesagt werden kann. Dabei zeigte sich, dass sich unterschiedliche Partikelmaterialien bei der Abscheidung gegenseitig beeinflussen können. So vermindert beispielsweise Propanruß und die mit seiner Erzeugung verbundene Feuchte, das Abprallen großer Glaskugeln ( $x_{50,3} = 11,0 \mu\text{m}$ ) von der Faser und ermöglicht damit deren Abscheidung, die bei der gleichen lokalen Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s ohne den Propanruß nicht möglich ist. Auch bei der konsekutiven Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln führen die zuerst gebildeten Ruß-Dendriten zu einer besseren Abscheidung der Glaskugeln, die auf der Anströmseite der Ruß-Dendriten abgeschieden werden. Im umgekehrten Fall bilden sich Ruß-Dendriten auf der Partikelstruktur aus Glaskugeln. Allgemein sind Partikelstrukturen aus der simultanen Abscheidung von Propanruß und den verschiedenen untersuchten inerten Materialien wesentlich größer, als anhand der Partikelstrukturen der einzelnen Komponenten erwartet werden würde. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s und einer Beladungszeit von einer Stunde beträgt beispielsweise die Projektionsfläche von Faser und Partikelstruktur in Strömungsrichtung und innerhalb des betrachteten Faserabschnittes  $0,0975 \text{ mm}^2$  bei Propanruß,  $0,0631 \text{ mm}^2$  bei Glaskugeln und  $0,324 \text{ mm}^2$  bei gleichzeitiger Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln.

Die Ablösung von auf einer Faser abgeschiedenen Partikelstrukturen kann erwünscht sein, um eine Reinigung/Regeneration des Filters zu erzielen, kann jedoch auch zu ungewollter Steigerung der Partikelemmissionen des Filters führen. Die Kenntnis der Bedingungen, welche die Ablösung begünstigen, kann somit gezielt verwendet werden, um diese herbeizuführen oder zu unterdrücken. In keramischen Wandstromfiltern zur Abgasreinigung wird beispielsweise zur Regeneration die Temperatur gesteigert, um eine Oxidation/Verbrennung von abgeschiedenem Ruß herbei zu führen. Bei diesen Bedingungen nicht brennbare/ inerte Partikeln können sich dabei vom Filter ablösen und umlagern. Dieser Vorgang wurde bisher nur bei den Strömungsbedingungen von Wandstromfiltern [Sappok et al., 2013], die einer überströmten Platte entsprechen, und nicht bei den Strömungsbedingungen von faserigen Tiefenfiltern, die sich besser mit einem umströmten Zylinder beschreiben lassen, untersucht. Aus diesem Grund wurde die Ablösung reaktiv-inerter Partikelstrukturen im zweiten Teil dieser Arbeit (Kapitel 3) untersucht. Dafür dienten die in Kapitel 2 gebildeten Partikelstrukturen. Es wurde eine Apparatur entwickelt und kalibriert, mit der temperierte Luftstrahlen zur Ablösung erzeugt, die Partikelstruktur auf der Faser beobachtet, abgelöste Partikelstrukturen mit einer Laserband-Streulichtmesstechnik detektiert und über das Auffangen auf einem Filter weiter analysiert werden können.

Bei Partikelstrukturen aus Propanruß ( $x_{50,3} = 461 \text{ nm}$ ) und Glaskugeln ( $x_{50,3} = 5.5 \text{ }\mu\text{m}$ ) wurde der Einfluss der Beladung einer  $40 \text{ }\mu\text{m}$  Faser mit Partikelmaterial, der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperatur, sowie der mit erhöhter Temperatur verbundenen Reaktion, auf die Ablösung untersucht. Dabei wurden zwei unterschiedliche Faserbeladungen, welche aus der Aufgabe von entweder ca.  $0,05$  oder  $0,5 \text{ mg}$  Partikelmaterial pro  $\text{mm}^2$  durchströmten Querschnitt resultieren, zwei verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten bei der Ablösung von  $0,65$  und  $2,5 \text{ m/s}$  zwei Temperaturstufen von ca.  $20$  und  $400^\circ\text{C}$  und ein Faserdurchmesser von  $40 \text{ }\mu\text{m}$  verwendet. Im untersuchten Parameterbereich wurde festgestellt, dass eine größere Partikelstruktur und eine höhere Strömungsgeschwindigkeit, zu einer höheren Anzahl und Größe abgelöster Strukturen führt. Dies wurde theoretisch auf die damit verbundene größere Strömungswiderstandskraft zurückgeführt. Die Reaktion und die damit verbundene hohe Temperatur, resultierte in einer geringeren Anzahl und Größe abgelöster Partikelstrukturen. Beispielsweise wurden bei hoher Strömungsgeschwindigkeit ( $2,5 \text{ m/s}$ ) und Faserbeladung ( $0,5 \text{ mg/mm}^2$  an aufgegebenem Partikelmaterial) selbst bei dem Versuch ohne Reaktion mit der geringsten Anzahl abgelöster Partikelstrukturen ( $20$  Stück) mehr Partikelstrukturen mit einem größerem aus dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser berechneten Gesamtvolumen ( $0,0024 \text{ mm}^3$ ) abgelöst als in dem entsprechenden Versuch mit Reaktion, in dem sich die meisten Partikelstrukturen abgelöst haben ( $15$  Stück mit  $0,0001 \text{ mm}^3$ ). Es wird vermutet, dass dies auf einer Änderung der Haftkräfte durch die Temperatur beruht, was jedoch nicht eindeutig belegt werden konnte. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass auch bei der Anströmung von ca.  $300 \text{ }\mu\text{m}$  breiten Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln, auf einer  $40 \text{ }\mu\text{m}$  Stahlfaser, mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $2,5 \text{ m/s}$ , der Großteil der Struktur auf der Faser haften bleibt, unabhängig davon, ob eine Reaktion stattfindet oder nicht.

Untersuchungen zum Einfluss des Partikelmaterials auf die Ablösung mit gleichzeitiger Reaktion wurden mit Propanruß, Carbon Black, Funkenruß und Mischungen aus Propanruß mit Glaskugeln, Flugasche und Siliziumkarbid durchgeführt. Insbesondere zeigten sich hierbei große Unterschiede in den Umlagerungs- und Ablösevorgängen der verschiedenen reaktiven Materialien. So wurden bei Partikelstrukturen aus Carbon Black oder Funkenruß bereits bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $0,8 \text{ m/s}$  Ablösevorgänge beobachtet, was bei Partikelstrukturen aus Propanruß nicht der Fall war. Mögliche zukünftige Arbeiten könnten sich daher vertiefend damit beschäftigen, welche Ursachen die unterschiedlichen Umlagerungs- und Ablösevorgänge verschiedener reaktiver Materialien bei der Reaktion haben. Insbesondere sollte dafür die Änderung der Haftkräfte durch die Reaktion und durch die Temperatur näher untersucht werden. Das dabei gewonnene Wissen könnte dafür verwendet werden die Regeneration von faserigen Filtern durch Reaktion und Ablösung zu verbessern.

## 5 Summary

During the operation of filters for exhaust gas treatment the morphology of deposited particle structures [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012] and the possibility of filter cleaning/regeneration by detachment of deposited particle structures [Sappok et al., 2013] are relevant for filtration efficiency, energy consumption and lifetime of the filter. This could also be of interest regarding other applications like heat exchangers [Dai et al., 2013] or reactors [Salgansky et al., 2017], if particle structures deposit on cylindrical collectors in these applications. Although aerosols in technical applications can consist of particles of several different materials at once, for example soot and ash [Wang et al., 2020] [Ghidossi et al., 2009], the morphology and detachment of particle structures on single filter fibres was previously only investigated using single particle materials [Kanaoka et al., 1986] [Kasper et al., 2010] [Löffler, 1972]. Therefore, the purpose of this thesis is the investigation of particle structures, which are deposited on single fibres and consist of several particle materials. The experimental study reveals the morphology of the particle structures and the detachment of those structures by flow. Of special interest is the influence of a component of the particle structure, which reacts to gaseous products, and therefore vanishes out of the particle structure, on the detachment of the particle structure.

The particular morphology of particle structures deposited on filter fibres is of interest, because the form and shape of those structures determine how much they act as an additional collector. This in turn influences the particle deposition efficiency and pressure loss of the filter [Hosseini und Vahedi Tafreshi, 2012]. For this reason the morphology is investigated in the first part of this thesis (chapter 2). In this investigation particle structures are produced by generation of aerosols using a soot generator, a solid particle disperser and a spark generator. The particles from these aerosols are deposited on single steel fibres of 40  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  or 1200  $\mu\text{m}$  diameter. Used particle materials are propane soot ( $x_{50,3} = 325$  to 461 nm), carbon black ( $x_{50,3} = 445$  nm), spark discharge soot ( $x_{50,3} = 129$  nm), glass ( $x_{50,3} = 5.5$  to 11.0  $\mu\text{m}$ ), fly ash ( $x_{50,3} = 6.5$   $\mu\text{m}$ ) and silicon carbide ( $x_{50,3} = 2.9$   $\mu\text{m}$ ). These particle materials were chosen with regard to the detachment investigations, in which carbon-based particles of different reactivities and inert particles with different melting points and size distributions are of interest. For particle deposition local flow velocities of 0.06 m/s, 0.2 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s and 1.4 m/s are used. Aerosols containing particles of several materials are produced by mixing aerosols, which contain only particles of a single material. Especially mixtures containing propane soot and different inert materials are used. The morphology of deposited particle structures is investigated using light microscopy and image analysis.

The investigations show, that the morphology of particle structures, built by deposition of particles of a single material, can be predicted using dimensionless quantities and results from literature.

However, the results show for the first time, that simultaneous deposition of two different particle types, consisting of different materials and with different particle size distributions, results in particle structures whose morphology can not be predicted by common dimensionless quantities. Such different particle types can influence each other during deposition. For example propane soot and the humidity, which is generated during the soot production, can reduce bounce off of big glass spheres ( $x_{50,3} = 11.0 \mu\text{m}$ ) and allow their deposition, which is not possible without the soot at the same local flow velocity of 0.2 m/s. During consecutive deposition of propane soot and glass spheres, the soot dendrites also enhance glass sphere deposition and the glass spheres are deposited on the upstream side of the soot dendrites. If the glass spheres are deposited first on the fibre and propane soot second, soot dendrites are formed on top of the glass sphere deposits. Generally, particle structures built by simultaneous deposition of soot and an inert component are larger than the sum of the particle structures build by deposition of the single components. For example, particle structures build at local flow velocities of 0.2 m/s, during 1 h of particle deposition, have a projection area in flow direction of 0.0975 mm<sup>2</sup> for propane soot, 0.0631 mm<sup>2</sup> for glass spheres and 0.324 mm<sup>2</sup> for simultaneously deposited propane soot and glass spheres.

Detachment of particle structures from a fibre can be desired for filter cleaning/regeneration but can also result in an undesired increase of particle emissions. Knowledge of conditions which favor detachment can be used to deliberately cause or prevent detachment. In soot particle wall flow filters for example the temperature can be deliberately increased for regeneration of the filter by oxidation of soot. During this process inert particles like ash can detach from the filter and rearrange. Investigations of this process are only reported using wall flow filters [Sappok et al., 2013], in which the flow conditions are similar to the flow above a plate. For fibrous depth filters, in which the flow conditions are better described as flow around a cylinder, no investigations about the detachment caused by reaction of a particle material are reported. For this reason the detachment of reactive-inert particle structures is investigated in the second part of this thesis (chapter 3). The used particle structures were characterized in the first part of this thesis. For this investigation an apparatus is developed and calibrated, which can produce hot air jets for particle structure detachment, record the particle structure during the process and detect detached particle structures using a laser-light-sheet technique and a collection filter.

The influence of the deposited particle structures size, the flow velocity, the temperature and the reaction of soot at high temperature, on the detachment of particle structures from a 40  $\mu\text{m}$  single fibre is investigated using particle structures consisting of propane soot ( $x_{50,3} = 461 \text{ nm}$ ) and glass spheres ( $x_{50,3} = 5.5 \mu\text{m}$ ). The two different sizes of the deposited particle structures result from exposing the fibre to around 0.05 or 0.5 mg of particles per mm<sup>2</sup> of area perpendicular to flow. The flow velocity during detachment investigation has values of 0.65 and 2.5 m/s and the used temperature levels are around 20 and 400°C. Under the investigated conditions, a higher flow velocity and a bigger initial particle structure results in a higher number and bigger size

of detached particle structures. This study discusses the relevant theory of drag forces in order to explain this. Detachment experiments with reaction at high temperature result in a smaller number and size of detached particle structures. For example at the high flow velocity (2.5 m/s) and with the initial big particle structure (built with 0.5 mg of particles per mm<sup>2</sup>) even the one single experiment of several experiments at low temperature/ without reaction with the lowest number of detached agglomerates, resulted in more detached agglomerates (20 pieces), with a bigger total volume of detached agglomerates (0.0024 mm<sup>3</sup>) than the equivalent experiment at high temperature/ with reaction and the highest number of detached agglomerates (15 pieces with a total volume of 0.0001 mm<sup>3</sup>). A plausible explanation for this result is an increase of adhesive forces of the particles in the structure with temperature, but this presumption could not be proved. Overall even with relatively big particle structures with a width of around 300 µm and with relatively high average flow velocities of 2.5 m/s, most of the particle structures adhere to the fibre independent of reaction.

The influence of the particle material on detachment with reaction at high temperature is investigated using propane soot, carbon black, spark discharge soot and mixtures of propane soot with glass spheres, fly ash and silicon carbide. Differences regarding detachment and rearrangement of the particle structures are observed for different reactive particle materials. Detachment is observed at average flow velocities of 0.8 m/s for particle structures consisting of carbon black or spark discharge soot but not for particle structures consisting of propane soot. Therefore possible future investigations should address the cause of this observed difference in detachment, which is assumed to be a different change of adhesion forces by temperature and reaction. This knowledge could be used to improve the regenerability/cleanability of filters by reaction and detachment of deposited particle structures.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Vereinfachte und schematische Darstellung der Mechanismen, die sich auf die Morphologie der Partikelstruktur auf einer Faser auswirken. Gezeigt ist jeweils ein Querschnitt der Faser mit Stromlinien (blau) um diese und die Aufgabepositionen (blau), Zwischen- (grau) und Endpositionen (schwarz) der Partikeln. . . . .	4
2.2	Morphologie von auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen, bei verschiedenen Stokes-Zahlen $St$ und Sperrereffekt-Parametern $R$ . Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	10
2.3	Schematische Darstellung der Apparatur zur Erzeugung eines Aerosols bestehend aus Propanruß und Glaskugeln in Luft und zur Abscheidung der Partikeln aus dem Aerosol auf einer einzelnen Faser (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]).	13
2.4	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung der Partikelgrößenverteilung mit dem SMPS (a) oder dem OPC (b) . . . . .	15
2.5	Schematische Darstellung der Position des Gravimetrie-Filters in der Apparatur, zur Bestimmung der Massenströme. . . . .	16
2.6	Schematische Darstellung der Analysetechnik zur Bestimmung der Massen an Wasser, Glas und Ruß aus einer auf einem Filter abgeschiedenen Mischung dieser drei Stoffe. . . . .	17
2.7	a) Zeigt den Faserhalter der in Kapitel 2 für die Untersuchung der Morphologie der Partikelstruktur verwendet wird und b) zeigt den Faserhalter, der in Kapitel 3 zur Untersuchung der Ablösung verwendet wird. Die Faser ist jeweils grün markiert und ihre freie Länge wird angegeben. . . . .	18
2.8	Schematische Darstellung der eingebauten Faserhalter aus Abbildung 2.7. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. . . . .	19
2.9	Nach [Hornbeck, 1964] berechnete Geschwindigkeitsprofile bei der Faser für unterschiedliche Rohrdurchmesser, Einlaufängen und mittlere Strömungsgeschwindigkeiten $\bar{u}$ . . . . .	20
2.10	(a) Projektionsflächen von Partikelstruktur und Faser bei Betrachtung in Strömungsrichtung $A_{Oben}$ (blau) und (b) bei Betrachtung senkrecht zur Strömungsrichtung $A_{Seite}$ (rot). Die Abbildung ist schematisch und nicht maßstabsgetreu. .	22

2.11	Aus jeweils vier Messungen mit dem SMPS gemittelte Partikelgrößenverteilungen von Propanruß für unterschiedliche Konfigurationen von Rohrdurchmesser, Einlaufänge und damit Verweilzeit. Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	24
2.12	Aus mindestens vier Messungen gemittelte Partikelgrößenverteilungen von Propanruß, Glaskugeln, und dem Mischerosol aus beiden Stoffen, zu unterschiedlichen Zeiten (a und b) im Projekt. Die Probenahme für die Messung erfolgte unmittelbar nach dem T-Stück der Aerosolerzeugung. Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	26
2.13	Aus mindestens 6 Messungen gemittelte Massenströme der festen oder flüssigen Komponenten des reaktiv-inerten Aerosols aus Propanruß und Glaskugeln am Projektanfang (a) und Projektende (b). Die Fehlerbalken entsprechen der empirischen Standardabweichung. . . . .	28
2.14	REM-Aufnahmen einer dispergierten und auf einer Nucleopore-Membran aufgefangenen Glaskugel (a) und eines Filterkuchens aus Propanruß auf einem Quarzfaserfilter (b). . . . .	29
2.15	Visualisierung der Konzentrationsverteilung an Partikeln über den durchströmten Querschnitt mit (a) Propanruß ohne Blende, (b) Propanruß mit Blende, (c) Glas ohne Blende, (d) Propanruß und Glaskugeln mit Blende. Aufgenommen wurden die Profile 25 cm nach dem Austritt aus dem Rußgenerator (a) und 30 cm stromabwärts des T-Stücks (b,c,d), jeweils bei einem Rohrdurchmesser von 25 mm.	30
2.16	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 6 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	32
2.17	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	33
2.18	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 57 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	33

- 2.19 Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 78 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. Im Gegensatz zu den anderen in diesem Kapitel gezeigten Partikelstrukturen wurde die Partikelstruktur bei 78 cm/s mit der Faserhalterung aus Abbildung 2.8 b) erzeugt. . . . . 34
- 2.20 Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde und zwei unterschiedliche Temperaturen und relative Feuchten. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . . 35
- 2.21 Partikelstruktur auf einer Faser nach simultaner oder konsekutiver Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln aus einem Aerosol bei 20 cm/s für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . . 36
- 2.22 Partikelstruktur auf einer Faser, auf welcher zuerst Propanruß und anschließend Glaskugeln, bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten, abgeschieden wurden. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . . 37
- 2.23 Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und/oder Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. In diesen Versuchen wurden größere Glaskugeln mit  $x_{50,3} = 11,0 \mu\text{m}$  und  $\sigma_{g,3} = 1,9$  verwendet. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. . . . . 38
- 2.24 Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde, bei unterschiedlichen Faserdurchmessern. Jede Skalierung gilt für alle Aufnahmen mit dem entsprechenden Faserdurchmesser. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts ( $d_{Faser} = 40 \mu\text{m}$  und  $d_{Faser} = 150 \mu\text{m}$ ) bzw. von oben nach unten ( $d_{Faser} = 1200 \mu\text{m}$ ). . . . . 39
- 2.25 Projektionsfläche in Strömungsrichtung  $A_{Oben}$  für verschiedene Partikelstrukturen aus Propanruß und / oder Glaskugeln, bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Beladungszeiten. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung an. . . . . 41

2.26	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, aus einem Aerosol bei 57 cm/s. Die Aufnahmen zeigen die selbe Stelle der Faser nach unterschiedlichen Beladungszeiten. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. . . . .	42
2.27	Morphologie von bei verschiedenen Stokes-Zahlen $St$ und Sperrereffekt-Parametern $R$ auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen. Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. Aus dieser Arbeit sind Partikelstrukturen aus Propanruß, Glas oder einer Mischung beider Materialien dargestellt. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	42
2.28	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß, Funkenruß oder Carbon Black, aus einem Aerosol bei 20 cm/s. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. . . . .	45
2.29	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Glaskugeln, Flugasche oder Siliziumkarbid, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. . . . .	46
2.30	Partikelstruktur auf einer Faser nach Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, Flugasche oder Siliziumkarbid, aus einem Aerosol bei 20 cm/s, für eine Stunde. Die Skalierung gilt für alle Aufnahmen. Bei der seitlichen Aufnahme ist die Strömung von links nach rechts. . . . .	47
2.31	Morphologie von bei verschiedenen Stokes-Zahlen $St$ und Sperrereffekt-Parametern $R$ auf einer Faser gebildeten Partikelstrukturen. Die Piktogramme symbolisieren einen Querschnitt der Faser mit Partikelstruktur. Aus dieser Arbeit sind Partikelstrukturen verschiedener reaktiver und inerte Materialien dargestellt. (modifiziert nach [Zoller et al., 2020b]) . . . . .	47
3.1	Schematische Darstellung des Aufbaus eines Ruß-Agglomerates basierend auf Angaben und Darstellungen von [Matti Maricq, 2007] [Mansurov, 2005] . . . . .	60
3.2	Schematischer Aufbau der Apparatur zur Untersuchung der Ablösung von Partikelstrukturen von einer einzelnen Faser . . . . .	62
3.3	Schematische Darstellung des Strahlengangs des LLS-OPC (grün) und der Positionen von Kamera und Beleuchtung (rot). Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. . . . .	64
3.4	Aufnahmen der Apparatur zur Untersuchung der Ablösung von Partikelstrukturen von einer Faser (a) und des Inneren der Kammer mit dem Faserhalter und der rot markierten Faser (b). (modifiziert nach [Zoller et al., 2022]) . . . . .	67

3.5	Aufbau zur Messung des Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils von heißen Luftstrahlen (a) und Aufnahme der Spitze des Prandtl-Rohres mit Thermoelement (b) . . . . .	69
3.6	Vertikaler (a) und horizontaler (b) Schnitt durch den Aufbau zur Überprüfung der Homogenität der Intensität des Laserbandes. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. . . . .	70
3.7	Glaskugeln und Steinkohlepartikeln zum Kalibrieren des LLS-OPC. Der angegebene Mediandurchmesser ist der projektionsflächenäquivalente Durchmesser. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen. . . . .	72
3.8	Aufbau zur Zugabe von Kalibrierpartikeln in die Messkammer zur Bestimmung von deren Streulichtsignal. Die Abbildung ist nicht maßstabsgetreu. . . . .	73
3.9	Schema der Methode zum Auffangen und analysieren abgelöster Partikelstrukturen auf einem Auffangfilter. . . . .	74
3.10	Temperaturverläufe eines Aufheizvorganges der beiden Heizungen ohne Durchströmung. . . . .	77
3.11	Stationäre Gastemperaturen am Düsenauslass und auf der Höhe der Fasern (10 mm vom Düsenauslass entfernt) bei verschiedenen Volumenströmen durch die Düse. . . . .	78
3.12	Geschwindigkeits- und Temperaturprofile von verschiedenen heißen Luftstrahlen, auf der Höhe der Faser (10 mm vom Düsenauslass entfernt), im stationären Fall.(modifiziert nach [Zoller et al., 2022]) . . . . .	79
3.13	Temperaturprofile der Luftstrahlen auf der Höhe der Faser (10 mm vom Düsenauslass entfernt), bei den in den Ablöse-Untersuchungen verwendeten Bedingungen. . . . .	80
3.14	Spannungssignal einer Faser, die lotrecht durch das Laserband führt. Das Spannungssignal wurde an den 4 Ecken und in der Mitte des Diagrammes gemessen und dazwischen interpoliert. Die Verstärkungsspannung des Photomultipliers beträgt 356 V. . . . .	82
3.15	Verläufe des Spannungssignals für unterschiedliche Partikeln die das Laserband durchqueren. Die Verstärkungsspannung des Photomultipliers beträgt 356 V. . . . .	83
3.16	Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden einmal mit und einmal ohne rote Beleuchtung in der Messkammer durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022]) . . . . .	84

3.17	Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden einmal mit und einmal ohne drei unbeladene, parallele Fasern in der Messkammer durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022]) . . . . .	85
3.18	Anzahl gewichteter Median der Signal-Spannung (maximales Spannungssignal minus Mittelwert des Grundrauschens) aufgetragen über dem anzahlgewichteten Median des projektionsflächenäquivalenten Durchmessers, für Glaskugeln und Steinkohlepartikeln. Diese Messungen wurden bei einer Temperatur des Düsenkörpers $T_2$ von 22°C und von 380°C durchgeführt. Jeder Datenpunkt ist der Mittelwert aus 20 Messungen. Die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. (modifiziert nach [Zoller et al., 2022]) . . . . .	86
3.19	Anzahl und Größe von Agglomeraten auf dem Auffangfilter bei Ablöseversuchen ohne Faser in der Messkammer (Blindversuch). Jeder Datenpunkt repräsentiert mindestens drei Messungen. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar.	89
3.20	Partikelstrukturen auf einem Auffangfilter bei Blindversuchen (a) oder Versuchen mit beladener Faser in der Messkammer (b). Der Maßstab gilt für alle Abbildungen.	90
3.21	Schematische Darstellung der Messbereiche der bei den Ablöseversuchen verwendeten Partikelmesstechnik. . . . .	90
3.22	Einordnung der Partikelstrukturen aus Kapitel 2 in die Literatur. Die mit einem roten Kasten markierte Partikelstruktur aus Propanruß und Glaskugeln wird für die Parameterstudie zur Ablösung verwendet. . . . .	91
3.23	Übersicht der Versuche zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer einzelnen 40 µm Stahlfaser bei geringer Beladung. . . . .	93
3.24	Übersicht der Versuche zur Ablösung von Partikelstrukturen aus Propanruß und Glaskugeln von einer einzelnen 40 µm Stahlfaser bei hoher Beladung. . . . .	94
3.25	Partikelstruktur auf einer einzelnen Faser, nach simultaner Abscheidung von Propanruß und Glaskugeln, bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit $\bar{u}$ von 0,4 m/s, einer aufgegebenen Menge an Glaskugeln von $m/A = 0,03 \text{ mg/mm}^2$ und einer aufgegebenen Menge an Propanruß von $m/A = 0,02 \text{ mg/mm}^2$ . Die untere Skala gilt für die unteren drei Bilder und in der Seitenansicht ist die Strömung von oben nach unten. . . . .	95
3.26	Geschwindigkeits- und Temperaturverläufe der Ablöseversuche aus den Abbildungen 3.23 und 3.24 . . . . .	96

- 3.27 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10  $\mu\text{m}$  Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde. . . . . 97
- 3.28 Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über der Strömungsgeschwindigkeit. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der Strömungsgeschwindigkeit, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten. . . . . 99
- 3.29 Einfluss der Beladung auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10  $\mu\text{m}$  Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde. . . . . 100
- 3.30 Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über deren Durchmesser. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der charakteristischen Länge, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der charakteristischen Länge auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten. . . . . 102
- 3.31 Aufnahmen der in die Messkammer eingebauten Fasern aus der Abbildung 3.24 vor und nach dem Ablöseversuch. . . . . 103
- 3.32 Einfluss der Temperatur auf die mittlere Anzahl der auf dem Auffangfilter gefundenen Partikelstrukturen über dem projektionsflächenäquivalenten Durchmesser. Die Einteilung erfolgt in Größenklassen mit 10  $\mu\text{m}$  Klassenbreite und die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Der grau markierte Bereich zeigt die Messunsicherheit, welche durch Blindversuche bestimmt wurde. . . . . 105
- 3.33 Theoretisch berechnete Strömungswiderstandskraft auf eine Kugel und einen Zylinder über der Temperatur. Da der Einfluss der Reynoldszahl und damit der Temperatur, auf den Widerstandsbeiwert verschiedener Körper ähnlich ist wie bei einem Zylinder und einer Kugel [Hölzer und Sommerfeld, 2008], ist ein analoger Einfluss der Temperatur auf die Strömungswiderstandskraft einer Partikelstruktur zu erwarten. . . . . 106

- 3.34 Theoretisch berechnete Van-der-Waals (VdW), elektrostatische (el) und Flüssigkeitsbrücken-Kräfte (fl) zwischen zwei kugelförmigen Partikeln gleichen Durchmessers, bei unterschiedlichen Materialkombinationen und Kontaktabständen  $a_0$ . Die für die Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 3.5 aufgeführt. Die roten Pfeile zeigen vom Anfangszustand zum Endzustand bei der Verbrennung von Ruß. 108
- 3.35 Auf die mittlere Haftkraft einer Kontaktstelle bezogene Festigkeit der Partikelstruktur, für unterschiedliche Sauterdurchmesser  $\bar{x}_2$  der Partikeln in der Struktur und unterschiedliche Porositäten. Der rote Pfeil zeigt vom Anfangszustand zum Endzustand bei der Verbrennung von Ruß. . . . . 109
- 3.36 Anströmung von Partikelstrukturen aus verschiedenen reaktiven Materialien, auf einer 40  $\mu\text{m}$  Stahlfaser, mit heißer Luft. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen. 111
- 3.37 Anströmung von Partikelstrukturen aus Propanruß und verschiedenen inerten Materialien, auf einer 40  $\mu\text{m}$  Stahlfaser, mit heißer Luft. Der Maßstab gilt für alle Abbildungen. . . . . 112
- 3.38 Projektionsflächen der in den Abbildungen 3.36 und 3.37 dargestellten Fasern mit Partikelstruktur, über der Zeit des Ablöseversuchs. Die Identifikation von Umlagerung, Ablösung und Schlieren findet über visuelle Auswertung des Videomaterials statt. . . . . 112
- 3.39 REM-Aufnahmen von auf einem Quarzfaserfilter abgeschiedenen Propanruß (a) und Carbon Black (b), sowie von auf einer Nucleopore-Membran abgeschiedenem Funkenruß (c). . . . . 114

## Tabellenverzeichnis

2.1	Nach verschiedenen Quellen beobachtete Partikelstrukturen bei verschiedenen Kombinationen von $St$ , $R$ , $Re_{Faser}$ , $Pe$ und elektrischer Ladung. Zahlenwerte in Klammern wurden nachträglich berechnet und sind nicht explizit in den Quellen angegeben. . . . .	9
2.2	Betriebsbedingungen des Rußgenerators . . . . .	12
2.3	Betriebsbedingungen des Dispergierers . . . . .	12
2.4	Mittlere und lokale Strömungsgeschwindigkeit bei der Abscheidung von Partikeln auf einer einzelnen Faser und bei Verwendung unterschiedlicher Konfigurationen von Faserhalter, Rohrdurchmesser und Einlaufänge. . . . .	21
2.5	Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen von Propanruß (Abbildung 2.11). . . . .	24
2.6	Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen aus Abbildung 2.12(a). . . . .	25
2.7	Charakteristische Größen der Partikelgrößenverteilungen aus Abbildung 2.12(b). . . . .	27
2.8	Projektionsflächen der Partikelstrukturen aus den Abbildungen 2.16, 2.17, 2.18 und 2.21 . . . . .	40
2.9	Charakteristische Eigenschaften der verwendeten Aerosole. . . . .	43
3.1	Inkompressible Strömung um einen Zylinder nach [Schlichting et al., 2006] . . . . .	54
3.2	Typische anzahlgewichtete Mediandurchmesser der Primärpartikeln und Agglomerate verschiedener Ruß-Arten. Die Primärpartikeldurchmesser von Funkenruß und Carbon Black wurden aus TEM-Aufnahmen bestimmt und die von Propanruß aus Messungen mit dem Atomic Force Microscope. Bei den Agglomeraten handelt es sich jeweils um den mit einem SMPS bestimmten Äquivalentdurchmessers einer Partikel gleicher elektrischer Mobilität. . . . .	60
3.3	Chemische Zusammensetzung verschiedener Ruß-Arten [Long et al., 2013]. . . . .	60
3.4	Fit-Parameter der Gleichung 3.21 für die in den Abbildungen 3.16, 3.17 und 3.18 gezeigten Messdaten. . . . .	87
3.5	Für die theoretische Analyse verwendete Parameter. . . . .	107
3.6	Anzahlgewichteter Median des projektionsflächenäquivalenten Primärpartikeldurchmessers und des Äquivalentdurchmessers gleicher elektrischer Mobilität der Agglomerate für die verschiedenen reaktiven Materialien. . . . .	114

## Literaturverzeichnis

- Beck, A. C. (1964): *Thermal gas lens measurements*. The Bell Systems Technical Journal, S. 1818–1820.
- Berbnner, S. und Löffler, F. (1994): *Influence of high temperatures on particle adhesion*. Powder Technology, Bd. 78, S. 273–280. ISSN 00325910.
- Berry, E. (1923): *The reflection of light from a sphere*. Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments, Bd. 7, S. 679–682.
- Binnig, J., Meyer, J. und Kasper, G. (2007): *Calibration of an optical particle counter to provide mass for well-defined particle materials*. Journal of Aerosol Science, Bd. 38, S. 325–332. ISSN 00218502.
- Blackford, David B. und Simons, Gary R. (1987): *Particle Size Analysis of Carbon Black*. Particle & Particle Systems Characterization, Bd. 4, S. 112–117. ISSN 0934-0866.
- Braschke, K. (2021): *Modeling contact behavior of arbitrarily shaped particles*. Shaker, Düren.
- Braschke, K., Zoller, J., Zargaran, A., Dittler, A. und Janoske, U. (2021): *Analytical and numerical calculation of the detachment of particle structures from fibers*. Aerosol Science and Technology, S. 1–11. ISSN 0278-6826.
- Cai, R. R. und Zhang, L. Z. (2016): *Modeling of dynamic deposition and filtration processes of airborne particles by a single fiber with a coupled lattice Boltzmann and discrete element method*. Building and Environment, Bd. 106, S. 274–285. ISSN 03601323.
- Charvet, A., Wingert, L., Bardin-Monnier, N., Pacault, S., Godoy, C., Ribeyre, Q. und Thomas, D. (2017): *Visualization of airborne nanoparticle deposits onto spherical collectors*. Separation and Purification Technology, Bd. 172, S. 119–129. ISSN 13835866.
- Cohen, S. R. (1992): *An evaluation of the use of the atomic force microscope for studies in nanomechanics*. Ultramicroscopy, S. 66–72.
- Dahneke, B. (1972): *The influence of flattening on the adhesion of particles*. Journal of colloid and interface science, Bd. 40, S. 1–13. ISSN 0021-9797.
- Dai, B.-Q., Low, F., de Girolamo, A., Wu, X. und Zhang, L. (2013): *Characteristics of ash deposits in a pulverized lignite coal-fired boiler and the mass flow of major ash-forming inorganic elements*. Energy & Fuels, Bd. 27, S. 6198–6211. ISSN 0887-0624.
- Derjaguin, B. V., Muller, V. M. und Toporov, Yu. P. (1975): *Effect of contact deformations on the adhesion of particles*. Journal of colloid and interface science, Bd. 53, S. 314–326. ISSN 0021-9797.

- Dong, M., Li, J., Shang, Y. und Li, S. (2019): *Numerical investigation on deposition process of submicron particles in collision with a single cylindrical fiber*. Journal of Aerosol Science, Bd. 129, S. 1–15. ISSN 00218502.
- Dunnett, S. J. und Clement, C. F. (2012): *Numerical investigation into the loading behaviour of filters operating in the diffusional and interception deposition regimes*. Journal of Aerosol Science, Bd. 53, S. 85–99. ISSN 00218502.
- Eichenlaub, S., Chan, C. und Beaudoin, S. P. (2002): *Hamaker constants in integrated circuit metalization*. Journal of colloid and interface science, Bd. 248, S. 389–397. ISSN 0021-9797.
- Ess, M., Berto, M., Irwin, M., Modini, R., Gysel-Ber, M. und Vasilatou, K. (2019): *Optical and morphological characterization of "miniCAST 5201 BC"-soot: 23rd ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles*.
- Finn, R. K. (1953): *Determination of the drag on a cylinder at low reynolds numbers*. Journal of Applied Physics, Bd. 24, S. 771–773. ISSN 0021-8979.
- Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.) (2013): *VDI-Wärmeatlas: Mit 320 Tabellen*. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, 11th Aufl. ISBN 9783642199806.
- Ghiassi, H., Jaramillo, I. C., Toth, P. und Lighty, J. S. (2016a): *Soot oxidation-induced fragmentation: Part 2: Experimental investigation of the mechanism of fragmentation*. Combustion and Flame, Bd. 163, S. 170–178. ISSN 00102180.
- Ghiassi, H., Toth, P., Jaramillo, I. C. und Lighty, J. S. (2016b): *Soot oxidation-induced fragmentation: Part 1: The relationship between soot nanostructure and oxidation-induced fragmentation*. Combustion and Flame, Bd. 163, S. 179–187. ISSN 00102180.
- Ghidossi, R., Bonnet, J.-P., Rebollar-Perez, G., Carretier, E., Ferrasse, J.-H., Vicente, J., Topin, F. und Moulin, P. (2009): *Separation of particles from hot gases using metallic foams*. Journal of Materials Processing Technology, Bd. 209, S. 3859–3868. ISSN 09240136.
- Glassman, I. und Harris, B. L. (1952): *Collision diameters of some gases as a function of temperature*. The Journal of Physical Chemistry, Bd. 56, S. 797–799. ISSN 0022-3654.
- Gnielinski, V. (2013): *Durchströmte Rohre*. In: Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas*, VDI-Buch, S. 785–792. Springer Vieweg, Berlin. ISBN 9783642199806.
- Götzinger, M. und Peukert, W. (2004): *Particle adhesion force distributions on rough surfaces*. Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids, Bd. 20, S. 5298–5303. ISSN 0743-7463.

- Hagen, F., Hardock, F., Koch, S., Sebbar, N., Bockhorn, H., Loukou, A., Kubach, H., Suntz, R., Trimis, D. und Koch, T. (2021): *Why soot is not alike soot: A molecular/nanostructural approach to low temperature soot oxidation*. Flow, Turbulence and Combustion, Bd. 106, S. 295–329. ISSN 1386-6184.
- Hagen, F. P., Rinkenburger, A., Günther, J., Bockhorn, H., Niessner, R., Suntz, R., Loukou, A., Trimis, D. und Haisch, C. (2020): *Spark discharge-generated soot: Varying nanostructure and reactivity against oxidation with molecular oxygen by synthesis conditions*. Journal of Aerosol Science, Bd. 143, S. 105530. ISSN 00218502.
- Hamaker, H. C. (1937): *The London—van der Waals attraction between spherical particles*. Physica, Bd. 4, S. 1058–1072. ISSN 00318914.
- Haugen, N. E. L. und Kragset, S. (2010): *Particle impaction on a cylinder in a crossflow as function of Stokes and Reynolds numbers*. Journal of Fluid Mechanics, Bd. 661, S. 239–261. ISSN 0022-1120.
- Hiller, R. und Löffler, F. (1980): *Der Einfluß von Partikelstoß und Partikel-Haftung auf die Abscheidung von Partikeln in Faserfiltern*. Chemie Ingenieur Technik, Bd. 52, S. 352–353. ISSN 0009286X.
- Hinds, W. C. (2012): *Aerosol Technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. Wiley-Interscience, s.l., 2. Aufl. ISBN 978-0-471-19410-1.
- Hölzer, A. und Sommerfeld, M. (2008): *New simple correlation formula for the drag coefficient of non-spherical particles*. Powder Technology, Bd. 184, S. 361–365. ISSN 00325910.
- Hornbeck, R. W. (1964): *Laminar flow in the entrance region of a pipe*. Applied Scientific Research, Bd. 13, S. 224–232. ISSN 0003-6994.
- Hosseini, S. A. und Vahedi Tafreshi, H. (2012): *Modeling particle-loaded single fiber efficiency and fiber drag using ANSYS–Fluent CFD code*. Computers & Fluids, Bd. 66, S. 157–166. ISSN 00457930.
- Huang, B., Yao, Q., Li, S.-Q., Zhao, H.-L., Song, Q. und You, C.-F. (2006): *Experimental investigation on the particle capture by a single fiber using microscopic image technique*. Powder Technology, Bd. 163, S. 125–133. ISSN 00325910.
- Huang, H., Zheng, C. und Zhao, H. (2017): *Numerical investigation on non-steady-state filtration of elliptical fibers for submicron particles in the “Greenfield gap” range*. Journal of Aerosol Science, Bd. 114, S. 263–275. ISSN 00218502.
- Hurley, J. P. und Dockter, B. A. (2003): *Factors affecting the tensile strength of hot-gas filter dust cakes*. Advanced Powder Technology, Bd. 14, S. 695–705.

- Jankowska, E., Reponen, T., Willeke, K., Grinshpun, S. A. und Choi, K.-J. (2000): *Collection of fungal spores on air filters and spore reentrainment from filters into air*. Journal of Aerosol Science, Bd. 31, S. 969–978. ISSN 00218502.
- Jiang, K. und Pinchuk, P. (2016): *Temperature and size-dependent Hamaker constants for metal nanoparticles*. Nanotechnology, Bd. 27, S. 1–9.
- Johnson, K. L., Kendall, K. und Roberts, A. D. (1971): *Surface energy and the contact of elastic solids*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Bd. 324, S. 301–313. ISSN 1364-5021.
- Johnston, A. M., Vincent, J. H. und Jones, A. D. (1987): *Electrical charge characteristics of dry aerosols produced by a number of laboratory mechanical dispensers*. Aerosol Science and Technology, Bd. 6, S. 115–127. ISSN 0278-6826.
- Kanaoka, C., Emi, H. und Myojo, T. (1980): *Simulation of the growing process of a particle dendrite and evaluation of a single fiber collection efficiency with dust load*. Journal of Aerosol Science, Bd. 11, S. 377–389. ISSN 00218502.
- Kanaoka, C., Emi, H., Hiragi, S. und Myojo, T. (1986): *Morphology of particulate agglomerates on a cylindrical fiber and a collection efficiency of a dust loaded fiber*. Aerosols: Formation and Reactivity (2nd Int. Aerosol Conf. Berlin).
- Kanaoka, C., Hiragi, S. und Tanthapanichakoon, W. (2001): *Stochastic simulation of the agglomerative deposition process of aerosol particles on an electret fiber*. Powder Technology, Bd. 118, S. 97–106. ISSN 00325910.
- Kasper, G., Schollmeier, S., Meyer, J. und Hoferer, J. (2009): *The collection efficiency of a particle-loaded single filter fiber*. Journal of Aerosol Science, Bd. 40, S. 993–1009. ISSN 00218502.
- Kasper, G., Schollmeier, S. und Meyer, J. (2010): *Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce*. Journal of Aerosol Science, Bd. 41, S. 1167–1182. ISSN 00218502.
- Kelly, A. (1973): *Werkstoffe hoher Festigkeit*. Vieweg, Braunschweig.
- Kim, S. C., Wang, J., Shin, W. G., Scheckman, J. H. und Pui, D. Y. H. (2009): *Structural properties and filter loading characteristics of soot agglomerates*. Aerosol Science and Technology, Bd. 43, S. 1033–1041. ISSN 0278-6826.
- Klopfenstein, R. [JR.] (1998): *Air velocity and flow measurements using a pitot tube*. ISA Transactions, Bd. 37, S. 257–263.

- Kostoglou, M. und Konstandopoulos, A. G. (2000): *Particulate deposit shape evolution on cylinders in cross-flow at high stokes numbers*. Journal of Aerosol Science, Bd. 31, S. 427–436. ISSN 00218502.
- Kümmel, W. (2007): *Technische Strömungsmechanik: Theorie und Praxis*. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 3. Aufl. ISBN 978-3-8351-0141-8.
- Lai, T., Chen, R. und Huang, P. (2015): *Temperature dependence of microscale adhesion force between solid surfaces using an AFM*. Journal of Adhesion Science and Technology, Bd. 29, S. 133–148. ISSN 0169-4243.
- Li, S.-Q. und Marshall, J. S. (2007): *Discrete element simulation of micro-particle deposition on a cylindrical fiber in an array*. Journal of Aerosol Science, Bd. 38, S. 1031–1046. ISSN 00218502.
- Löffler, F. (1972): *Abblasen von an Filterfasern abgeschiedenen Feststoffteilchen*. Verfahrenstechnik, Bd. 6, S. 3–7.
- Long, C. M., Nascarella, M. A. und Valberg, P. A. (2013): *Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions*. Environmental pollution (Barking, Essex : 1987), Bd. 181, S. 271–286.
- Mansurov, Z. A. (2005): *Soot formation in combustion processes (Review)*. Combustion, Explosion, and Shock Waves, Bd. 41, S. 727–744.
- Martin, H. (1980): *Wärme- und Stoffübertragung in der Wirbelschicht*. Chemie Ingenieur Technik, Bd. 52, S. 199–209. ISSN 0009286X.
- Martínez-Suástegui, L., Treviño, C. und Cajas, J. C. (2015): *Steady and oscillatory laminar opposing mixed convection in a vertical channel of finite length subjected to symmetrical isothermal discrete heat sources*. Physics of Fluids, Bd. 27, S. 063604. ISSN 1070-6631.
- Matti Maricq, M. (2007): *Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review*. Journal of Aerosol Science, Bd. 38, S. 1079–1118. ISSN 00218502.
- Matuschek, Georg, Karg, Erwin, Schröppel, Andreas, Schulz, Holger und Schmid, Otmar (2007): *Chemical investigation of eight different types of carbonaceous particles using thermoanalytical techniques*. Environmental science & technology, Bd. 41, S. 8406–8411. ISSN 0013-936X.
- Moore, R. H., Ziemba, L. D., Dutcher, D., Beyersdorf, A. J., Chan, K., Crumeyrolle, S., Raymond, T. M., Thornhill, K. L., Winstead, E. L. und Anderson, B. E. (2014): *Mapping the operation of the miniature combustion aerosol standard (Mini-CAST) soot generator*. Aerosol Science and Technology, Bd. 48, S. 467–479. ISSN 0278-6826.

- Müller, T. K., Meyer, J., Thébault, E. und Kasper, G. (2014): *Impact of an oil coating on particle deposition and dust holding capacity of fibrous filters*. Powder Technology, Bd. 253, S. 247–255. ISSN 00325910.
- Onischuk, A. A., Di Stasio, S., Karasev, V. V., Baklanov, A. M., Makhov, G. A., Vlasenko, A. L., Sadykova, A. R., Shipovalov, A. V. und Panfilov, V. N. (2003): *Evolution of structure and charge of soot aggregates during and after formation in a propane/air diffusion flame*. Journal of Aerosol Science, Bd. 34, S. 383–403. ISSN 00218502.
- Otsu, N. (1979): *A threshold selection method from gray-level histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Bd. 9, S. 62–66. ISSN 0018-9472.
- Ou, Q., Maricq, M. M. und Pui, D. Y. H. (2017): *Evaluation of metallic filter media for sub-micrometer soot particle removal at elevated temperature*. Aerosol Science and Technology, Bd. 51, S. 1303–1312. ISSN 0278-6826.
- Pashley, M. D., Pethica, J. B. und Tabor, D. (1984): *Adhesion and micromechanical properties of metal surfaces*. Wear, Bd. 100, S. 7–31.
- Peart, J. (2001): *Powder electrostatics: theory, techniques and applications*. KONA Powder and Particle Journal, Bd. 19, S. 34–45. ISSN 0288-4534.
- Pfau, S. A., La Rocca, A., Haffner-Staton, E., Rance, G. A., Fay, M. W., Brough, R. J. und Malizia, S. (2018): *Comparative nanostructure analysis of gasoline turbocharged direct injection and diesel soot-in-oil with carbon black*. Carbon, Bd. 139, S. 342–352.
- Przekop, R. und Gradoń, L. (2008): *Deposition and filtration of nanoparticles in the composites of nano- and micro-sized fibers*. Aerosol Science and Technology, Bd. 42, S. 483–493. ISSN 0278-6826.
- Przekop, R. und Gradoń, L. (2014): *Effect of particle and fiber size on the morphology of deposits in fibrous filters*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Bd. 76, S. 779–788. ISSN 02712091.
- Qian, Y., Willeke, K., Grinshpun, S. A. und Donnelly, J. (1997a): *Performance of N95 respirators: reaerosolization of bacteria and solid particles*. American Industrial Hygiene Association journal, Bd. 58, S. 876–880. ISSN 0002-8894.
- Qian, Y., Willeke, K., Ulevicius, V. und Grinshpun, S. A. (1997b): *Particle reentrainment from fibrous filters*. Aerosol Science and Technology, Bd. 27, S. 394–404. ISSN 0278-6826.
- Räbiger, N. und Schlüter, M. (2013): *Bildung und Bewegung von Tropfen und Blasen*. In: Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), VDI-Wärmeatlas, VDI-Buch, S. 1413–1428. Springer Vieweg, Berlin. ISBN 9783642199806.

- Rembor, H.-J. und Kasper, G. (Hrsg.) (1999): *Morphology of particulate structures on dust loaded single fibres*.
- Roberts, I. L., Coney, J.E.R. und Gibbs, B. M. (2011): *Estimation of radiation losses from sheathed thermocouples*. Applied Thermal Engineering, Bd. 31, S. 2262–2270. ISSN 13594311.
- Roeser, W. F. und Wensel, H. T. (1935): *Methods of testing thermocouples and thermocouple materials*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Bd. 14, S. 247–282.
- Rumpf, H. C. H. (1970): *Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten*. Chemie Ingenieur Technik, Bd. 42, S. 538–540. ISSN 0009286X.
- Salgansky, E. A., Zaichenko, A. Yu, Podlesniy, D. N., Salganskaya, M. V. und Toledo, M. (2017): *Coal dust gasification in the filtration combustion mode with syngas production*. International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 42, S. 11017–11022. ISSN 03603199.
- Sappok, A., Govani, I., Kamp, C., Wang, Y. und Wong, V. (2013): *In-situ optical analysis of ash formation and transport in diesel particulate filters during active and passive DPF regeneration processes*. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Bd. 6, S. 336–349. ISSN 1946-3960.
- Schaefer, D. M., Carpenter, M., Gady, B., Reifenberger, R., Demejo, L. P. und Rimai, D. S. (1995): *Surface roughness and its influence on particle adhesion using atomic force techniques*. Journal of Adhesion Science and Technology, Bd. 9, S. 1049–1062. ISSN 0169-4243.
- Schilling, M., Schütz, S., Piesche, M., Guo, Liejin, Joseph, D. D., Matsumoto, Y., Sommerfeld, Y. und Wang, Y. (2010): *Numerical simulation of the transport and deposition behaviour of particles on filter fibres using Euler-Lagrange Method and coupling of CFD and DEM*. AIP Conference Proceedings, S. 789–795. AIP.
- Schlichting, H., Gersten, K. und Krause, E. (2006): *Grenzschicht-Theorie: Mit 22 Tabellen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 10th Aufl. ISBN 3-540-23004-1.
- Schollmeier, S. (2008): *Beladungskinetik von Faserfiltern - Beladungskinetik einzelner Filterfasern*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Schubert, H. (1975): *Tensile strength of agglomerates*. Powder Technology, Bd. 11, S. 107–119. ISSN 00325910.
- Schubert, H. (1982): *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*. Springer, Berlin, Heidelberg usw. ISBN 3-540-11835-7.
- Seban, R. A., Behnia, M. M. und Abreu, K. E. (1978): *Temperatures in a heated air jet discharged downward*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Bd. 21, S. 1453–1458. ISSN 00179310.

- Singh, M. P. und Gupta, J. L. (1971): *The effect of permeability on the drag of a porous sphere in a uniform stream*. ZAMM, Bd. 51, S. 27–32.
- Sogin, H. H. und Subramanian, V. S. (1961): *Local mass transfer from circular cylinders in cross flow*. Journal of Heat Transfer, S. 483–491.
- Song, J., Alam, M., Boehman, A. und Kim, U. (2006): *Examination of the oxidation behavior of biodiesel soot*. Combustion and Flame, Bd. 146, S. 589–604. ISSN 00102180.
- Span, R. (2013): *Trockene Luft*. In: Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas*, VDI-Buch, S. 196–217. Springer Vieweg, Berlin. ISBN 9783642199806.
- Tabrizi, N. S., Ullmann, M., Vons, V. A., Lafont, U. und Schmidt-Ott, A. (2009): *Generation of nanoparticles by spark discharge*. Journal of Nanoparticle Research, Bd. 11, S. 315–332. ISSN 1388-0764.
- Thundat, T., Zheng, X.-Y., Chen, G. Y. und Warmack, R. J. (1993): *Role of relative humidity in atomic force microscopy imaging*. Surface Science Letters, Bd. 294, S. L939–L943. ISSN 01672584.
- Tien, C., Wang, C. S. und Barot, D. T. (1977): *Chainlike formation of particle deposits in fluid-particle separation*. Science (New York, N.Y.), Bd. 196, S. 983–985. ISSN 0036-8075.
- Tsai, C.-J., Pui, D. Y. H. und Liu, B. Y. H. (1991): *Elastic flattening and particle adhesion*. Aerosol Science and Technology, Bd. 15, S. 239–255. ISSN 0278-6826.
- Wang, M., Tsuji, T. und Nagano, Y. (1994): *Mixed convection with flow reversal in the thermal entrance region of horizontal and vertical pipes*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Bd. 37, S. 2305–2319. ISSN 00179310.
- Wang, Y., Kamp, C. J., Wang, Y., Toops, T. J., Su, C., Wang, R., Gong, J. und Wong, V. W. (2020): *The origin, transport, and evolution of ash in engine particulate filters*. Applied Energy, Bd. 263, S. 114631. ISSN 03062619.
- Waxler, R. M. und Cleek, G. W. (1973): *The effect of temperature and pressure on the refractive index of some oxide glasses*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, Bd. 77A, S. 755–763.
- Wehrum, A., Tjokrosetio, H. und Gersten, K. (1978): *Der Einfluß inhomogener Zuströmung bei Düsen für Unterschallwindkanäle*. Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung, S. 89–93.
- Wessel, R. A. und Righi, J. (1988): *Generalized correlations for inertial impaction of particles on a circular cylinder*. Aerosol Science and Technology, Bd. 9, S. 29–60. ISSN 0278-6826.

- Wurster, S. (2017): *Entrainment von Öltröpfen an der Rückwand eines Faserfilters*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Wurster, S., Kampa, D., Meyer, J., Müller, T., Mullins, B. J. und Kasper, G. (2015): *Measurement of oil entrainment rates and drop size spectra from coalescence filter media*. Chemical Engineering Science, Bd. 132, S. 72–80. ISSN 00092509.
- Xu, R. (2002): *Particle characterization: Light scattering methods*, Bd. 13 von *Particle Technology Series*. Kluwer, Dordrecht. ISBN 1-4020-0357-9.
- Yamamoto, K., Tanuma, C. und Gemma, N. (1995): *Competition between electrostatic and capillary forces acting on a single particle*. Japanese Journal of Applied Physics, Bd. 34, S. 4176–4184.
- Yang, L., Hu, J. und Bai, K. (2016): *Capillary and van der Waals force between microparticles with different sizes in humid air*. Journal of Adhesion Science and Technology, Bd. 30, S. 566–578. ISSN 0169-4243.
- Zhu, H., Qi, C., Fu, H. und Kang, Y. (Hrsg.) (2015): *Morphologies of particles deposit on single fiber due to the inertia interception*.
- Zieskind, G., Fichman, M. und Gutfinger, C. (1997): *Adhesion moment model for estimating particle detachment from a surface*. Journal of Aerosol Science, Bd. 28, S. 623–634. ISSN 00218502.
- Zoller, Julian, Zargaran, Amin, Braschke, Kamil, Meyer, Jörg, Janoske, Uwe und Dittler, Achim (2020a): *Experimental investigation of reactive-inert particulate matter detachment from metal fibres at low flow velocities and different gas temperatures*. Aerosol Science and Engineering. ISSN 2510-375X.
- Zoller, J., Zargaran, A., Braschke, K., Meyer, J., Janoske, U. und Dittler, A. (2020b): *Morphology of particulate deposits formed on a single filter fibre by exposure to mixed aerosol flow*. Journal of Aerosol Science, S. 105718. ISSN 00218502.
- Zoller, J., Zargaran, A., Braschke, K., Meyer, J., Janoske, U. und Dittler, A. (2022): *A novel apparatus for simultaneous laser-light-sheet optical particle counting and video recording in the same measurement chamber at high temperature*. Sensors (Basel, Switzerland), Bd. 22.