



**INSTITUT FÜR  
ENERGIETECHNIK  
UND THERMODYNAMIK**  
Institute of Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

# **LDA-Messungen und optische Strahlanalyse an einem Peltondüsenprüfstand**

unter der Leitung von

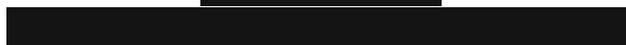
**Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Maly, BSc**

E302 - Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Eingereicht an der Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften  
an der Technischen Universität Wien  
zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

von

**Susanna Maria Jungmeister, BSc**



# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem\_r Beurteiler\_in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachter\_innen beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Unterwaltersdorf, November 2023

.....  
(Susanna Maria Jungmeister,  
BSc)

# Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Maly bedanken, der stets ein offenes Ohr für mich hatte und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist.

Ein weiterer Dank gilt den Mitarbeiter\*innen der Werkstatt des Instituts für ihre Hilfe und Unterstützung bei diversen Auf- und Umbauarbeiten des Prüfstands und für die Anfertigung einzelner Bauteile.

Am Ende meines Studiums angelangt möchte ich mich auch bei all meinen Studienkollegen bedanken, für den Zusammenhalt, die gegenseitige Unterstützung und die vielen unvergesslichen Momente.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie für ihre Unterstützung und Rücksichtnahme in den letzten Jahren. Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Mann Robert und meine beiden Töchtern Amelie und Leonie bedanken, durch die ich lernen durfte was im Leben wirklich zählt und die mich in herausfordernden Zeiten meines Studiums durchhalten ließen.

# Kurzfassung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, sowohl das Geschwindigkeitsprofil als auch Sekundärströmungen in der Rohrleitung, sowie in weiterer Folge im Freistrahls des Peltondüsenprüfstandes zu messen. Hierfür soll einerseits die Laser-Doppler-Anemometrie(LDA) als auch eine optische Strahlanalyse mittels Kamera zur Anwendung kommen. Diese Diplomarbeit dient als Vorarbeit für ein Forschungsprojekt, um einerseits Messmethoden zu erproben und andererseits eine Vergleichsbasis für Untersuchungen im Rahmen des Projekts zu erhalten. In weiterer Folge sollen die Messergebnisse auch zur Validierung von CFD(Computational Fluid Dynamics) Berechnungen herangezogen werden.

Hierfür ist zunächst eine Literaturrecherche, das Einarbeiten in die jeweiligen Messmethoden und das Auseinandersetzen mit den im Labor vorhandenen Messsystemen erforderlich. Dazu zählen das Einarbeiten mit der Funktionsweise der verwendeten Geräte, den Betriebsanleitungen, sowie der Instrumentierung. Außerdem sind Funktionstests und ein Testbetrieb erforderlich.

Im Rahmen der Messvorbereitung ist die optische Zugänglichkeit für die Messungen zu erarbeiten. Dazu zählt einerseits die Positionierung von Laser und Kamera sowie die Messfenstergeometrie. Weiters sind Sicherheitsaspekte bei der Lasermessung sowie die Verwendung etwaiger benötigter Seedings zu planen.

Im Zuge der Messungen soll dann das Geschwindigkeitsprofil und Sekundärströmungen in der Rohrleitung mittels LDA ermittelt werden. Mithilfe der optischen Strahlanalyse können Rückschlüsse auf die Strahlqualität geschlossen werden. Wichtige Aspekte hierbei sind die Einschnürung, die Strahlaufweitung sowie die Strahlablenkung des Freistrahls. Im Anschluss an die Messungen folgt die Auswertung und Aufbereitung der Messdaten, die Erstellung von Geschwindigkeitsprofilen und Diagrammen, und die Interpretation der Ergebnisse.

# Abstract

One goal of this master thesis should be to measure the velocity profile in the pipe and the jet surface of the water jet at a pelton-jet testrig. The fluid flow measurement should be done using Laser-Doppler-Anemometry(LDA). The surface of the jet should be examined by an optical jet analysis using cameras. This thesis serves as preparatory work for a research project in order to test different measurement methods and setups and to obtain a basis for comparison for investigations within the project. Subsequently, the measurement results should also be used to validate CFD(Computational Fluid Dynamics) calculations.

First of all, a literature research should be conducted. Furthermore, it is necessary to familiarize with the respective measurement methods and to get to know the measurement systems available in the laboratory. This includes becoming familiar with the used devices, the user manuals, and the instrumentation. Functional tests and pilot operations are also required.

As part of the measurement preparation, optical accessibility for the measurements must be developed. This includes the positioning of the laser and camera as well as the measurement window geometry. In addition, safety aspects of laser measurement and the use of any seedings required should be planned.

In the course of the measurements, the velocity profile and secondary flows in the pipeline should be determined using LDA. Optical jet analysis is used to draw conclusions about the jet quality. Important aspects in that scope are constriction, dispersion, and deflection of the jet. The measurements are followed by the evaluation and postprocessing of the measurement data, the creation of speed profiles and diagrams, and the interpretation of the results.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Pelton turbine . . . . .	2
1.2	Aufgabenstellung und Motivation . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Peltondüse . . . . .	5
2.2	Laser-Doppler-Anemometrie - LDA . . . . .	8
2.2.1	Messprinzip und Aufbau . . . . .	8
2.2.2	Signalverarbeitung . . . . .	12
2.2.3	Laser . . . . .	13
2.3	Seedings . . . . .	14
2.4	Brechung von Licht . . . . .	14
2.5	Rohrströmung . . . . .	16
2.6	Turbulenzgrad . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau und Instrumentierung</b>	<b>19</b>
3.1	Aufbau des Peltondüsenprüfstands . . . . .	19
3.1.1	Messfenster für LDA-Messungen . . . . .	21
3.1.2	Seedingeinbringung . . . . .	23
3.2	Messtechnik . . . . .	25
3.2.1	Durchflussmessung . . . . .	25
3.2.2	Druckmessung . . . . .	26

3.2.3	LDA-System . . . . .	28
3.2.4	Aufbau für die optische Strahlanalyse . . . . .	31
3.3	Fehlerbetrachtung . . . . .	34
3.3.1	Allgemeine Messunsicherheit . . . . .	34
3.3.2	Fehlerbetrachtung LDA-Messung . . . . .	35
3.3.3	Fehlerbetrachtung optische Strahlanalyse . . . . .	37
<b>4</b>	<b>LDA-Messungen in der Rohrleitung</b>	<b>39</b>
4.1	Messablauf . . . . .	39
4.2	Messergebnisse und Interpretation . . . . .	42
4.2.1	Strömungszustände in der geraden Zuleitung . . . . .	42
4.2.2	Zeitverlauf der Messungen . . . . .	48
4.2.3	Abschätzung des Durchflusses mittels LDA-Messung . . . . .	49
4.2.4	Position der Seedingeindüsung . . . . .	51
4.2.5	Variation der Messfenstergeometrie . . . . .	54
4.2.6	Geschwindigkeitsprofil unterschiedlicher Fallhöhen . . . . .	58
4.2.7	Turbulenzgrad . . . . .	61
4.2.8	Reproduzierbarkeit . . . . .	65
4.3	Zusammenfassung . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Optische Strahlanalyse mittels Kamera</b>	<b>68</b>
5.1	Messablauf . . . . .	68
5.2	Messergebnisse und Interpretation . . . . .	70
5.2.1	Strahlkontur . . . . .	70
5.2.2	Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung . . . . .	73
5.2.3	Strahlaufweitung . . . . .	77
5.2.4	Strahlablenkung . . . . .	79
5.2.5	Reproduzierbarkeit . . . . .	83
5.3	Zusammenfassung . . . . .	84

<b>6</b>	<b>Resümee und Ausblick</b>	<b>85</b>
	<b>Literatur</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Aufnahmen des Freistrahls</b>	<b>90</b>
<b>B</b>	<b>Diagramme der Strahlmittelachsen</b>	<b>96</b>

# Nomenclature

## Abkürzungen

CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computerized Numerical Control
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FPP	Fluoriszierende Polymer Partikel
fps	frames per second
LDA	Laser-Doppler Anemometry
LED	Light Emitting Diode
NI	National Instrument
PIV	Particle-Image Velocimetry
PSP	Polyamid Seeding Particle
ROI	Region of Interest
TU	Technische Universität

## Lateinische Zeichen

$\Delta f_{Bragg}$	Differenzfrequenz aufgrund der Bragg-Zelle	Hz
$\overline{c_x}$	Mittelwert der Geschwindigkeit in x-Richtung	m/s
$\overline{c_y}$	Mittelwert der Geschwindigkeit in y-Richtung	m/s
$\overline{c_z}$	Mittelwert der Geschwindigkeit in z-Richtung	m/s
$\overline{c_x^2}$	zeitlicher Mittelwert der Quadrate der Schwankungsgeschwindigkeit in x-Richtung	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$\overline{c'_x}$	Schwankungsmittelwert der Geschwindigkeit in x-Richtung	m/s
$\overline{c_y^2}$	zeitlicher Mittelwert der Quadrate der Schwankungsgeschwindigkeit in y-Richtung	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$\overline{c'_y}$	Schwankungsmittelwert der Geschwindigkeit in y-Richtung	m/s
$\overline{c_z^2}$	zeitlicher Mittelwert der Quadrate der Schwankungsgeschwindigkeit in z-Richtung	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>

## Nomenclature

---

$\overline{c}_z$	Schwankungsmittelwert der Geschwindigkeit in z-Richtung	m/s
$A$	Flächeninhalt des Rohrquerschnitts	m <sup>2</sup>
$A_i$	Teilflächeninhalte	mm <sup>2</sup>
$c$	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$c_0$	theoretische Strahlgeschwindigkeit	m/s
$c_i$	mittlere Stömungsgeschwindigkeit der einzelnen Flächenstücke	m/s
$c_\infty$	ungestörte Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$c'_x$	Geschwindigkeitsschwankung in x-Richtung	m/s
$c'_y$	Geschwindigkeitsschwankung in y-Richtung	m/s
$c'_z$	Geschwindigkeitsschwankung in z-Richtung	m/s
$d$	Streifenabstand	m
$D_0$	Durchmesser am Austritt des Düsenmundstücks	m
$d_0$	theoretischer Strahldurchmesser	m
$d_i$	Rohrinnendurchmesser	mm
$d_l$	Durchmesser der Laserstrahlen nach Umlenkung durch Linse	mm
$d_x$	Abmessung des Messvolumens in x-Richtung	mm
$d_y$	Abmessung des Messvolumens in y-Richtung	mm
$d_z$	Abmessung des Messvolumens in z-Richtung	mm
$d'_l$	Durchmesser der Laserstrahlen vor Umlenkung durch Linse	mm
$e_c$	absoluter Fehler der Strömungsgeschwindigkeit	m/s
$e_H$	absoluter Fehler der Fallhöhe	m
$e_r$	unbekannte, systematische Messabweichung	
$e_r$	zufällige Messabweichung	
$e_x$	absoluter Fehler der einzelnen Mess- bzw. Berechnungsgrößen x	
$e_{p_m}$	absoluter Fehler des Drucks am Manometer	Pa
$e_{s,b}$	bekannte, systematische Messabweichung	
$e_{z_m}$	absoluter Fehler der geodätischen Höhe des Manometers	m
$e_z$	absoluter Fehler der geodätischen Höhe der Düsenmittelachse	m
$F$	Brennweite	mm
$f_A$	relativer Fehler der Querschnittsfläche	
$f_c$	relativer Fehler der Strömungsgeschwindigkeit	
$f_c$	relativer Fehler des Durchflusses	
$f_D$	Doppler Frequenz	Hz
$f_H$	relativer Fehler der Fallhöhe	
$f_x$	relativer Fehler der einzelnen Mess- bzw. Berechnungsgrößen x	

$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m/s}^2$
$H$	Fallhöhe	m
$n$	Anzahl der Rechtecksignale	
$n_1$	Brechungsindex Medium 1	
$n_2$	Brechungsindex Medium 2	
$n_q$	spezifische Drehzahl	
$P$	Leistung des Lasers	mW
$p_0$	Umgebungsdruck	Pa
$p_m$	Gemessener Druck am Manometer	Pa
$Q$	Durchfluss	L/s
$Q_i$	Partialdurchfluss	L/s
$Re$	Reynoldszahl	
$s$	Düsenstellung	mm
$T$	Messzeit	s
$Tu$	Turbulenzgrad	
$Tu_y$	Turbulenzgrad der Transportkomponente	
$Tu_z$	Turbulenzgrad der Sekundärkomponente	
$x$	Messposition	mm
$x$	Messwert	
$x_w$	wahrer Wert	
$z_D$	Geodätische Höhe der Düsenmittelachse	m
$z_m$	Geodätische Höhe des Manometers	m

### Griechische Zeichen

$\alpha$	Winkel der Strahlaufweitung	°
$\alpha_1$	Einfallswinkel des Laserstrahls im Medium 1	°
$\alpha_2$	Einfallswinkel des Laserstrahls im Medium 2	°
$\gamma$	Winkel der Strahlablenkung	°
$\lambda$	Wellenlänge	nm
$\mu$	Mittelwert	
$\nu$	kinematische Viskosität	$\text{m}^2/\text{s}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\sigma$	Standardabweichung	
$\theta$	Winkel zwischen den sich kreuzenden Laserstrahlen	°

### **Tiefgestellte Zeichen**

<i>ges</i>	Gesamt
<i>krit</i>	kritisch
<i>max</i>	Maximum
<i>sys</i>	systematisch
<i>zuf</i>	zufällig

# Kapitel 1

## Einleitung

Im Jahr 2021 betrug der Anteil der erneuerbaren Energie an der Stromerzeugung in Österreich fast 79%. Dazu zählt neben der Stromproduktion durch Windkraft und Sonnenenergie auch die Nutzung der Wasserkraft, die rund 73% der erneuerbaren Energie ausmacht[10]. Durch die geographischen Gegebenheiten, wie große Flüsse und die möglichen Stauseen in den Gebirgen, eignet sich Österreich ganz besonders für die Nutzung von Wasserkraft. Diese kann aber nicht nur zur Stromproduktion herangezogen werden. Ein weiterer positiver Aspekt der Wasserkraftnutzung liegt auch im Hochwasserschutz und in der Netzregulierung.

Je nach Anforderung und Einsatzbereich kommen unterschiedliche Turbinen zum Einsatz. Welcher Turbinentyp am Besten für die jeweilige Anwendung geeignet ist hängt primär von der Fallhöhe des Wassers und dem vorhandenen Durchfluss ab. Eine Entscheidungshilfe bietet Abbildung 1.1.

Hier ist ersichtlich, dass für Laufkraftwerke, bei denen meist geringe Fallhöhen aber hohe spezifische Drehzahlen  $n_q$  auftreten, primär Kaplan-turbinen zum Einsatz kommen. Wohingegen bei Kraftwerken mit sehr großen Fallhöhen und relativ niedriger spezifischer Drehzahl, Francis- und Pelton-Turbinen vorzuziehen sind. [12]

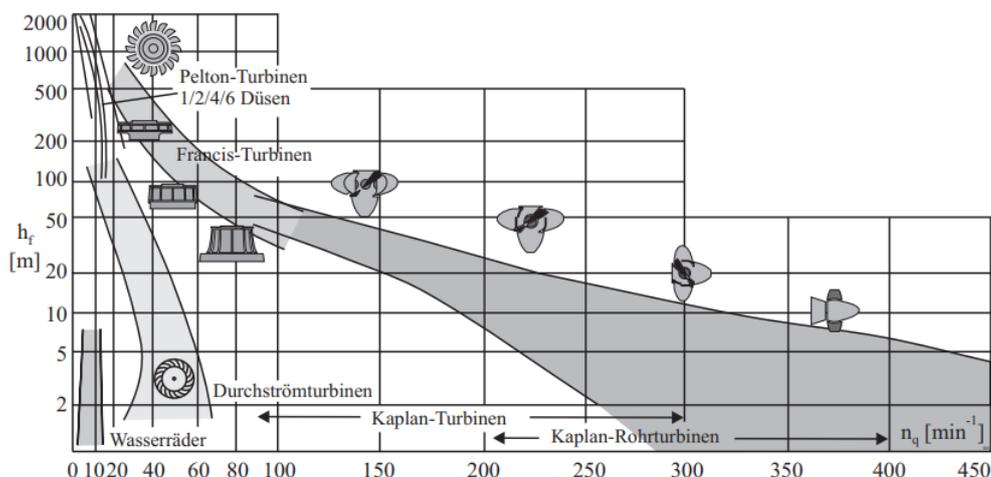


Abbildung 1.1: Einsatzbereich der unterschiedlichen Turbinentypen [12]

## 1.1 Peltonturbine

Die Pelton-Turbine, die im Gegensatz zur Kaplan- und Francis-Turbine zu den Freistrahlturbinen oder Gleichdruckturbinen zählt, wurde 1879 von Lester Allan Pelton erfunden. Ihr Einsatzbereich befindet sich meist in Berggebieten bei Speicherkraftwerken mit Fallhöhen von 550-2200 m und relativ geringen spezifischen Drehzahlen  $n_q$  von etwa 1-30 Umdrehungen pro Minute. Sie können dabei Leistungen von wenigen kW bis zu über 400 MW erzielen. Das Pelton-Laufrad ansich zeichnet sich durch die becherförmigen Schaufeln rund um seinen Umfang aus. Dieses kann entweder mit horizontaler oder vertikaler Welle verbaut sein und mit ein- bis sechs Düsen beaufschlagt werden. Bis heute wurden in Kraftwerken Peltonturbinen mit horizontaler Welle meist nur maximal zweidüsig verbaut, wohingegen ab drei Düsen üblicherweise eine vertikaler Bauweise mit Ringleitung gewählt wurde. Aktuell gibt es allerdings Forschungsprojekte in denen mehrdüsig Peltonturbinen mit horizontaler Welle untersucht und geplant werden. Erst 2022 wurde ein solches Konzept erstmalig von der Firma Voith in einer Realanlage, dem Kraftwerk Gerlos, verbaut.[12] [16] [26]

In Abbildung 1.2 ist der Aufbau und die wichtigsten Bestandteile einer vertikalen sechsdüsig Pelton-Turbine dargestellt.

Trifft der Wasserstrahl das Peltonlaufrad wird hydraulische Energie in mechanische umgewandelt und so das Laufrad angetrieben. Dabei wird der Wasserstrahl beim Auftreffen auf die Becherschneide geteilt und anschließend in den Bechern um ca.

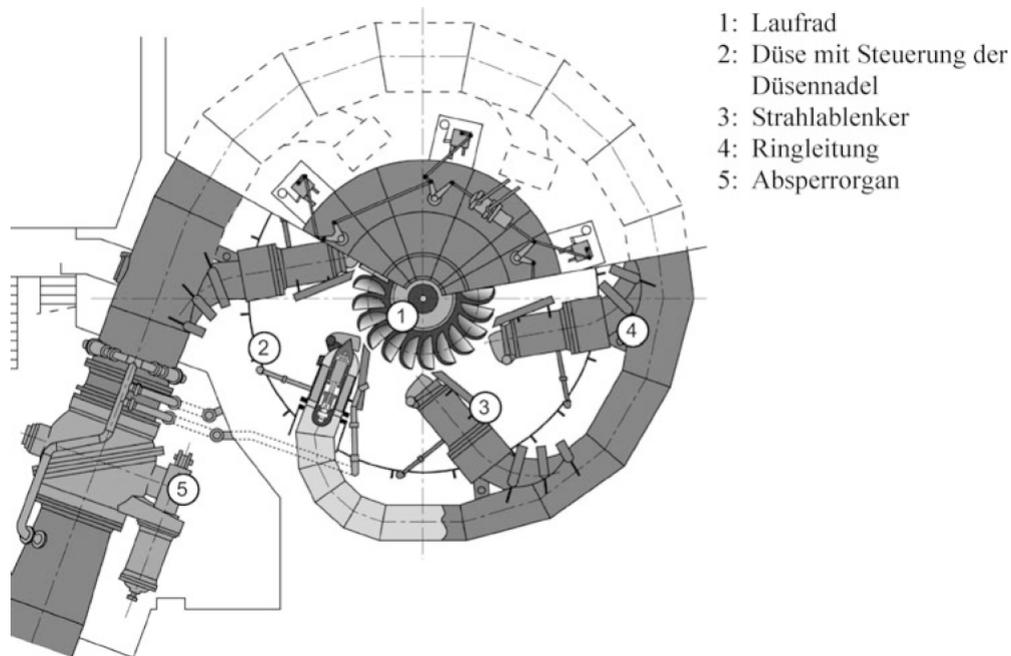


Abbildung 1.2: 6-düsige Pelton-turbine mit vertikaler Welle [23]

170° umgelenkt wodurch eine Impulskraft entsteht die das auf das Laufrad wirkende Drehmoment bewirkt. [26] [12] [1]

## 1.2 Aufgabenstellung und Motivation

Pelton-turbine weisen mit Wirkungsgraden bis zu 93% bereits eine sehr hohe Effizienz auf [1]. Durch ihren sehr flachen Wirkungsgradverlauf eignen sie sich daher sehr gut für einen breiten Betriebsbereich. Das Pelton-Laufrad ansich ist schon stark erforscht und weiterentwickelt worden, hier lässt sich an der Effizienz wohl nicht mehr viel verbessern. Ein weitaus größeres Potential der Effizienzsteigerung liegt aber in der Qualität der Wasserführung, sowohl bei der Zuleitung des Wassers zur Turbine, als auch bei der Wasserableitung im Gehäuse. Es gilt, je besser die Strahlqualität des Freistrahls ist, umso besser ist die Energieumsetzung am Laufrad, daher werden im Zuge dieser Diplomarbeit Messungen zur Untersuchung der Strömung einerseits in der Rohrleitung vor der Düse, aber auch im Freistrahл unternommen. Hierfür soll im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen ein Peltondüsenprüfstand mit gerader Zuleitung aufgebaut werden um Messmethoden

für spätere geplante Forschungsprojekte zu erproben und Vergleichsdaten für eben-  
genannte Projekte zu erhalten. Zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit in der  
Rohrleitung wird die Laser-Doppler-Anemometrie (kurz: LDA) zur Anwendung  
kommen. Die Strahlqualität des Freistrahls wird mithilfe optischer Strahlanalyse  
ermittelt werden. Auch wenn aufgrund der langen geraden Zuleitung theoretisch  
von einer ungestörten Zuströmung ausgegangen werden kann, wäre es möglich,  
dass durch die Pumpe an Krümmern und Absperrorganen Wirbel ungünstig an-  
geregt werden, die sich in der Rohrleitung fortpflanzen können. Daher liegt ein  
wesentliches Ziel dieser Arbeit darin die vorherrschende Strömungszustände in der  
Rohrleitung festzustellen. Ein weiteres Hauptaugenmerk liegt bei diesen Messungen  
auf der Variation verschiedener Parameter um zu analysieren welches Setup für  
zukünftige Messungen anzuwenden ist. Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen auch  
als Voruntersuchung zu weiterführenden Forschungsprojekten des Forschungsbe-  
reichs für Strömungsmaschinen, wobei in weiterer Folge ein neuartiges Konzept  
der Wasserführung mit einer sechsdüsigen, horizontalen Verteilleitung zu einer  
Pelton-turbine untersucht werden soll.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Peltondüse

In einer Peltondüse, oder auch Injektor genannt, wird zunächst die anliegende potentielle Energie, die sich aus dem geodätischen Höhenunterschied zwischen dem Oberwasserniveau und der Turbine ergibt, in kinetische Energie umgewandelt. Diese äußert sich in Form des Wasserstrahls dessen Strahlgeschwindigkeit, unter Vernachlässigung von Verlusten, mit nachfolgender Formel berechnet werden kann. [12] [26]

$$c_0 = \sqrt{2gH} \quad (2.1)$$

Dabei steht  $c_0$  für die Strahlgeschwindigkeit,  $g$  für die Erdbeschleunigung und  $H$  für die anliegende Fallhöhe. Diese setzt sich aus dem gemessenen Druck  $p_m$ , dem Umgebungsdruck  $p_0$ , der Dichte  $\rho$ , der Erdbeschleunigung  $g$ , der geodätischen Höhe der Düse  $z_D$ , der geodätischen Höhe des Manometers  $z_m$  und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Messquerschnitt  $c$  folgendermaßen zusammen:

$$H = \frac{p_m - p_0}{\rho \cdot g} - (z_D - z_m) + \frac{c^2}{2g} \quad (2.2)$$

Der Freistrahls kann Strahlgeschwindigkeiten von über 100 m/s erreichen. Im Kraftwerk Bieudron, Grande Dixence in der Schweiz, dass mit einer Bruttofallhöhe von 1883 m als jenes Kraftwerk mit der bisher größten Fallhöhe zählt, ergibt sich damit

für den Freistrahл am Austritt aus der Düse eine Geschwindigkeit von ca 190 m/s was in etwa 690 km/h entspricht. [12]

In Abbildung 2.1 ist eine Schnittansicht durch eine Peltondüse dargestellt. Hier ist rechts, am Austritt aus der Düse, das Düsenmundstück mit einem Durchmesser  $D_0$  ersichtlich. In der Mitte der Düse befindet sich die Düsennadel, deren primäre Aufgabe das Regeln des Durchflusses ist. Diese kann entweder außengeregelt oder innengeregelt sein. [1]

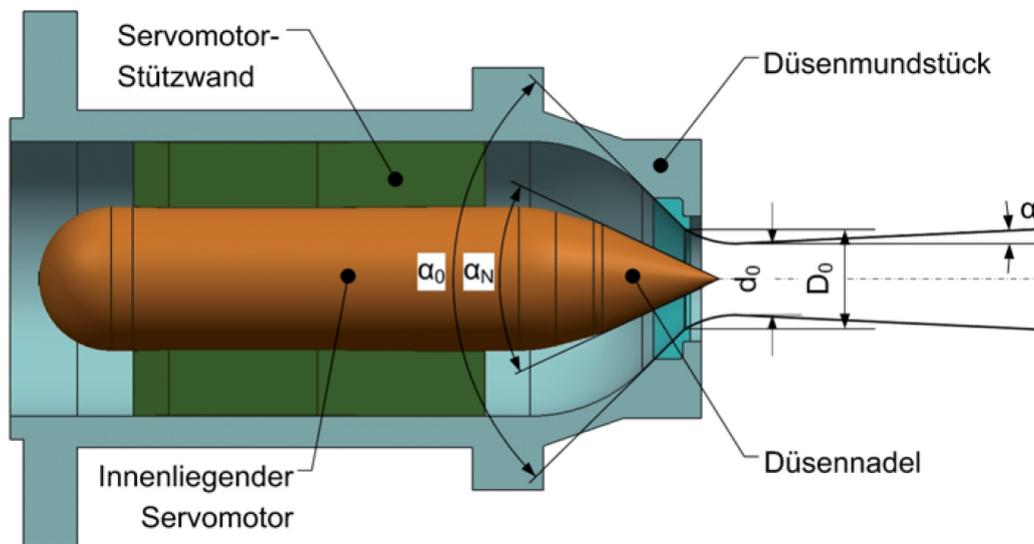


Abbildung 2.1: Schnitt durch eine Peltondüse [21]

Zur Minderung von Druckstößen in der Rohrleitung und um das Durchgehen der Turbine bei größeren Regeleingriffen zu verhindern, können Peltondüsen des Weiteren auch mit Strahlablekern oder Strahlabschneidern ausgestattet sein. Zusätzlich dazu können auch Bremsdüsen zum Einsatz kommen, die im Fall eines Lastabwurfs helfen das Turbinenrad abzubremesen. [1]

Der Freistrahл weist im idealisierten Fall eine konstante Geschwindigkeitsverteilung über den gesamten Querschnitt hinweg auf. In diesem Fall würde sich für den Freistrahл ein theoretischer Strahldurchmesser  $d_0$  von

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}} \quad (2.3)$$

ergeben. In der Realität bewirkt die Grenzschicht an der Düsennadel aber eine

Reduktion der Geschwindigkeit in der Mitte des Freistrahls. Dies führt, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich ist, zunächst dazu, dass sich der Freistrahls nach Austritt aus der Düse einschnürt, bis er seinen minimalen Durchmesser  $d_0$  erreicht und sich anschließend unter dem Winkel  $\alpha$  wieder aufweitet. Die Strahlaufweitung hängt auch damit zusammen, dass der Freistrahls mit zunehmenden Abstand von der Düse mit der angrenzenden Luft interagiert. Gerade in der Scherschicht zur Luft kommt es bei hohen Geschwindigkeiten zu Instabilitäten, wodurch es zu einem Gemisch aus Umgebungsluft und Wasser kommt. Diese Zweiphasenströmung wird auch als Dispersion bezeichnet. [21] [26]

Des Weiteren kann der Freistrahls aufgrund diverser Einbauten, wie zum Beispiel starker Rohrkrümmungen oder Verzweigungen von seiner theoretischen, idealen Strahlachse abgelenkt werden. Dies ist in nachstehender Abbildung 5.14 schematisch dargestellt. [21]

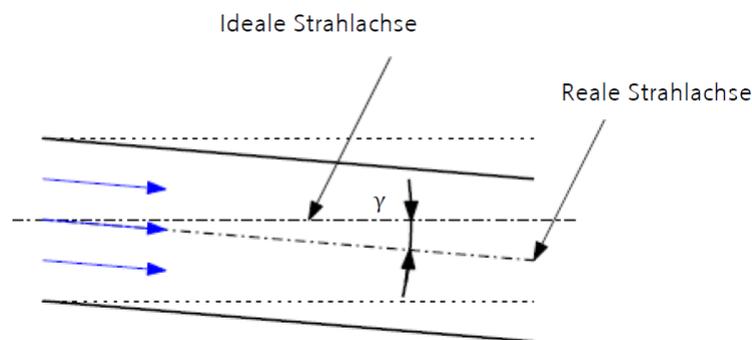


Abbildung 2.2: Ablenkung eines Freistrahls [15]

Wird der Freistahl von seiner theoretischen Achse abgelenkt, kann es dazu führen, dass die Becherschneide des Laufrades nicht mehr mittig getroffen wird, was einerseits zu einer schlechteren Energieumsetzung und andererseits zu hohen lokalen Materialbelastungen und -abtragungen des Laufradbeckers führen kann. In weiterer Folge kommt es auch zu höheren mechanischen Beanspruchungen der Turbinenwelle. In Extremfällen führt eine zu starke Ablenkung des Freistrahls dazu, dass ein Teil des Strahls nicht mehr den Laufradbecher, sondern ungebremst auf andere Einbauten und das Gehäuse trifft. [21]

## 2.2 Laser-Doppler-Anemometrie - LDA

Die Laser-Doppler-Anemometrie zählt zu den optischen Geschwindigkeitsmessverfahren, womit sie zu den berührungslosen, störungsfreien Strömungsmessverfahren zählt. Dadurch eignet sich diese Messmethode ideal zur Erfassung von Strömungsprofilen, da sie im Vergleich zu Strömungsmesssonden die Strömung nicht beeinflusst. Bei dieser Messmethode, die 1964 erstmals von *Yeh und Cummins* beschrieben wurde, wird die Strömungsgeschwindigkeit über Teilchen, die sich in der Strömung befinden, gemessen. [18] [6]

### 2.2.1 Messprinzip und Aufbau

Bei der Laser-Doppler-Anemometrie wird das Streulicht von Partikeln detektiert die sich in der Strömung befinden. Aufgrund der Bewegung der Partikel erfährt das Streulicht eine Frequenzverschiebung, ähnlich dem akustischen Doppler-Effekt. Mithilfe dieser Frequenzverschiebung kann dann auf die Geschwindigkeit der Partikel zurückgeschlossen werden. Als Lichtquelle kommen bei der LDA-Messung kontinuierlich arbeitende Gas- oder Halbleiterlaser zum Einsatz. Diese senden ein monochromatisches, kohärentes Licht hoher Intensität und Bündelung aus. Ein allgemeiner Aufbau eines LDA-Messsystems ist in Abbildung 2.3 dargestellt. [18]

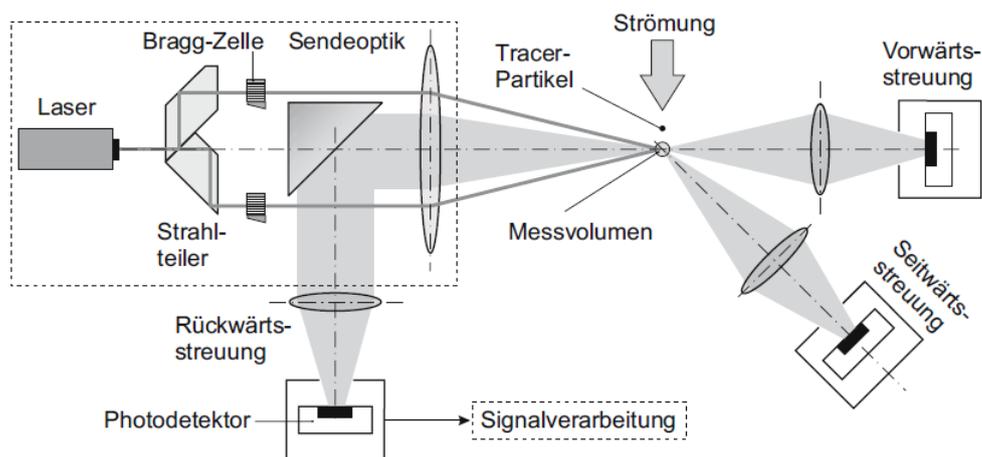
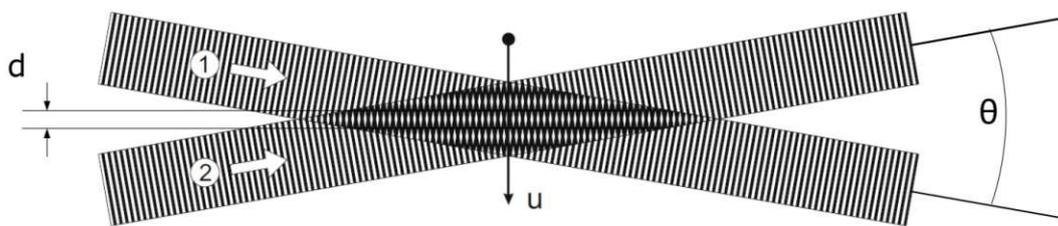


Abbildung 2.3: Allgemeiner Aufbau eines LDA-Messsystems [18]

Zunächst wird der gebündelte Laserstrahl in einem Strahlteiler auf zwei Partialstrahlen aufgeteilt. Einer der beiden Partialstrahlen wird daraufhin durch eine

Bragg-Zelle geleitet, einem akusto-optischen Modulator, wodurch dieser Teilstrahl eine leichte Frequenzverschiebung  $\Delta f_{Bragg}$  erfährt, die aber wesentlich kleiner als die Lichtfrequenz des Lasers ist. Anschließend werden die beiden Lichtstrahlen mithilfe einer Linse fokussiert, deren Brennpunkt wird als Messvolumen bezeichnet. Das Doppler-verschobene Streulicht wird dann mittels Empfangsoptik detektiert. Diese kann sowohl vorwärts, seitlich oder rückwärts angeordnet sein. In der Empfangsoptik wird das Streulicht auf einen Photodetektor geführt und anschließend das erhaltene Signal verarbeitet, wobei mithilfe der Doppler-Frequenz die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden kann.[18] [17]

Das Funktionsprinzip des LDA-Systems lässt sich mithilfe des Interferenzstreifenmodells, siehe Abbildung 2.4, veranschaulichen.



**Abbildung 2.4:** Interferenzstreifenmodell zweier sich kreuzender Laserstrahlen, adaptiert von [18]

Hier sind die beiden sich kreuzenden Laserstrahlen mit ihren ebenen Wellenfronten vereinfacht dargestellt. Durch Überlagerung der Wellenfronten bildet sich im Schnittpunkt der Laserstrahlen ein Interferenzstreifenmuster. Dieses besitzt einen definierten Streifenabstand, der einerseits von der Wellenlänge  $\lambda$  des Laserlichts, aber auch vom Winkel  $\theta$  der sich kreuzenden Laserstrahlen abhängt. Dieser Streifenabstand  $d$  lässt sich mithilfe folgender Formel berechnen:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (2.4)$$

Strömt ein Teilchen durch dieses Interferenzstreifenmuster, dann sendet dieses ein Streulicht aus, dass proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist. Für die Frequenz  $f_D$  des Streulichts, die am Photodetektor registriert wird gilt somit

folgende Beziehung:

$$f_D = \frac{c}{d} \quad (2.5)$$

Somit ergibt sich für die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  folgender Zusammenhang:

$$c = \frac{f_D \cdot \lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (2.6)$$

Das im Schnittpunkt der beiden Laserstrahlen entstehende Messvolumen hat die Form eines räumlichen Ellipsoids, siehe Abbildung 2.5. Dessen Abmessungen lassen sich mit nachstehenden Formeln berechnen. [17]

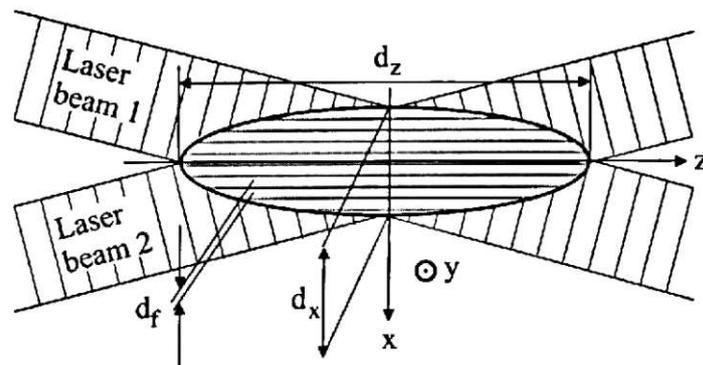


Abbildung 2.5: Abmessungen des Messvolumens [17]

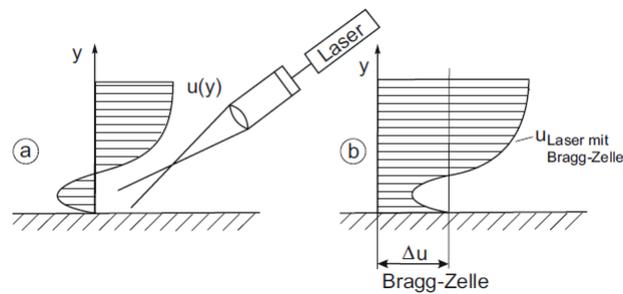
$$d_x = \frac{d_l}{\cos(\frac{\theta}{2})}; d_y = d_l; d_z = \frac{d_l}{\sin(\frac{\theta}{2})} \quad (2.7)$$

$d_l$  bezeichnet dabei den Durchmesser der Laserstrahlen nach ihrem Durchtritt durch die Linse. Dieser Durchmesser lässt sich mithilfe des Durchmessers der Laserstrahlen vor ihrer Umlenkung  $d'_l$  und der Brennweite der Linse  $F$  berechnen durch:

$$d_l = \frac{4\lambda F}{\pi d'_l} \quad (2.8)$$

Wie bereits vorhin erwähnt, durchläuft einer der beiden Partialstrahlen eine Bragg-Zelle, wodurch die Lichtfrequenz dieses Strahls um eine kleine Differenzfrequenz

$\Delta f_{Bragg}$  verschoben wird. Diese ist notwendig, da ohne ihrer Verwendung nur eine Bestimmung des Betrags der Geschwindigkeit, nicht aber des Vorzeichens möglich wäre. Der Einsatz der Bragg-Zelle verursacht, dass das Interferenzstreifenmuster nicht still steht sondern sich mit einer definierten Geschwindigkeit bewegt. Dies führt zu einer Nullpunktverschiebung der Geschwindigkeitsskala, da die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit des mitlaufenden Interferenzmusters überlagert ist. Der Unterschied der Messergebnisse von LDA-Messungen ohne bzw. mit Verwendung einer Bragg-Zelle soll mit Abbildung 2.6 noch einmal veranschaulicht werden. [18]



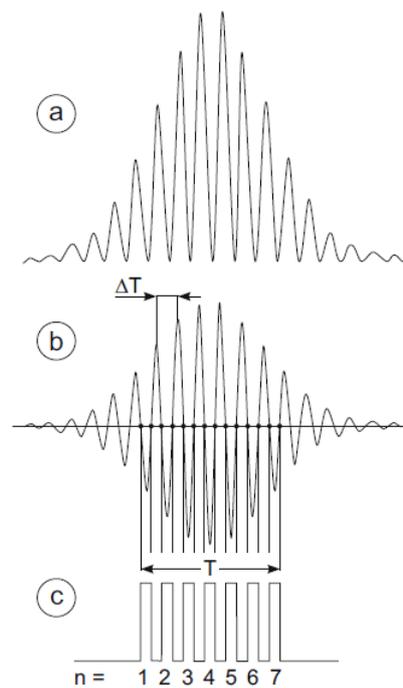
**Abbildung 2.6:** links: tatsächliches Geschwindigkeitsprofil einer Grenzschichtströmung; rechts: detektiertes Geschwindigkeitsprofil unter Verwendung einer Bragg-Zelle [18]

Auf der linken Seite der Abbildung 2.6 ist der Geschwindigkeitsverlauf einer Grenzschichtströmung ohne Verwendung einer Bragg-Zelle exemplarisch dargestellt. Hier erkennt man, dass die Strömungsgeschwindigkeit sowohl im positiven, als auch im negativen Bereich liegt. Mithilfe der Doppler-Frequenz kann allerdings nur der Betrag der Geschwindigkeit ermittelt werden, nicht aber die Richtung wodurch hier die negativen Geschwindigkeiten nicht korrekt erfasst werden würden. Auf der rechten Seite der Abbildung 2.6 ist derselbe Geschwindigkeitsverlauf unter Zuhilfenahme einer Bragg-Zelle dargestellt, wodurch der Verlauf um ein  $\Delta u$  verschoben wird. Die tatsächliche Geschwindigkeit lässt sich dann durch Subtraktion von  $\Delta u$  ermitteln. Dadurch ergibt sich für die korrigierte Geschwindigkeitskomponente folgende Beziehung [18]:

$$c = \lambda \cdot \frac{f_D - \Delta f_{Bragg}}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (2.9)$$

## 2.2.2 Signalverarbeitung

Die Streulichtsignale, die vom Photodetektor aufgenommen werden, können auf verschiedene Arten verarbeitet werden und aus ihnen die Doppler-Frequenz und die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Eine Möglichkeit hierfür ist die Auswertung mittels LDA-Counter. Zur besseren Veranschaulichung ist ein Auswerteschema eines solchen Counters in Abbildung 2.7 dargestellt.

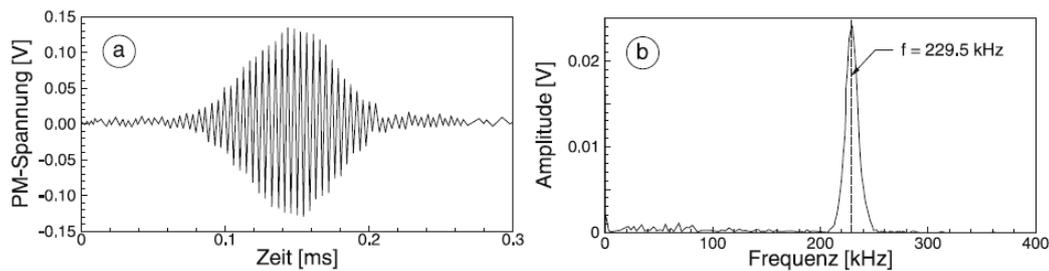


**Abbildung 2.7:** Auswertung eines LDA-Signals mithilfe eines Counters [18]

Hier ist zunächst bei **a** das Rohsignal des Photodetektors ersichtlich. Dabei sind die typischen Intensitätsschwankungen des Lichts gut erkennbar, die ein Partikel beim Durchströmen des Messvolumens erzeugt. Dieses Rohsignal wird mittels Gleichspannungs-Filter gefiltert wodurch ein Signal wie bei **b** ersichtlich entsteht. Anschließend wird dieses Signal mithilfe eines Triggers in ein Rechtecksignal **c** übergeführt, mit dem die Doppler-Frequenz  $f_D$  aus der Anzahl der Rechtecksignale  $n$  und der Messzeit  $T$  bestimmt werden kann. [18]

$$f_D = \frac{1}{\Delta T} = \frac{n}{T} \quad (2.10)$$

Eine weitere Möglichkeit der Signalverarbeitung liegt in der direkten Bestimmung der Doppler-Frequenz mittels Frequenzanalyse. Diese erfolgt meist mithilfe von Fast-Fourier-Transformation (FFT), bei der zunächst die Signalanteile nach der Frequenz sortiert werden, wodurch besonders ausgeprägte Signalanteile der Doppler-Frequenz deutlich hervortreten. Ein Beispiel einer solchen Signalauswertung ist in Abbildung 2.8 dargestellt. [18]



**Abbildung 2.8:** Auswertung eines LDA-Signals mithilfe eines FFT-Analyzator [18]

### 2.2.3 Laser

Bei dem LDA-System, das im Labor vorhanden ist, kommt ein diodengepumpter Festkörperlaser zum Einsatz. Dieser zeichnet sich als kompakte Laserquelle mit gutem Wirkungsgrad und hoher Strahlqualität aus. Dadurch, dass bei dieser Art des Lasers keine Gasentladung zur Anregung dient, bieten diese Laser eine lange Lebensdauer und eine hohe mechanische Stabilität. Aufgrund der Option die Strahlung des Diodenlasers durch Glasfasern leiten zu können, ergeben sich ganz neue und interessante Möglichkeiten für den Aufbau und den Einsatz von Lasersystemen. [7]

## 2.3 Seedings

Bei der Laser-Doppler-Anemometrie wird nicht direkt die Geschwindigkeit des Fluids ansich, sondern eigentlich die Geschwindigkeit der Streupartikel gemessen. Für eine gute Qualität der Messung ist es daher zum einen wichtig, dass die Seedingpartikel gute Lichtstreueigenschaften besitzen. Zum anderen ist es notwendig, dass die Partikel der Strömung gut folgen können, dies hängt stark von der Partikelform, der Partikelgröße und dem Dichteunterschied des Partikel vom Fluid ab. Generell gilt, je kleiner der Dichteunterschied ist, umso besser können die Partikel der Strömung folgen. Weiters wäre es wünschenswert wenn die Seedingpartikel einfach herzustellen und leicht einzubringen sind. Um das Fluid nicht übermäßig zu verunreinigen und das Material der Prüfstands zu schützen sollten die Partikel ungiftig, nicht korrosiv, chemisch inert und nicht verschmutzend wirkend. [6] [5]

In nachstehender Tabelle sind einige Beispiele für Seedingpartikeln für Messungen in Flüssigkeiten zusammengefasst. [6] [3]

Seedingpartikel	Teilchendurchmesser	Dichte
natürlicher Schmutz	$< 5 \mu\text{m}$	-
Luftblasen	1 bis $50 \mu\text{m}$	$1.3 \text{ kg/m}^3$
Polyamid Seeding Partikel(PSP)	5, 20, $50 \mu\text{m}$	$1.03 \text{ kg/m}^3$
Fluoridierende Polymer Partikel(FPP)	1 bis $20 \mu\text{m}$	$1.5 \text{ kg/m}^3$
Hohle Glaskugeln	2 bis $20 \mu\text{m}$	$1.1 \text{ kg/m}^3$
Silber beschichtete hohle Glaskugeln	2 bis $20 \mu\text{m}$	$1.2 \text{ kg/m}^3$

**Tabelle 2.1:** Geeignete Seedingpartikel für Messungen in Flüssigkeiten

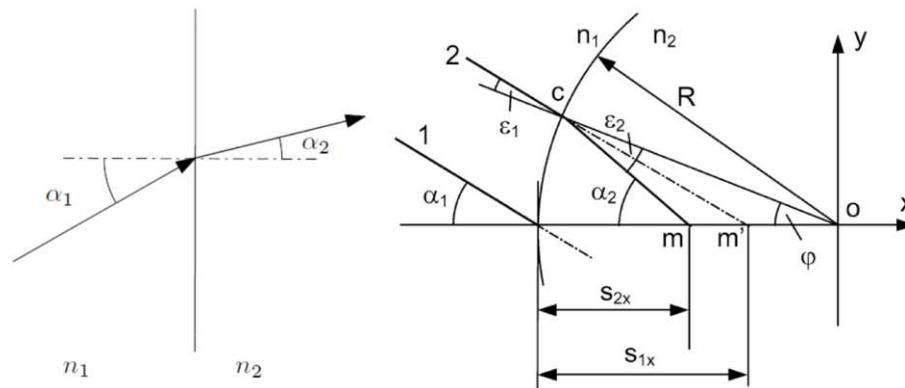
## 2.4 Brechung von Licht

Um LDA-Messungen in einer Rohrleitung zu ermöglichen, ist eine optische, transparente Zugänglichkeit der Laserstrahlen zur Strömung unumgänglich. Dabei ist zu beachten, dass der Durchtritt der Laserstrahlen durch unterschiedliche Medien zu Reflexionen und Brechung der Strahlen führt. Dieses Phänomen ist bei der Berechnung der Messpositionen und dem damit verbundenen Verfahrensweg des Lasers zu berücksichtigen.

Wenn ein Lichtstrahl unter dem Einfallswinkel  $\alpha_1$  auf eine Grenzfläche auftrifft, wird dieser gemäß dem *Snelliusschen Brechungsgesetz* abgelenkt. Dieses lautet:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \quad (2.11)$$

Eine solche Umlenkung, sowohl für ebene Grenzflächen, als auch für runde Grenzflächen, ist graphisch in Abbildung 2.9 dargestellt:



**Abbildung 2.9:** links: Brechung von Lichtstrahlen an einer ebenen Grenzfläche [11], rechts: Brechung von Lichtstrahlen an einer runden Grenzfläche [24]

Dabei geben  $n_1$  und  $n_2$  die Brechungsindizes der unterschiedlichen Medien an. Je mehr sich die beiden Brechungsindizes  $n_1$  und  $n_2$  unterscheiden, desto stärker wird der Lichtstrahl abgelenkt. Materialien mit höherem Brechungsindex bezeichnet man als optisch dichter, jene mit niedrigerem Brechungsindex als optisch dünner. In nachstehender Tabelle 2.2 sind einige Brechungsindizes exemplarisch angeführt. [13]

Bei runden Grenzflächen erfolgt die Brechung des Lichts nach den selben Gesetzmäßigkeiten. Allerdings ist je nach Position des einfallenden Lichtstrahls der Winkel der Tangentialebene unterschiedlich, wodurch der einfallende Strahl je nach Position unterschiedlich stark abgelenkt wird. Der Winkel der Umlenkung lässt sich wie folgt berechnen [24]:

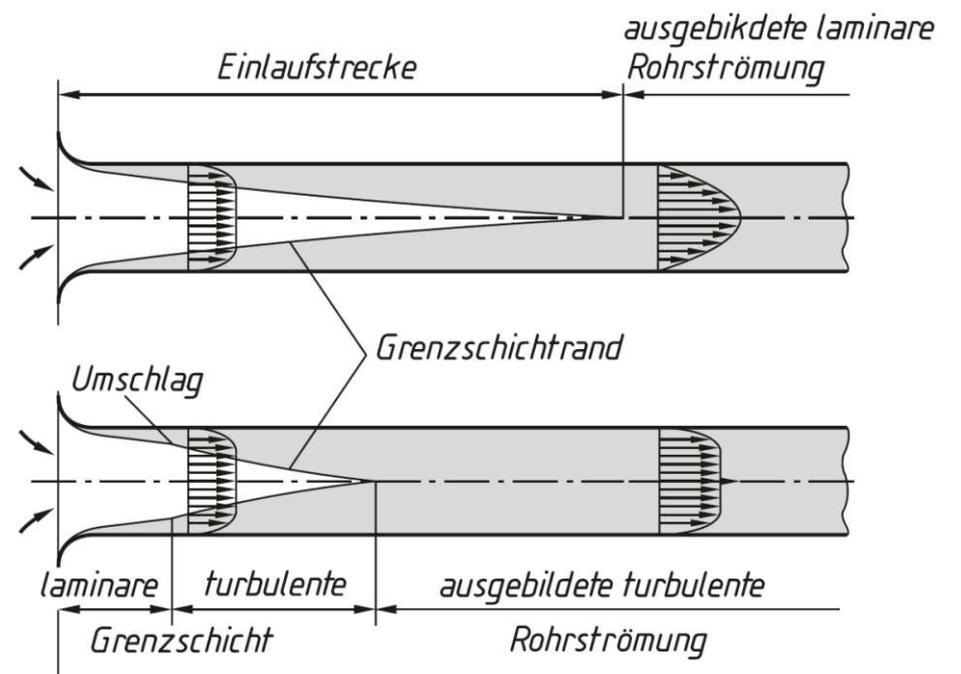
$$n_1 \sin(\alpha_1 - \varphi) = n_2 \sin(\alpha_2 - \varphi) \quad (2.12)$$

Material	Brechungsindex $n$
Luft	1,00
Wasser	1,33
Acrylglas	1,49
Glas	1,45 bis 1,60
Diamant	2,42

**Tabelle 2.2:** Brechungsindizes  $n$  für verschiedene Materialien bei 20 °C und  $\lambda = 590 \text{ nm}$

## 2.5 Rohrströmung

Wenn Wasser durch eine Rohrleitung strömt, bildet sich nach einer gewissen Einlaufstrecke eine typische Strömungscharakteristik aus. Dabei unterscheidet man, ob es sich um eine laminare oder turbulente Rohrströmung handelt. Wie sich die unterschiedlichen Rohrströmungen aus der Ruhe entwickeln ist in Abbildung 2.10 ersichtlich.



**Abbildung 2.10:** laminare und turbulente Rohrströmung [2]

Eine laminare Rohrströmung zeichnet sich durch ein Parabelförmiges Strömungsprofil

aus, wohingegen das Strömungsprofil einer turbulenten Rohrströmung in der Mitte des Rohres ein relativ flaches Strömungsprofil aufweist, das zur Wand hin steil abfällt. Für die Zuteilung ob eine Rohrströmung laminar oder turbulent ist, wird die dimensionslose Kennzahl Reynoldszahl  $Re$  herangezogen. Diese ist mithilfe der charakteristischen Strömungsgeschwindigkeit  $c$ , der charakteristischen Länge  $d$  und der kinematischen Viskosität  $\nu$  folgendermaßen definiert:

$$Re = \frac{cd}{\nu} \geq Re_{krit} = 2320 \quad (2.13)$$

Die kritische Reynoldszahl  $Re_{krit} = 2320$  gibt dabei jenen Grenzwert an, ab dem die laminare Strömung instabil wird und diese daher bei geringer Störung in eine turbulente Strömung umschlagen kann. [2]

In technischen Anwendungen tritt in den meisten Anwendungen turbulente Rohrströmung auf. Daher ist diese wesentlich wichtiger, aber aufgrund der vorherrschenden makroskopischen Mischbewegungen wesentlich komplexer zu beschreiben als laminare Rohrströmungen. Eine Näherungsformel für das Geschwindigkeitsprofil einer turbulenten Strömung, die nach Auswertung einer umfangreichen experimentellen Versuchsreihe von *NIKURADSE* aufgestellt wurde, lautet:

$$c(r) = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)\right)^n \cdot c_{max} \quad (2.14)$$

Dabei gibt  $R$  den Radius der Rohrleitung und  $c_{max}$  die maximale Geschwindigkeit in der Rohrmitte an. Der Exponent  $n$  ist abhängig von der Reynoldszahl und kann folgender Tabelle in Abbildung 2.11 entnommen werden. [20]

$Re$	$4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$	$(2 \dots 3,2) \cdot 10^6$
$n$	1/6	1/6,6	1/7	1/8,8	1/10

**Abbildung 2.11:** Exponent  $n$  des turbulenten Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit von der Reynoldszahl [20]

## 2.6 Turbulenzgrad

Im Unterschied zur laminaren Strömung, bei der ein geordnetes Strömungsbild vorherrscht, wird bei der turbulenten Strömung die Grundströmung von ungeordneten, zufällig auftretenden Schwankungsbewegungen in Quer- und Längsrichtung überlagert. Die Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung setzt sich daher aus den Mittelwerten der Geschwindigkeiten  $\overline{c_x}$ ,  $\overline{c_y}$ ,  $\overline{c_z}$  und ihren unregelmäßigen Schwankungen  $c'_x$ ,  $c'_y$ ,  $c'_z$  zusammen. Die Strömungsmittelwerte turbulenter Strömungen sind stabil, wohingegen die Schwankungswerte unregelmäßig sind und aufgrund des starken Impulsaustausches wesentlich höhere Schubspannungen bewirken.

Die Intensität der Turbulenz lässt sich mithilfe des Turbulenzgrades  $Tu$  bestimmen.

$$Tu = \frac{1}{c_\infty} \sqrt{\frac{1}{3}(\overline{c_x'^2} + \overline{c_y'^2} + \overline{c_z'^2})} \quad (2.15)$$

Während die Schwankungsmittelwerte  $\overline{c'_x}$ ,  $\overline{c'_y}$  und  $\overline{c'_z}$  definitionsgemäß Null ergeben, sind die zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Schwankungsgeschwindigkeiten  $\overline{c_x'^2}$ ,  $\overline{c_y'^2}$  und  $\overline{c_z'^2}$  üblicherweise ungleich Null.  $c_\infty$  gibt die ungestörte Strömungsgeschwindigkeit in großem Wandabstand an. Üblicherweise liegt der Turbulenzgrad bei turbulenten Strömungen im Bereich  $Tu \approx 0, 1$ . [20]

# Kapitel 3

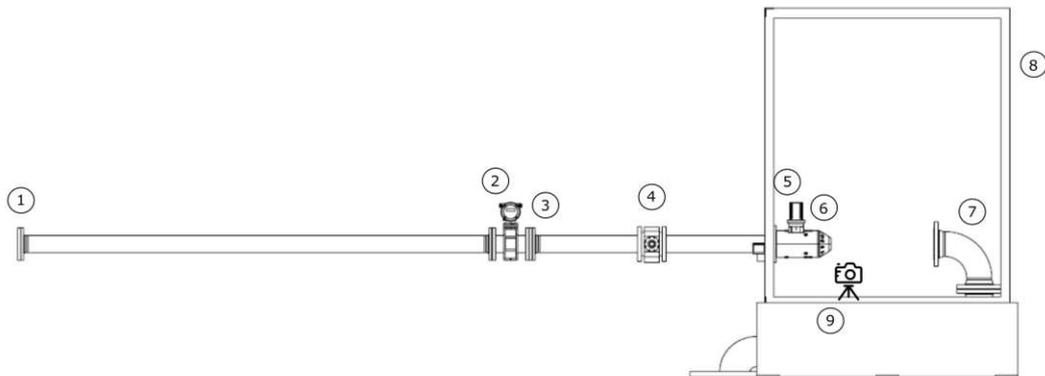
## Versuchsaufbau und Instrumentierung

Der zu untersuchende Peltondüsenprüfstand, der im Zuge dieser Diplomarbeit aufgebaut wurde, befindet sich im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen des Instituts für Thermodynamik und Energietechnik, im Science Center der TU Wien. Hier steht ausreichend Platz, sowohl für dauerhaft installierte, aber auch für temporäre Prüfstände zur Verfügung, die für Lehre, Abschlussarbeiten und Forschungsprojekte vielseitig einsetzbar sind. Mithilfe mehrerer Versorgungspumpen wird das Wasser, welches auf  $18 - 20^{\circ}\text{C}$  reguliert wird, ausgehend von einem  $500\text{ m}^3$  Tiefbecken zu den einzelnen Prüfständen befördert.

### 3.1 Aufbau des Peltondüsenprüfstands

Beim Peltondüsenprüfstand handelt es sich um einen temporär aufgebauten Prüfstand, der für die Durchführung von Messungen mehrerer Diplomarbeiten, aber auch für Voruntersuchungen zu einem laufenden Forschungsprojekt genutzt wird. Dabei handelt es sich um einen offenen Versuchskreislauf. Die benötigte Fallhöhe wird dabei von den zuvor genannten Versorgungspumpen aufgebaut. In Abbildung 3.1 ist der Versuchsaufbau des Peltondüsenprüfstands und dessen wichtigste Bestandteile dargestellt.

Da bei diesem Prüfstand die Geschwindigkeitsverteilung und der Freistrahleiner ungestörter Zuströmung untersucht werden sollen, wurde hier auf eine ausreichend

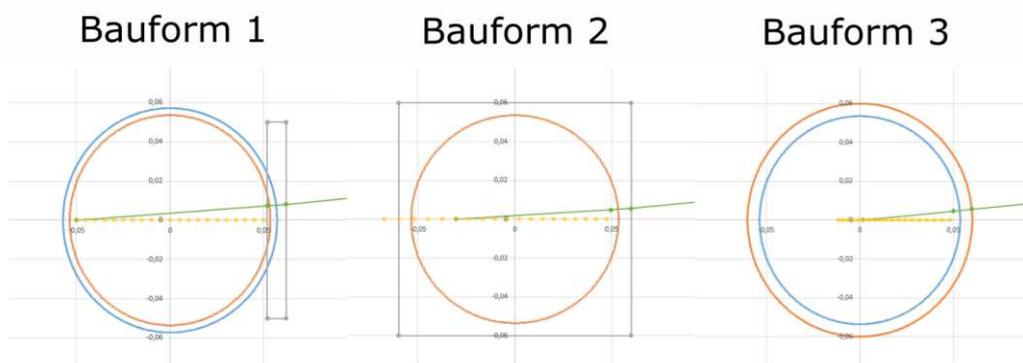


**Abbildung 3.1:** Messaufbau des Peltondüsenprüfstands: **1** Flansch 1 zur Seedingeinbringung, **2** Durchflusssensor, **3** Flansch 2 zur Seedingeinbringung, **4** LDA Messfenster, **5** Düse mit Schrittmotor, **6** Druckmessstelle, **7** Wasserableitung, **8** Gehäuse, **9** Position der Kamera

lange, gerade Zuleitung ohne Einbauten geachtet. Um ein homogenes Strömungsprofil zu erhalten wurde eine gerade Zuleitung mit einer Nennweite von DN100 und einer Länge von mehr als 70 mal dem Rohrdurchmesser verbaut. An den Stellen **1** und **3** befinden sich zwei mögliche Stellen für die Seedingeinbringung. Dabei handelt es sich je um einen Flansch mit vier Bohrungen, die gleichmäßig um den Umfang verteilt liegen. Der Durchfluss wird an der Stelle **2** mithilfe eines magnetisch induktiven Durchflusssensors gemessen. An der Position **4** befindet sich das Messfenster für die LDA-Messungen in der Rohrleitung. Am Ende der geraden Zuleitung befindet sich die Peltondüse(**5**), welche mit einem Antriebsmotor zur Verstellung der Düsennadel ausgestattet ist. Der Wanddruck, der zur Ermittlung des statischen Anteils der Fallhöhe benötigt wird, wird an Position **6** gemessen. Mithilfe von zwei 90° Rohrkrümmern wird an der Stelle **7** das Wasser des Freistrahls umgelenkt und fließt dann über das Gehäuse (**8**) wieder in das Tiefbecken ab. Für die optische Strahlanalyse des Freistrahls ist die Position der Kamera an der Stelle **9** schematisch dargestellt.

### 3.1.1 Messfenster für LDA-Messungen

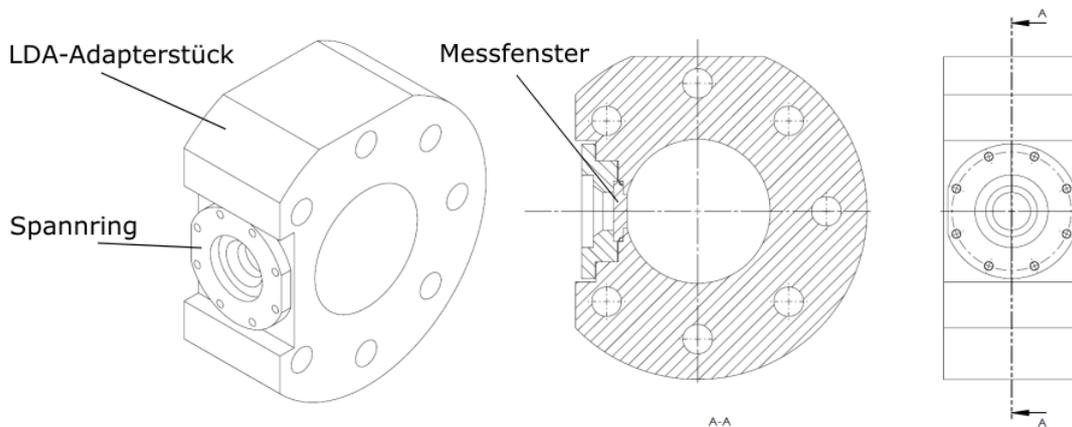
Um eine Geschwindigkeitsmessung in der Rohrleitung mittels Laser-Doppler-Anemometrie zu ermöglichen, ist eine optische Zugänglichkeit zur zu vermessenden Strömung erforderlich. Daher wurde im Zuge dieser Diplomarbeit ein Messfenster konstruiert und gefertigt. Hierfür wurde während der Planung auch eine Voruntersuchung unternommen, bei der insbesondere die Brechung der Laserstrahlen durch unterschiedlich geformte Oberflächen betrachtet wurde. Dabei wurden drei unterschiedliche Fälle untersucht und miteinander verglichen. Bei den drei unterschiedlichen Geometrien, die in Abbildung 3.2 ersichtlich sind, handelt es sich zum einen um eine Bauform mit zwei ebenen Flächen. Die zweite betrachtete Geometrie hat an der Innenseite eine an die Rohrleitung angepasste gekrümmte Oberfläche und außen eine ebene Oberfläche. Bei der dritten Bauform handelt es sich um ein Bauteil, das sowohl außen als auch innen eine sphärische Oberfläche aufweist.



**Abbildung 3.2:** Voruntersuchungen Messfenstergeometrie

Die Betrachtung hat gezeigt, dass die erste Bauform zwar die Strömung etwas beeinflussen könnte, aber den großen Vorteil hat, dass die horizontalen und vertikalen Strahlenpaare des Lasers gleichermaßen umgelenkt werden, wodurch sowohl die Transportkomponente als auch die Sekundärkomponente für alle Messpunkte des Querschnitts auf einmal gemessen werden können was zu einer enormen Zeiterparnis bei den Messungen gegenüber der anderen Geometrien führt. Zusätzlich dazu ist das Einrichten des Lasers auf einer ebenen Oberfläche deutlich einfacher, als auf einer gekrümmten Oberfläche. Die beiden anderen Bauformen haben zwar den Vorteil, dass die Strömung nicht beeinflusst wird, da die innere Kontur an die der Rohrleitung angepasst ist, allerdings werden die horizontalen und vertikalen Strahlenpaare unterschiedlich stark umgelenkt wodurch die Brennpunkte der beiden

Strahlenpaare voneinander abweichen. Dies hätte zur Folge, dass sich unterschiedliche Verfahrenswege für die Messung der beiden Geschwindigkeitskomponenten ergeben und diese dadurch auch getrennt gemessen werden müssen. Am stärksten ausgeprägt ist die Abweichung bei Bauform 3. Diese beträgt im Maximalfall 30% des Rohrinnendurchmessers. Ein weiterer Vorteil der Bauform 1 ist, dass die Messvolumina aufgrund der ebenen Brechung immer gleich groß bleiben, was bei den beiden anderen Geometrien nicht der Fall ist. Weiters ist es bei Lasermessungen wichtig, dass die Oberflächen, durch die die Laserstrahlen durchtreten von bester Qualität sind, damit die Strahlen durch Unebenheiten und Rauigkeiten nicht zusätzlich gestreut werden. Bei den beiden Bauformen 2 und 3 wäre eine Bearbeitung des Materials erforderlich um diese Innenkontur zu erzeugen, was einen sehr hohen Aufwand der Nachbearbeitung und Politur zur Folge hätte. Bei der Bauform 1 kann allerdings auf Rohmaterial in der passenden Stärke zurückgegriffen werden. Nachdem hier die Oberfläche nicht bearbeitet werden muss, kann hier von einer höheren Genauigkeit und einer besseren Oberflächenqualität ausgegangen werden, als wenn diese noch nachbearbeitet werden müsste. Aus all diesen Gründen wurde entschieden das Messfenster mit der Bauform 1 umzusetzen.

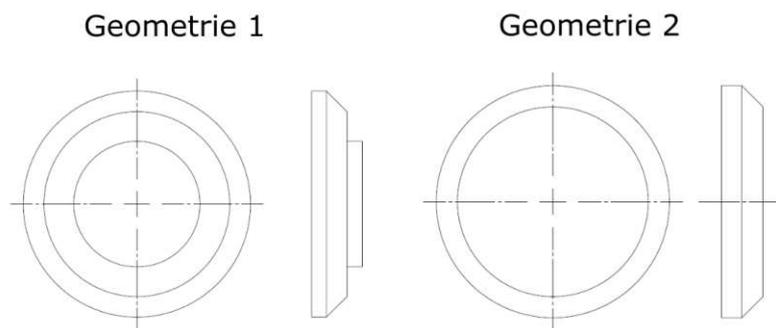


**Abbildung 3.3:** Bauteil für LDA-Messungen

Das Bauteil, welches für die LDA-Messungen gefertigt wurde, ist in Abbildung 3.3 ersichtlich. Es besteht aus drei Hauptkomponenten: dem LDA- Adapterstück, dem Spannring und dem Messfenster. Das LDA-Adapterstück wurde aus einem runden Aluminium Block gefertigt und kann zwischen zwei geraden Rohrstücken eingeschraubt werden. Die beiden angrenzenden Rohrstücke wurden mit Losflanschen versehen um eine präzise Ausrichtung des Bauteils zu ermöglichen. Der Spann-

ring, der ebenfalls aus Aluminium hergestellt wurde, dient zur Befestigung des Messfensters. Hier wurde bei der Konstruktion darauf geachtet, dass ein Tauschen des Messfensters möglich ist, ohne dass dieses auf der Durchtrittsfläche der Laserstrahlen berührt werden muss, um ein Verdrecken der Scheibe zu verhindern.

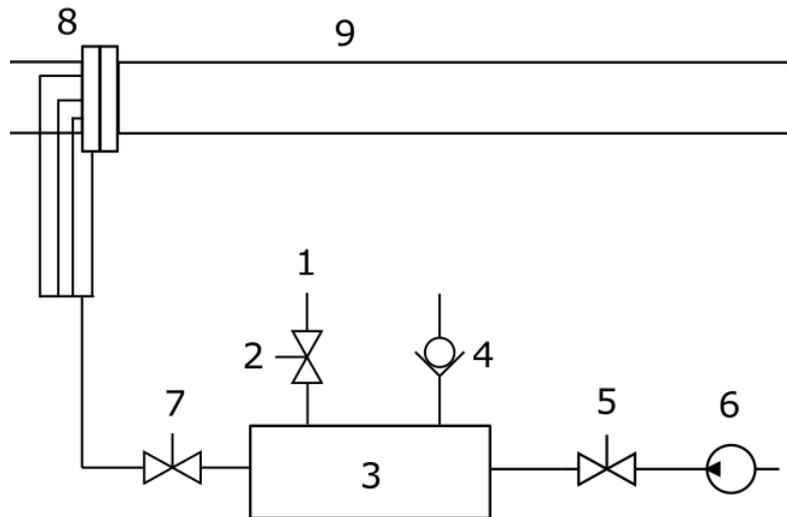
Für das Messfenster, durch das die Laserstrahlen durchtreten, wurden zwei Geometrien entworfen welche in weiterer Folge bei den Messungen verglichen werden sollen. Bei Geometrie 1, welche in Abbildung 3.4 ersichtlich ist, handelt es sich um eine Variante mit Stufe, bei der das Fenster leicht in die Strömung hineinragt, wohingegen bei Geometrie 2 auf diese Stufe verzichtet wurde. Beide Fenster wurden aus Acrylglas gefertigt.



**Abbildung 3.4:** Fenstergeometrien: Links Geometrie 1 mit Stufe, Rechts Geometrie 2 ohne Stufe

### 3.1.2 Seedingeinbringung

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, ist es bei LDA-Messungen erforderlich Seedings in die Strömung einzubringen. In Abbildung 3.5 ist ein Schema des Aufbaus zur Seedingeinbringung ersichtlich. Das Seeding-Wasser-Gemisch wird bei **1** dem Mischer (**3**) zugeführt. An der Stelle **4** befindet sich ein Entlüftungsventil. Dieses ermöglicht den Austritt der Luft aus dem Mischer während dieser befüllt wird. Mithilfe der Pumpe (**6**) gelangt das Seeding-Wasser-Gemisch über den Flansch 1 bzw Flansch 2 (**8**) in die Rohrleitung (**9**). An den Positionen **2**, **5** und **7** sind Kugelhähne verbaut, die für die einzelnen Prozesse wie der Befüllung des Mixers, der Eindüsung des Seeding-Wasser-Gemisches in die Rohrleitung und der Entleerung des Mixers, benötigt werden.



**Abbildung 3.5:** Aufbau der Seedingeinbringung: **1** Einfüllöffnung für das Seeding-Wasser-Gemisch, **2** Kugelhahn, **3** Mischer, **4** Entlüftungsventil, **5** Kugelhahn, **6** Pumpe, **7** Kugelhahn, **8** Flansch zur Seedingeinbringung, **9** Rohrleitung

Als Pumpe kam eine Prüfpumpe RP 50 der Marke Rothenberger zum Einsatz. Die Positionen der beiden möglichen Flansche zur Seedingeinbringung sind in Abbildung 3.1 ersichtlich. Diese sind jeweils mit vier Bohrungen, gleichmäßig um den Umfang verteilt, versehen um eine gleichmäßige Verteilung der Seedings in der Strömung zu ermöglichen.

## 3.2 Messtechnik

Zur Messung der benötigten Messgrößen und um eine Anzeige des vorherrschenden Betriebspunktes zu ermöglichen, ist der Peltondüsenprüfstand mit einem Durchflusssensor und einem Drucksensor versehen. Zur Aufnahme und Verarbeitung der Messsignale wird ein Chassis cDAQ-9188 von National Instruments verwendet. Des Weiteren erfolgt über dieses Chassis auch die Ansteuerung des Schrittmotors zur Verstellung und Regelung der Düsennadel. In nachfolgender Tabelle 3.1 werden die verwendeten Messkarten angeführt. Eine detaillierte Beschreibung der weiteren Sensorik, mitsamt ihrer Messbereiche und Skalierung folgt anschließend.

Messkarte	Verwendung
NI 9486	Ansteuerung des Schrittmotors zur Verstellung der Düsennadel
NI 9401	Ansteuerung des Schrittmotors zur Verstellung der Düsennadel
NI 9203	Druckmessung
NI 9203	Durchflussmessung

**Tabelle 3.1:** Verwendete Messkarten

### 3.2.1 Durchflussmessung

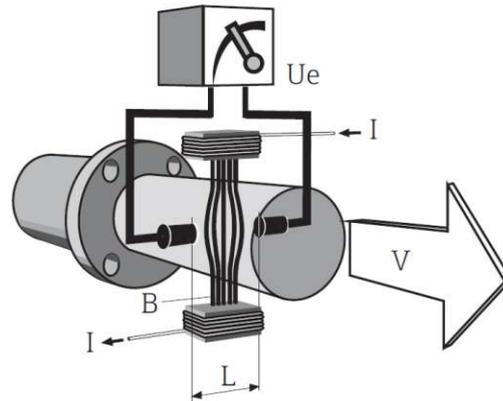
Beim Peltondüsenprüfstand ist ein magnetisch induktiver Durchflusssensor des Herstellers Endress + Hauser verbaut. Die wichtigsten Daten des Sensors sind nachstehend in 3.2 zusammengefasst.

<b>Hersteller</b>	Endress + Hauser
<b>Sensorbezeichnung</b>	Promag W
<b>Messprinzip</b>	Magnetisch induktiver Durchflusssensor
<b>Messbereich elektrisch</b>	0 bis 20 mA
<b>Messbereich physikalisch</b>	0 bis 60 l/s
<b>Genauigkeit</b>	$\pm 0,2\%$ vom Messwert

**Tabelle 3.2:** Sensordaten des Durchflusssensors

Bei einem magnetisch induktiven Durchflusssensor wird, wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, über den gesamten Querschnitt ein Magnetfeld mithilfe von getaktetem

Gleichstrom wechselnder Polarität erzeugt. Bewegt sich nun ein Leiter durch dieses magnetische Feld, wird gemäß dem *Faraday'schen Induktionsgesetz* Spannung induziert. Diese Spannung, die mithilfe zweier seitlich angeordneter Messelektroden erfasst wird, ist proportional zur Geschwindigkeit, wodurch mithilfe des Rohrquerschnitts der Durchfluss bestimmt werden kann. [9] Diese Messmethode hat den großen Vorteil, dass die Strömung durch die Messung nicht beeinflusst wird.



**Abbildung 3.6:** Messprinzip des magnetisch induktiven Durchflusssensors [9]

Wichtig für eine hohe Messgenauigkeit ist ein homogenes, rotationssymmetrisches Strömungsprofil am Durchflusssensor. Dafür schreibt der Hersteller eine gerade, ungestörte Einlaufstrecke von mehr als zehn mal den Nenndurchmesser und eine Auslaufstrecke von mehr als 5 mal dem Nenndurchmesser vor. [9] Am Peltondüsenprüfstand ergibt sich aufgrund der langen, geraden Zuleitung sogar eine Einlaufstrecke von rund 6.5 m was ca. 60 mal dem Nenndurchmesser entspricht. Mit einer Länge von 1.5 m beträgt die Auslaufstrecke bei Prüfstand 14 mal dem Nenndurchmesser, womit die Vorgaben des Herstellers mehr als erfüllt wurden.

### 3.2.2 Druckmessung

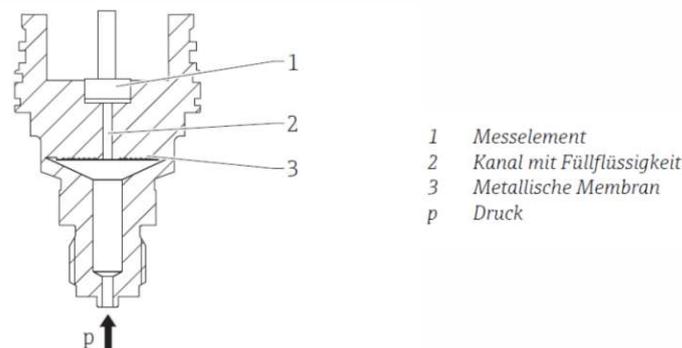
Zur Bestimmung des Betriebspunktes ist die Messung des vorherrschenden Drucks erforderlich. Bei diesem Versuchsaufbau wird der statische Druck in der Düse gemessen. Hierfür wurde ein Drucksensor Cerabar PMP71B des Herstellers Endress + Hauser verbaut. Die wichtigsten Sensordaten sind nachstehend in 3.3 zusammengefasst.

Hierbei handelt es sich um einen Drucksensor mit metallischer Prozessmembran.

<b>Hersteller</b>	Endress + Hauser
<b>Sensorbezeichnung</b>	Cerabar PMP71B
<b>Messprinzip</b>	Druckmessumformer mit metallischer Prozessmembran
<b>Messbereich elektrisch</b>	4 bis 20 mA
<b>Messbereich physikalisch</b>	-1 bis 40 bar
<b>Genauigkeit</b>	$\pm 0,025\%$

**Tabelle 3.3:** Sensordaten des Drucksensors

Der Aufbau eines solchen Sensors ist in Abbildung 3.7 veranschaulicht. Dabei wird je nach anliegendem Druck die metallische Membran (3) unterschiedlich stark ausgelenkt. Daraufhin überträgt die Füllflüssigkeit (2) den anliegenden Druck auf ein Messelement (1), das aus einer Wheatstone'schen Messbrücke besteht. Die Ausgangsspannung der Messbrücke, die vom Druck abhängig ist, wird gemessen wodurch der anliegende Druck bestimmt werden kann. [8]



**Abbildung 3.7:** Aufbau des Drucksensors [8]

Die genaue Druckmessstelle ist in Abbildung 3.8 ersichtlich. Der Druckmessanschluss an der Düse wurde mithilfe einer Ringleitung verwirklicht, bei der an vier Stellen, gleichmäßig um den Umfang verteilt, Druck entnommen, und über die Ringleitung gemittelt wird. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Bohrungen nicht am höchsten und tiefsten Punkt der Leitung befinden, sondern um  $45^\circ$  verdreht zur Horizontalen angebracht sind. Das hat den Grund, dass sich an der höchsten Stelle Luftbläschen ansammeln könnten und an der tiefsten Stelle all jenes, was eine höhere Dichte als das Wasser hat, wie zum Beispiel Verunreinigungen oder Sedimente.

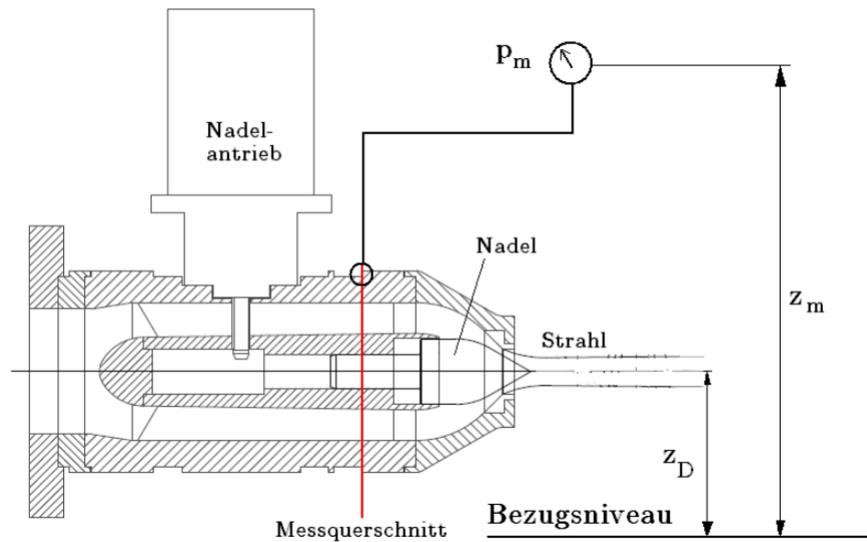


Abbildung 3.8: Druckmessstelle an der Peltondüse [14]

### 3.2.3 LDA-System

Für die LDA-Messungen wurde eine 2-Komponenten-Konfiguration des Herstellers TSI verwendet. Dieses bedeutet, dass das System zwei Strahlenpaare unterschiedlicher Frequenz aussenden kann, wodurch eine Geschwindigkeitsmessung in zwei Ebenen möglich ist. Bei dem vorhandenen Modell handelt es sich um ein Kompaktsystem, bei dem Laser, Sende- und Empfangsoptik in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind. Die wichtigsten Bestandteile des LDA-Systems sind:

- PowerSight Laser Velocimeter and Controller Module TR-SS-2D
- PDM Photodetector Module PDM1000-2SS
- FSA Signal Processor FSA3500-2

Im PowerSight Laser Velocimeter ist der Laser, die Bragg Zelle, der Strahlenteiler sowie die rückwärts angeordnete Empfangsoptik untergebracht. Bei dem Laser handelt es sich um einen diodengepumpten Festkörperlaser, dessen beide Wellenlängen  $\lambda = 532 \text{ nm}$  und  $\lambda = 561 \text{ nm}$ , bei einer Leistung von  $P = 300 \text{ mW}$  für jede Wellenlänge, betragen. Damit fällt der verwendete Laser unter die Laserschutzklasse 4. Um den Laser ansteuern zu können ist das dazu passende Controller Module erforderlich mit dem sowohl Laser als auch Bragg Zelle gesteuert werden

können. Vorne am Laser ist es möglich, je nach Anforderung, verschiedene Linsen anzubringen. Bei den Messungen dieser Diplomarbeit kam die Linse TLN06-250 des Herstellers TSI mit einer Brennweite von 261 mm zum Einsatz. [19]

Die wichtigsten Parameter der beiden Strahlenpaare sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

	<b>Channel 1</b>	<b>Channel 2</b>
<b>Wellenlänge</b>	561 nm	532 nm
<b>Farben der Laserstrahlen</b>	Gelb	Grün
<b>Brennweite</b>	261 mm	261 mm
<b>Strahlabstand</b>	50 mm	50 mm
<b>Durchmesser Laserstrahl</b>	2.1 mm	2.1 mm
<b>Streifenabstand</b>	4.0780 $\mu\text{m}$	3.8672 $\mu\text{m}$

**Tabelle 3.4:** Wichtige Parameter der beiden Strahlenpaare [19]

Zur Bedienung des Messsystems und zur Erfassung der Messdaten steht die mitgelieferte Software FlowSizer64 zur Verfügung. Hier können sämtliche erforderlichen Einstellungen, sowohl Hardware-Einstellung als auch Anpassungen der Parameter, getroffen werden, um möglichst gute Messergebnisse zu erzielen. Des Weiteren ist es möglich sich hier Diagramme Live während der Messungen anzeigen zu lassen. Dazu zählt zum Beispiel ein Zeitverlauf der Messung, aber auch die Anzeige eines Histogramms der laufenden Messungen ist möglich.

### Traversierung

Im Zuge der LDA-Messungen muss der Laser horizontal traversiert werden, um die gewünschten Messpunkte entlang der horizontalen Halbierungssachse der Rohrleitung vermessen zu können. Dafür wurde eine einachsige Traversierung mit dem dazugehörigen CNC-Controller C142-1 des Herstellers isel verwendet. Die Traversierung wurde auf einer stabilen Unterkonstruktion aus item-Profilen befestigt, die es aufgrund eingebauter Gewindestangen erlaubt, die Traversierung, und in weiterer Folge den Laser, genau auf das Messfenster einzurichten. Gesteuert wird die Traversierung durch die Software FlowSizer64 mit der auch die LDA-Messungen durchgeführt werden. Hier kann man eine festgelegte Matrix hinterlegen, wodurch das Programm automatisch all diese Messpunkte anfährt und die gewünschten

Messungen durchführt.

### Verwendete Seedings

Für die Messungen wurde auf im Labor vorhandene Seedings zurückgegriffen. Dabei kamen einerseits PSP5 (Polyamid Seeding Particles) von Dantec, mit einem Durchmesser von  $5\ \mu\text{m}$  und einer Dichte von  $1016\ \text{kg}/\text{m}^3$ , aber auch PSP50 Seedingpartikel von Prager Elektronik mit einem Durchmesser von  $50\ \mu\text{m}$  und einer Dichte von  $1030\ \text{kg}/\text{m}^3$  zum Einsatz. Da sich die Dichte nicht wesentlich von der des Wassers unterscheidet, können diese der Strömung gut folgen. Polyamid Seeding Partikel entstehen im Zuge eines Polymerisationsprozesses, wodurch sie rund aber nicht exakt sphärisch sind. Im Vergleich zu Seedingpartikeln aus Glas, die eine sphärische Form haben, sind sie allerdings deutlich kostengünstiger und zeigen trotzdem durchwegs gute Ergebnisse, wie in einer Diplomarbeit aus dem Jahr 2016 zum Thema *Experimentelle Untersuchung der Einflüsse auf LDA-Messungen* gezeigt wurde. [11]

Die Seedings werden mit Wasser und Alkohol gemischt und dem Mischer zugefügt. Der Alkohol ist notwendig für eine bessere Durchmischung der Seedings im Wasser.

### 3.2.4 Aufbau für die optische Strahlanalyse

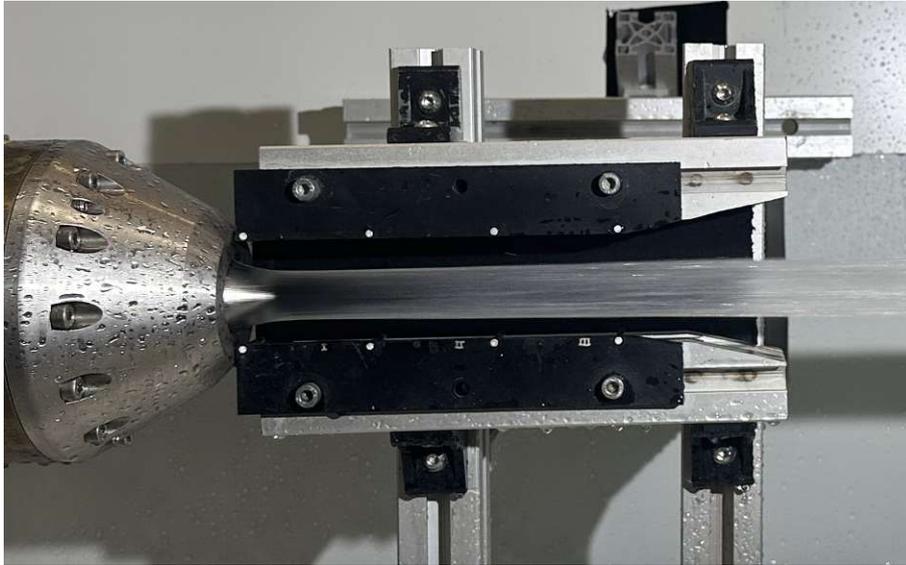
Die Bestimmung der Strahlkontur erfolgt mit der Kamera DFK 23GP031 von the Imaging Source. Dabei handelt es sich um eine Monochromkamera mit einer GigE Schnittstelle. Bei einer direkten Verbindung der Kamera mit dem Messrechner über die RJ45-Schnittstelle verfügt die Kamera über eine maximale Auflösung von 2592x1944 Pixeln bei einer Bildrate von 15 fps. [22]



**Abbildung 3.9:** Aufbau für die Strahlvermessung

Für die optische Zugänglichkeit der Kamera zum Freistrahл wurde im Gehäuse ein Fenster aus Plexiglas eingeplant, welches für die Kameramessung entfernt werden kann. Ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 3.9 angeführt. In diesem Bild ist auch einer der verwendeten LED-Strahler ersichtlich. Eine gute Beleuchtung des Freistrahls ist ein wesentlicher Aspekt um die Kanten des Freistrahls detektieren zu können und gute Messergebnisse zu erhalten. Daher wurde ein LED-Strahler außerhalb des Gehäuses, auf Höhe des Freistrahls aufgebaut, welcher strahlauwärts ausgerichtet war. Ein weiterer LED-Strahler wurde innerhalb des Gehäuses unterhalb des Freistrahls plziert, um diesen seitlich beleuchten zu können.

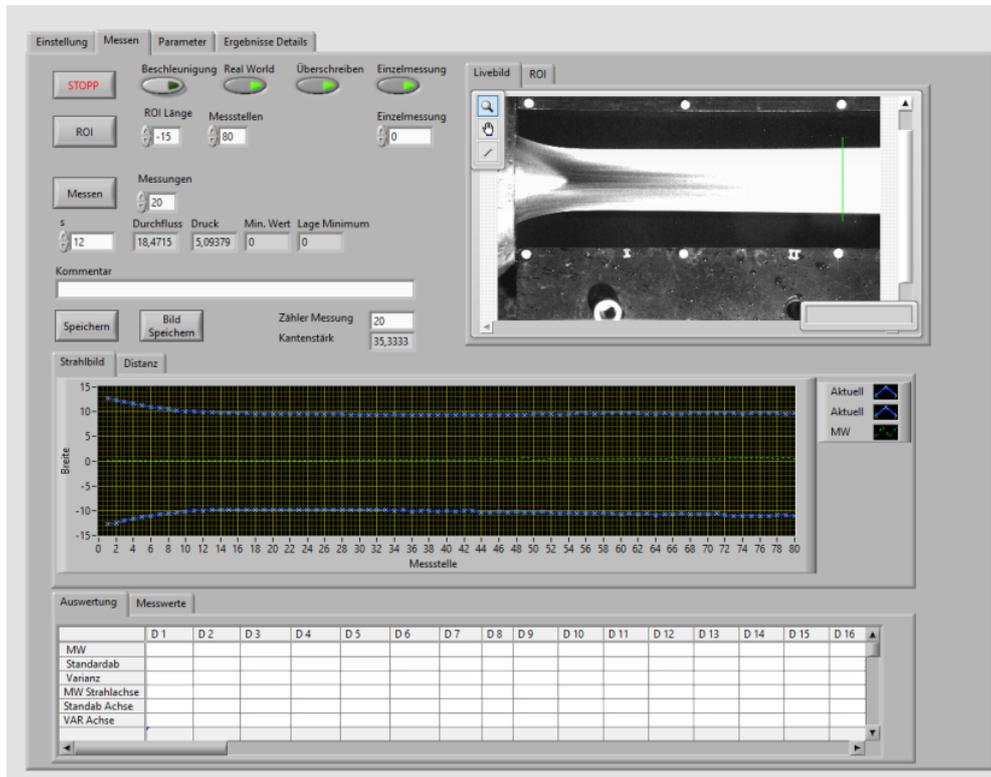
Für die Messung der Strahlkontur werden des Weiteren Referenzplatten benötigt. Diese wurden, wie in Abbildung 3.10 ersichtlich, seitlich vom Freistrahls montiert. Die Referenzplatten liegen an der Düse an und müssen horizontal und symmetrisch um die Strahlmittellachse ausgerichtet sein.



**Abbildung 3.10:** Referenzplatten für die Strahlvermessung

Zur Aufnahme der Strahlkontur wurde ein Messprogramm wieder in Betrieb genommen und überarbeitet, welches im Zuge einer vorangegangenen Diplomarbeit zum Thema *Optische Vermessung des Strahls von Peltondüsen* von Thomas Lechner [15] programmiert wurde. In Abbildung 3.11 ist ein Ausschnitt des Kameraprogramms ersichtlich.

Das Messprogramm ist in vier Reiter unterteilt, wobei primär die ersten beiden für die Durchführung der Messungen benötigt werden. Im Reiter **Einstellung** wird der benötigte Task ausgewählt mit dem der Druck und der Durchfluss aufgenommen werden. Weiters kann hier die verwendete Kamera ausgewählt werden woraufhin ein Livebild der Kamera übertragen wird. Hier wird auch der Realabstand zweier Punkte der Referenzplatten angegeben, dies ist notwendig um die Lagekoordinaten und Längen von Pixeln in reale Längen umzurechnen. Im Reiter **Messen** können diverse Einstellungen im Bezug auf die Messungen getroffen und auch die Messung gestartet werden. Zunächst kann die Anzahl und Länge der ROI, der sogenannten *Region Of Interest* festgelegt werden. Dadurch wird angegeben an wievielen Stellen die Strahlkontur vermessen werden soll. Durch die Länge der ROI wird die Länge der gemessenen Gerade definiert, entlang deren die Kantendetektierung stattfindet.



**Abbildung 3.11:** Messprogramm für die Strahlvermessung

Die Längen der ROI sollten so angepasst sein, dass diese zwar über die Strahlkontur hinausragen, aber sie nicht zu stark übersteigen, da sonst reflektierende Partikel oder Wassertropfen die Ergebnisse verfälschen, beziehungsweise zu Fehlern führen können. Weiters können in diesem Reiter auch die Anzahl an Messungen vorgegeben werden, wie oft die Strahlkontur gescannt werden soll.

## 3.3 Fehlerbetrachtung

### 3.3.1 Allgemeine Messunsicherheit

Ganz allgemein betrachtet, ist es wichtig sich im Zuge von Messungen bewusst zu sein, dass Messergebnisse immer gewissen Messunsicherheiten unterliegen. Dabei setzt sich ein Messwert  $x$  aus folgenden Komponenten zusammen [4]:

$$x = x_w + e_r + e_{s,b} + e_{s,u} \quad (3.1)$$

- dem wahren Wert  $x_w$
- der zufälligen Messabweichung  $e_r$
- der bekannten, systematischen Messabweichung  $e_{s,b}$
- der unbekanntem, systematischen Messabweichung  $e_{s,u}$

Des Weiteren unterscheidet man, ob es sich um relative  $f_x$  oder absolute Messfehler  $e_x$  handelt, wobei der Index  $x$  für die jeweilige Mess- bzw. Berechnungsgröße steht. Die Messfehler von Berechnungsgrößen setzen sich aus den Messfehlern der jeweiligen Messgrößen zusammen. Dabei besteht der relative Messfehler  $f_x$  aus einem systematischen und einem zufälligen Anteil.

$$f_x = \sqrt{f_{x_{sys}}^2 + f_{x_{zuf}}^2} \quad (3.2)$$

Nachstehend ist die Berechnung der Messunsicherheit für die Fallhöhe für einen Betriebspunkt mit der Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm angeführt.

Die Messunsicherheit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $c$  setzt sich aus dem relativen Fehler der Querschnittsfläche  $f_A$  und dem relativen Messfehler des Durchflusses  $f_Q$  zusammen:

$$f_c = \sqrt{f_A^2 + f_Q^2} \quad (3.3)$$

Geht man von einer hohen Fertigungsgenauigkeit aus, kann  $f_A = 0.005$  angenommen werden. Für  $f_Q$  kann die Messgenauigkeit des Herstellers mit  $f_Q = 0.002$

herangezogen werden. Damit ergibt sich für die Messunsicherheit der Strömungsgeschwindigkeit  $f_c = 0.0054$ . Mit einer Querschnittsfläche an der Druckmessstelle von  $A = 8.4151 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  lässt sich bei einem gemessenen Durchfluss von  $Q = 31.9026 \text{ L/s}$  eine Strömungsgeschwindigkeit von  $c = 3.79 \text{ m/s}$  berechnen. Damit ergibt sich ein absoluter Messfehler der Strömungsgeschwindigkeit von  $e_c = 0.0204$ .

In weiterer Folge kann die Messunsicherheit für die Fallhöhe folgendermaßen berechnet werden:

$$f_H = \pm \frac{e_H}{H} = \frac{\sqrt{\left(\frac{e_{p_m}}{\rho \cdot g}\right)^2 + e_{z_m}^2 + e_{z_D}^2 + \left(\frac{e_c}{2 \cdot g}\right)^2}}{\frac{p_m}{\rho \cdot g} + (z_m - z_D) + \frac{c^2}{2 \cdot g}} \quad (3.4)$$

Der Messfehler des Druckes kann mithilfe der vom Hersteller angegebenen Messgenauigkeit  $f_p = 0.00025$  und dem Messwert des Drucks  $p_m = 6.0889 \text{ bar}$  ermittelt werden. Die Messungenauigkeit der geodätischen Höhen wurde mit  $e_{z_m} = 0.005$  und  $e_{z_D} = 0.005$  eher großzügig angesetzt. Die Dichte wurde mit  $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$  und die Erdbeschleunigung mit  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  gewählt.

Somit ergibt sich für den exemplarisch angeführten Betriebspunkt eine Messunsicherheit der Fallhöhe von rund 0,03%. Eine Betrachtung sämtlicher Betriebspunkte zeigt, dass dieses Ergebnis der Messunsicherheit repräsentativ für alle Betriebspunkte ist.

### 3.3.2 Fehlerbetrachtung LDA-Messung

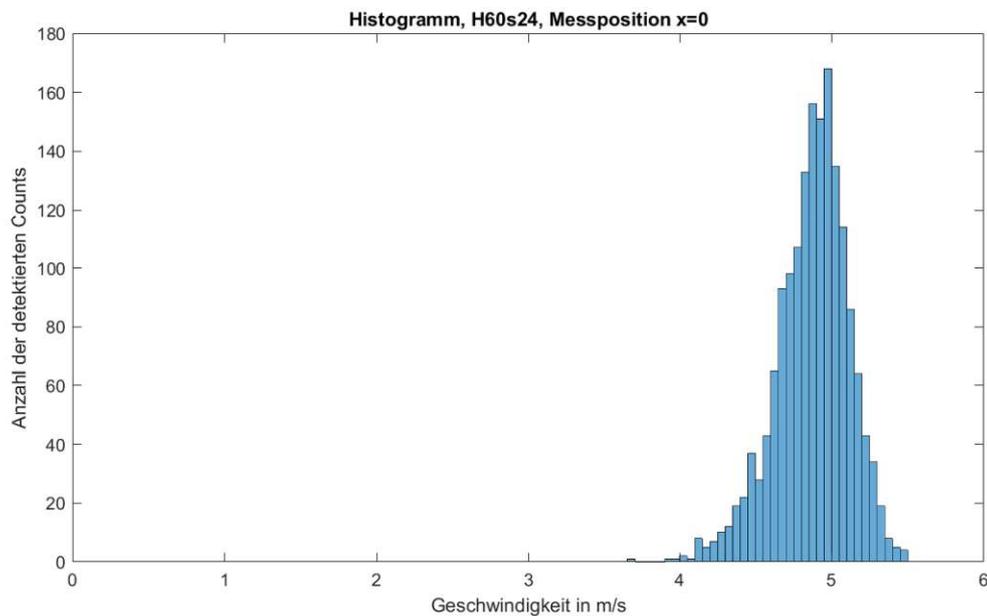
LDA-Systeme ansich haben den Vorteil, dass es sich um absolute Messsysteme handelt, das bedeutet, dass sie nicht kalibriert werden müssen. Allerdings muss das Messsystem ganz exakt auf das Prüfsystem ausgerichtet sein. Dadurch ergeben sich folgende Faktoren, die die Messgenauigkeit beeinflussen können:

- Durch eine ungenaue Ausrichtung des Lasers könnte es passieren, dass die Transport- und die Sekundärkomponente nicht exakt erfasst werden können. Des Weiteren würde es zu anderen Strahlengängen durch die Medien kommen, als ursprünglich geplant, wodurch die tatsächliche Messposition nicht dort liegt wo sie gedacht wäre.
- Die Seeding-Partikel ansich werden zwar so ausgewählt, dass sie ein mög-

lichst gutes Strömungsfolgevermögen aufweisen, eine gewisse Abweichung der Geschwindigkeiten von Partikeln und Fluid kann aber trotzdem nicht ausgeschlossen werden, wodurch es zu Messungenauigkeiten kommen kann.

- Bei der Einbringung von Seedings kann es zu Ungenauigkeiten kommen, insbesondere bei der Menge der eingebrachten Partikeln, aber auch bei der Dauer währenddessen Seedings ins System injiziert werden.
- Reflektionen der Laserstrahlen, insbesondere am Aluminium der Rohrleitung, können zu Messungenauigkeiten aufgrund von Streulicht führen.

Eine Möglichkeit die Qualität einer LDA-Messung beurteilen zu können, ist die Betrachtung des Histogramms einer Messung. Hier gilt: Je schmaler das Streuintervall um den Mittelwert liegt, umso besser ist die Qualität der Messung. Nachstehend ist ein Histogramm exemplarisch angeführt. Dieses entstammt einer Messung bei einer Fallhöhe  $H = 60$  m und einer Düsenstellung  $s = 24$  mm bei der Messposition  $x = 0$  mm.



**Abbildung 3.12:** Histogramm einer LDA-Messung, bei  $H=60$ m und  $s=24$ mm, Messpunkt  $x=0$ mm

Diese Messung ergibt einen Mittelwert  $\mu = 4,8739$  m/s und eine Standardabweichung  $\sigma = 0,2390$

### 3.3.3 Fehlerbetrachtung optische Strahlanalyse

Die Qualität und damit die Fehlerbetrachtung bei Kameramessungen hängt in erster Linie vom richtigen Setup und den passenden Einstellungen ab. Einige Aspekte die Einfluss auf die Qualität der Messungen haben können sind:

- Die Ausrichtung der Kamera und der Referenzplatten zum Prüfobjekt: Eine ungenaue Ausrichtung kann zu Ungenauigkeiten bei den Messergebnissen führen.
- Ausreichende Beleuchtung des Freistrahls. Dabei ist darauf zu achten, dass der Freistrah optimal beleuchtet ist und sich die Kanten des Freistrahls gut vom Hintergrund abheben.
- Passende Einstellungen an der Kamera: Insbesondere die Einstellungen am Zoom und an der Blende haben große Auswirkungen auf die Messergebnisse gezeigt, weil dadurch der Fokus und der Kontrast verbessert werden können.
- Reflektierende Partikel oder Tropfen auf der Hintergrundplatte, aber auch abströmende Wassertropfen vom Freistrahl können fälschlicherweise vom Messprogramm als Strahlkontur detektiert werden. Ein Beispiel hierfür ist in den Abbildungen 3.13 und 3.14 ersichtlich.

Bei der Auswertung der Messung, siehe Abbildung 3.13 hat sich bei der Darstellung der Strahlkontur ein Ausreißer dargeboten. Bei der Betrachtung der dazugehörigen Aufnahme (Abbildung 3.14) hat sich gezeigt, dass sich auf der Hintergrundplatte kleine Tropfen abgesetzt hatten (grüne Markierung), die fälschlicherweise als Strahlkontur detektiert wurden. Im Zuge des Postprocessing können solche Ausreißer händisch bereinigt werden.

Generell hat sich bei den Kameramessungen gezeigt, dass die Qualität der Messung stark von der Belichtung des Freistrahls und den getroffenen Einstellungen an der Kamera abhängt. Es war durchaus herausfordernd die optimalen Einstellungen zu finden, um gute Messergebnisse zu erhalten. Die Qualität der Messung hatte auch Auswirkung auf den Aufwand bei der Auswertung und Nachbearbeitung.

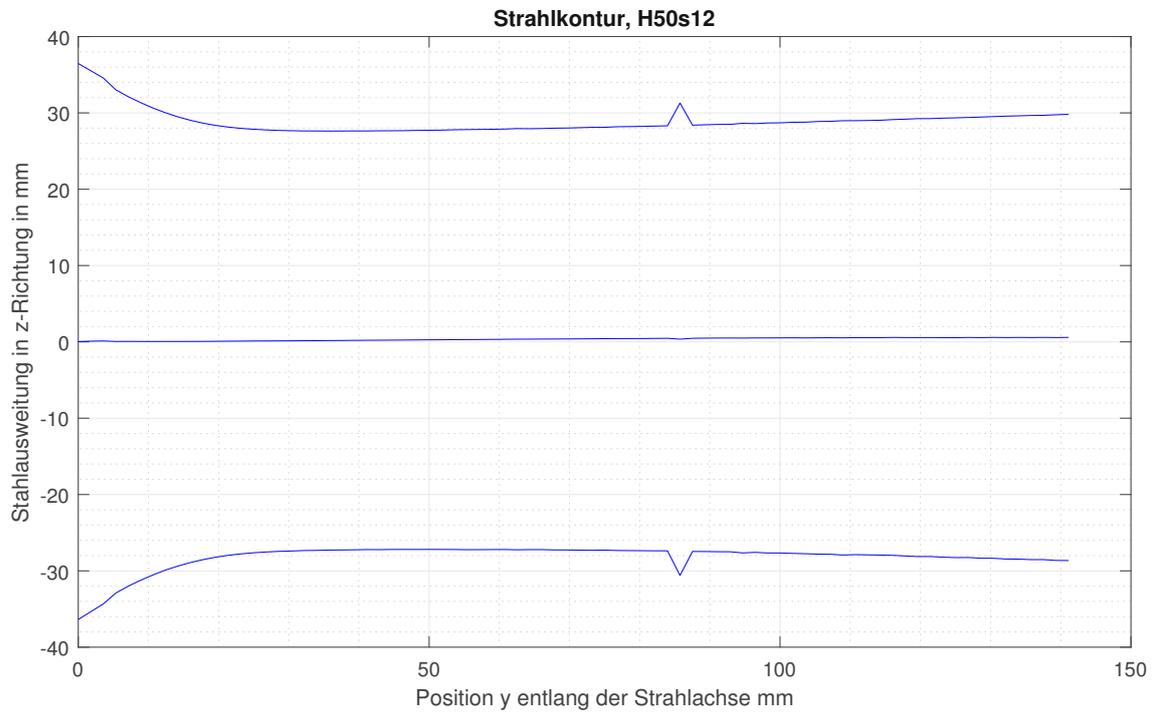


Abbildung 3.13: Strahlkontur bei  $H = 50$  m und  $s = 12$  mm

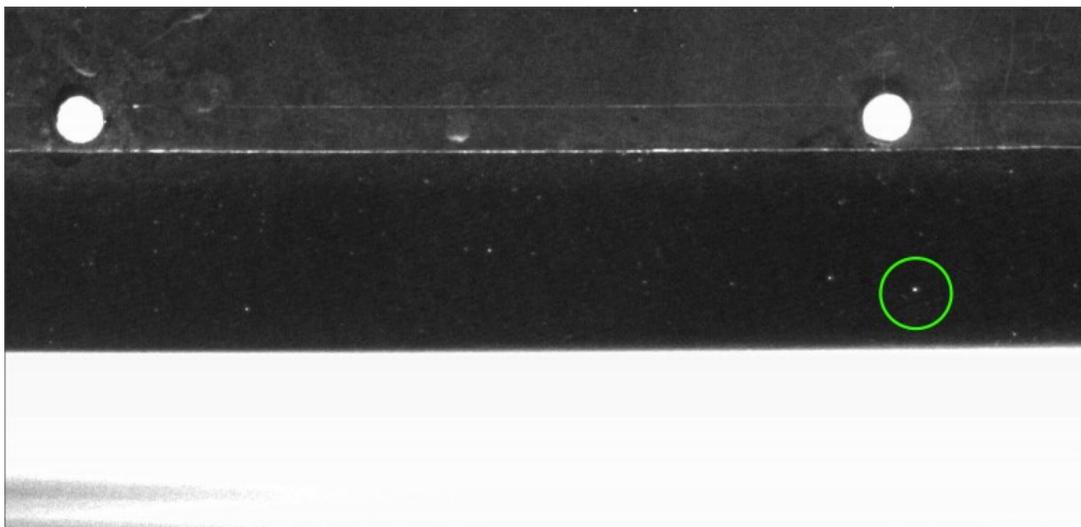


Abbildung 3.14: Aufnahme der Messung bei  $H = 50$  m und  $s = 12$  mm

# Kapitel 4

## LDA-Messungen in der Rohrleitung

### 4.1 Messablauf

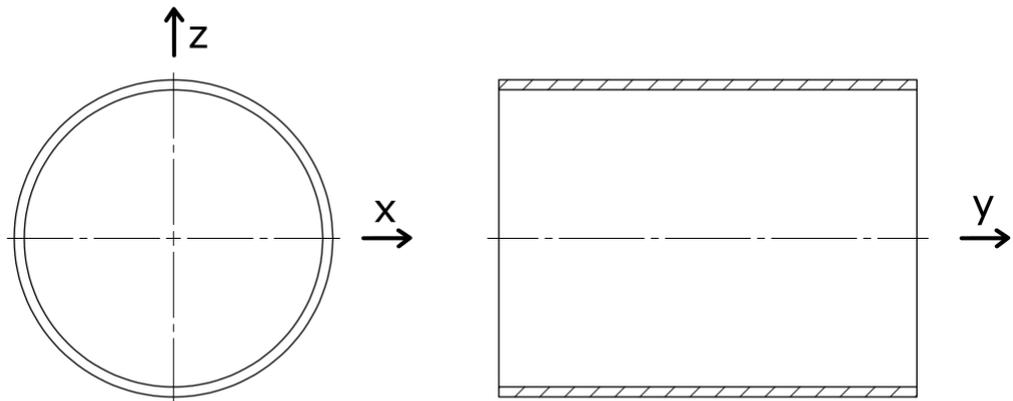
Bei den LDA-Messungen in der Rohrleitung liegt ein wesentliches Ziel darin, die Strömungsverhältnisse in der geraden Rohrleitung zu erfassen. Diese Ergebnisse sollen zur Vorbereitung für ein Forschungsprojekt herangezogen werden. In weiterer Folge sollen Messparameter, wie die Position der Seedingeindüsung und die Messfenstergeometrie variiert werden, um ein möglichst optimales Messsetup für zukünftige Messungen zu erhalten. Zunächst wurden alle Messungen beim selben Betriebspunkt durchgeführt. Dieser wurde bei einer Fallhöhe von  $H = 60$  m, einer Nadelstellung von  $s = 24$  mm und einem Durchfluss von  $Q = 30$  litre/s gewählt.

Folgende Parameter wurden variiert und verglichen:

- ohne Seedings/ mit Seedings
- Seedingeinbringung bei Flansch 1/ Seedingeinbringung bei Flansch 2
- Messfenstergeometrie 1 / Messfenstergeometrie 2

Anschließend wurde das Geschwindigkeitsprofil für drei verschiedene Fallhöhen ( $H = 50$  m,  $H = 60$  m,  $H = 70$  m) gemessen und in Hinblick auf Datenrate, Geschwindigkeitsverlauf und Turbulenzgrad ausgewertet.

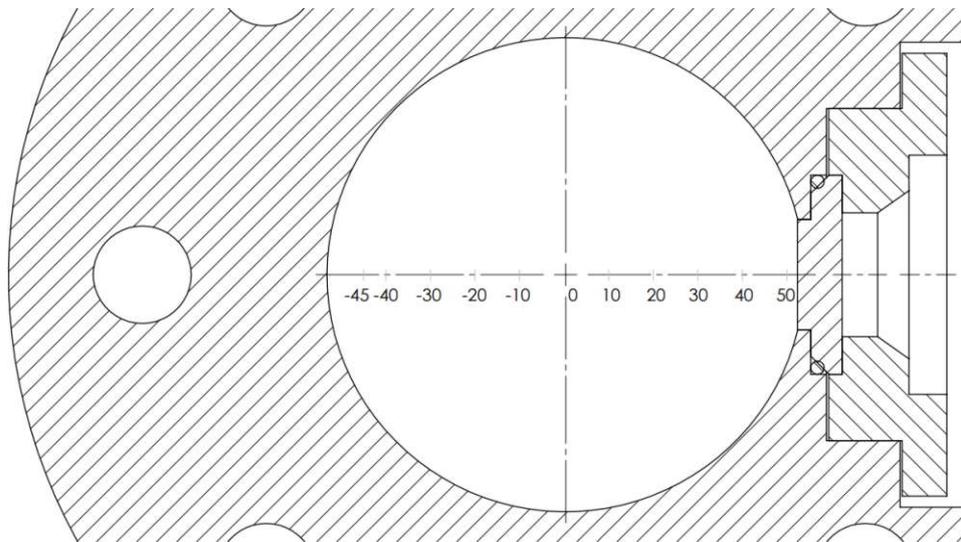
Das Koordinatensystem wurde wie in Abbildung 4.1 ersichtlich festgelegt. Somit liegen die Messpunkte der LDA-Messung auf der x-Achse, quer zur Fließrichtung. Die y-Achse liegt in der Mittelachse der Rohrleitung, somit entsprechen alle Geschwindigkeiten in der y-Richtung der Transportkomponente der Strömung. Die Geschwindigkeit in z-Richtung gibt die Sekundärkomponente der Strömung an.



### Blickrichtung Düse

**Abbildung 4.1:** Festlegung der Koordinatenrichtungen

Im Zuge eines Messdurchganges wurden 11 Messpositionen entlang der x-Achse vermessen. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpositionen beträgt 10 mm. Lediglich die Messposition bei  $x = -45$  mm wurde mit einem geringeren Abstand von 5 mm gewählt, da sich die Lage des Messvolumens sonst schon beinahe im Aluminium befinden würde. In Abbildung 4.2 ist das Messraster in der Rohrleitung grafisch dargestellt.



**Abbildung 4.2:** Messraster der LDA-Messungen

Die Seedingeindüsung wurde händisch von zwei Personen durchgeführt. Während eine Person die Seedings mit Alkohol und Wasser vermischt und verrührt hatte, befüllte die zweite Person den Mischer mit dem Seeding-Wasser-Gemisch und betätigte die händisch zu bedienende Pumpe. Da dieser Vorgang nicht automatisiert ist, kann es zu Abweichungen bei der Seedingeindüsung kommen, einerseits bei der injizierten Seedingmenge und andererseits bei der Zeitdauer währenddessen Seedings in das System eingedüst werden. Aufgrund des offenen Prüfstandaufbaus ist eine große Menge an Seedings erforderlich. Im Vergleich zu einem geschlossenen Kreislauf, bei dem immer wieder das selbe Wasser und somit auch die injizierten Partikel den Messbereich passieren, wird dieser Prüfstand über das 500 m<sup>3</sup> Unterwasserreservoir versorgt, wodurch der Prüfstand immer mit frischem Wasser durchströmt wird, welchem die Seedingpartikel erst neu zugefügt werden müssen.

## 4.2 Messergebnisse und Interpretation

### 4.2.1 Strömungszustände in der geraden Zuleitung

Zunächst wurden Messungen ohne Seedings durchgeführt. Hier konnten allerdings nur sehr vereinzelt Counts detektiert werden, wodurch auf die Notwendigkeit von Seedings zu schließen ist. Aus diesem Grund kann hier kein Geschwindigkeitsprofil einer Messung ohne Seedings dargestellt werden.

Die Parameter der Messungen sind in nachstehender Tabelle 4.4 zusammengefasst:

<b>Messzeit</b>	60 s	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 2	Flansch 2
<b>Verwendete Seedings</b>	Keine Seedings	PSP50
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1	Geometrie 1
<b>Fallhöhe</b>	60 m	60 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm	24 mm

**Tabelle 4.1:** Parameter der Messungen ohne und mit Seedings

Ein deutlich besseres Ergebnis zeigten die Messungen unter Verwendung von Seedings, wie in den nachstehenden Diagrammen ersichtlich wird. Die Messzeit für jede Messstelle betrug 60 Sekunden. In dieser Zeit wurde das Seeding-Wasser-Gemisch in den Mischer gefüllt und mithilfe der Pumpe dem System zugeführt. Die Seedingeindüsung erfolgte bei dieser Messung bei Flansch 2, der näher am LDA-Messfenster liegt. Zur besseren Vergleichbarkeit sämtlicher Messungen wurde im Zuge der Auswertung der Mittelwert der gültigen Counts für beide Messkomponenten berechnet und die Ergebnisse anschließender Messungen auf diesen Mittelwert bezogen.

In Abbildung 4.3 ist der Verlauf der Geschwindigkeit der Transportkomponente dargestellt. Zu Erkennen ist ein symmetrischer Verlauf, dessen Maximum in der Mitte der Rohrleitung liegt und zur Wand hin abnimmt. Lediglich ein Punkt, an der Messstelle  $x = -45$  mm ragt etwas aus dem Profil heraus. An dieser Stelle liegt das Messvolumen schon sehr nah an der Rohrleitung, was zu Reflektionen der Laserstrahlen am Aluminium führt. Dieses Streulicht kann eine Ursache für Fehldetektionen sein. Des Weiteren ist in Abbildung 4.4 zu sehen, dass die Datenrate an dieser Stelle äußerst niedrig ist, was ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen kann.



Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente

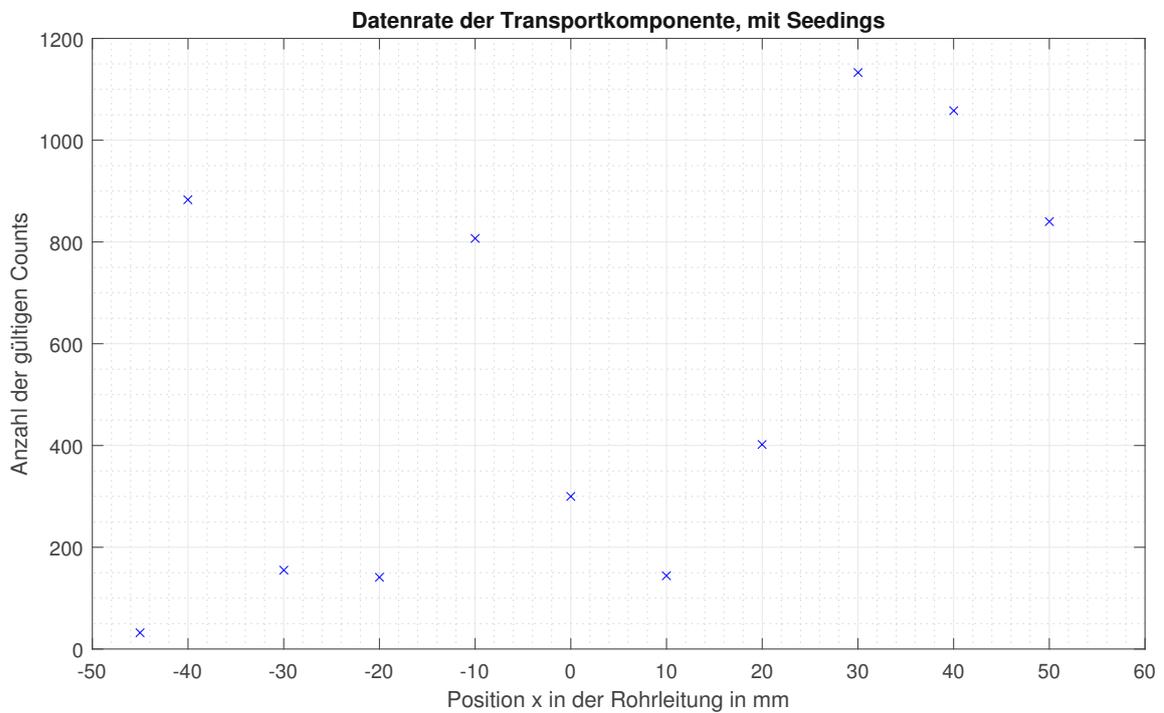
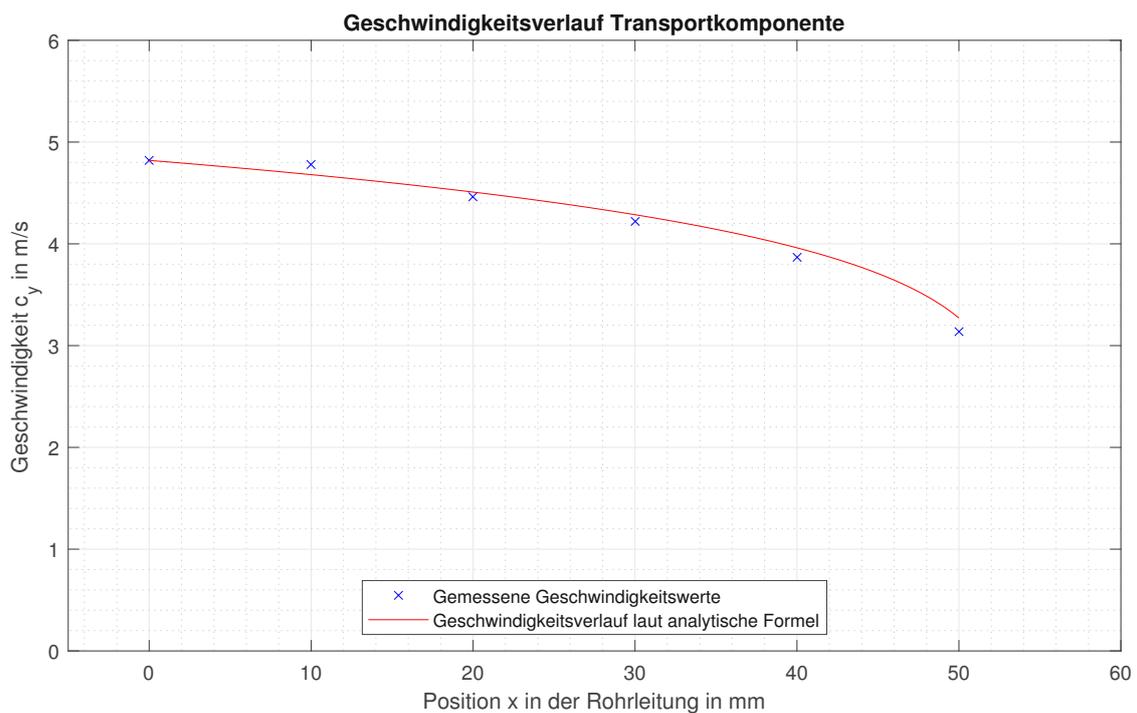


Abbildung 4.4: Datenrate der Transportkomponente

Wenn man mithilfe von Gleichung (2.13) die vorherrschende Reynoldszahl berechnet, erhält man bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $c_m = 3.5 \text{ m/s}$ , einem Rohrrinnendurchmesser  $d_i = 107.1 \text{ mm}$  und einer kinematischen Viskosität von  $\nu = 1.002 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  für Wasser bei ca  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  eine Reynoldszahl von  $Re = 370000$ . Diese liegt deutlich über der kritischen Reynoldszahl von  $Re_{krit} = 2320$ , wodurch eine turbulente Rohrströmung vorliegt.

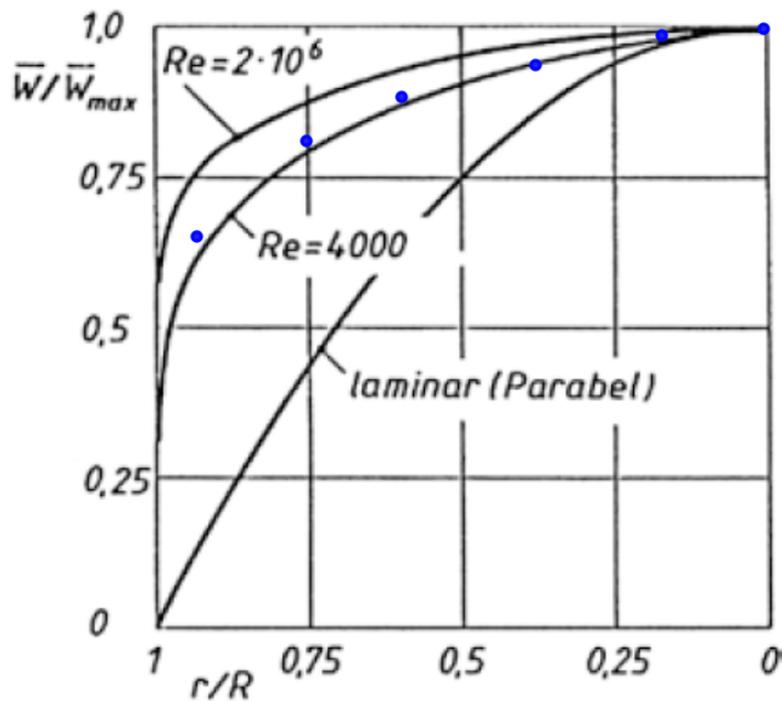
Nun kann mit der Näherungsformel von *NIKURADSE* für turbulente Strömungen (Gleichung (2.14)) das Geschwindigkeitsprofil auch analytisch berechnet werden und dieses mit den Messergebnissen verglichen werden. Für den Exponenten  $n$  wurde aufgrund der errechneten Reynoldszahl  $Re = 370000$  der Wert  $n = 1/7$  aus der Abbildung 2.11 ausgewählt. Der Vergleich der analytischen Formel und der Messergebnisse ist in Abbildung 4.5 ersichtlich. Hierbei ist der Verlauf der analytischen Formel rot und die Messergebnisse mit blauen x-Markierungen dargestellt.



**Abbildung 4.5:** Vergleich des Geschwindigkeitsprofils der Transportkomponente

Hier zeigt sich eine sehr gute Überdeckung der gemessenen Geschwindigkeitswerte mit dem Verlauf der analytischen Formel.

Ein Geschwindigkeitsverlauf, sowohl von laminarer als auch von turbulenter Rohrströmung, aus der Literatur ist in Abbildung 4.6 ersichtlich. Hier entspricht  $r/R = 1$  der Rohrwand und  $r/R = 0$  der Rohrmittelachse. Das Geschwindigkeitsprofil verläuft rotationssymmetrisch um die Leitungssachse. Zusätzlich wurden in der Abbildung die Ergebnisse der zuvor gezeigten Messung mit blauen Kreismarkierungen eingetragen.



**Abbildung 4.6:** Laminare und turbulente Geschwindigkeitsprofile in dimensionsloser Darstellung, adaptiert aus [2]

Mit der errechneten Reynoldszahl von  $Re = 370000$  ist zu erwarten, dass der gemessene Geschwindigkeitsverlauf zwischen den beiden oberen Verläufen ( $Re = 2000000$  und  $Re = 4000$ ) liegt. Dies zeichnet sich in Abbildung 4.6 auch wieder. Hier ist zu erkennen, dass die Messwerte leicht oberhalb des Geschwindigkeitsprofils von  $Re = 4000$  liegen. Das Maximum der Geschwindigkeit befindet sich in der Mitte der Rohrleitung und nimmt zunächst zum Rand hin kontinuierlich ab. In Wandnähe kommt es zu einem starken Abfall der Geschwindigkeit bis diese dann an der Wand den Wert Null erreicht.

Der Mittelwert der detektierten Counts wurde berechnet um die Datenrate aller späteren Messungen auf diesen bezogen darzustellen. Hier ergab sich ein  $Mean_{Counts_y} = 536$  Counts pro Messposition, was bei einer Messzeit von 60 Sekunden einer Datenrate von etwa 9 Hz entspricht. Hierbei ist allerdings zu erwähnen, dass nicht über die gesamte Messzeit neue Seedings injiziert wurden. Wird die Messzeit an die Dauer der Seedingeinbringung angepasst, kann dadurch die Datenrate erhöht werden.

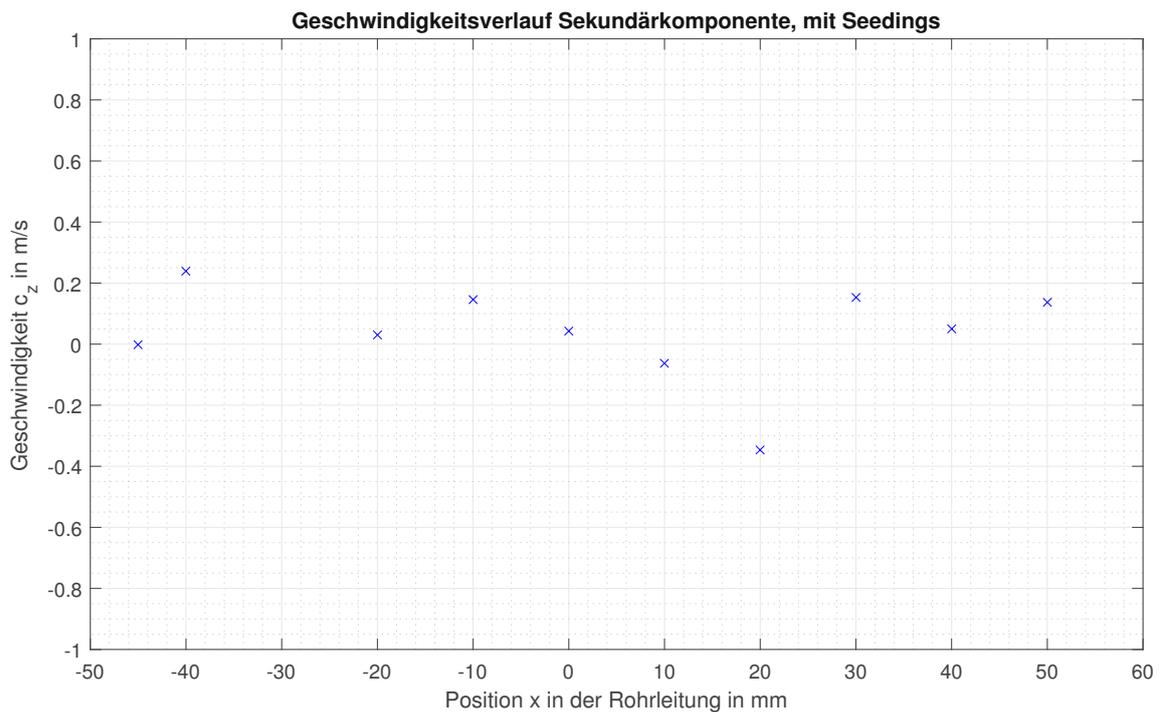


Abbildung 4.7: Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente

In Abbildung 4.7 ist der Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente ersichtlich. Wie zu erwarten war befindet sich die Geschwindigkeit, aufgrund der langen, geraden Zuleitung, im Bereich von 0 m/s. Es zeigt sich auch, dass jene Messpositionen an denen die Geschwindigkeit stärker von 0 m/s abweicht auch jene Positionen sind, an denen weniger Counts detektiert werden konnten, siehe Abbildung 4.8 was zu einer höheren Messungenauigkeit führt.

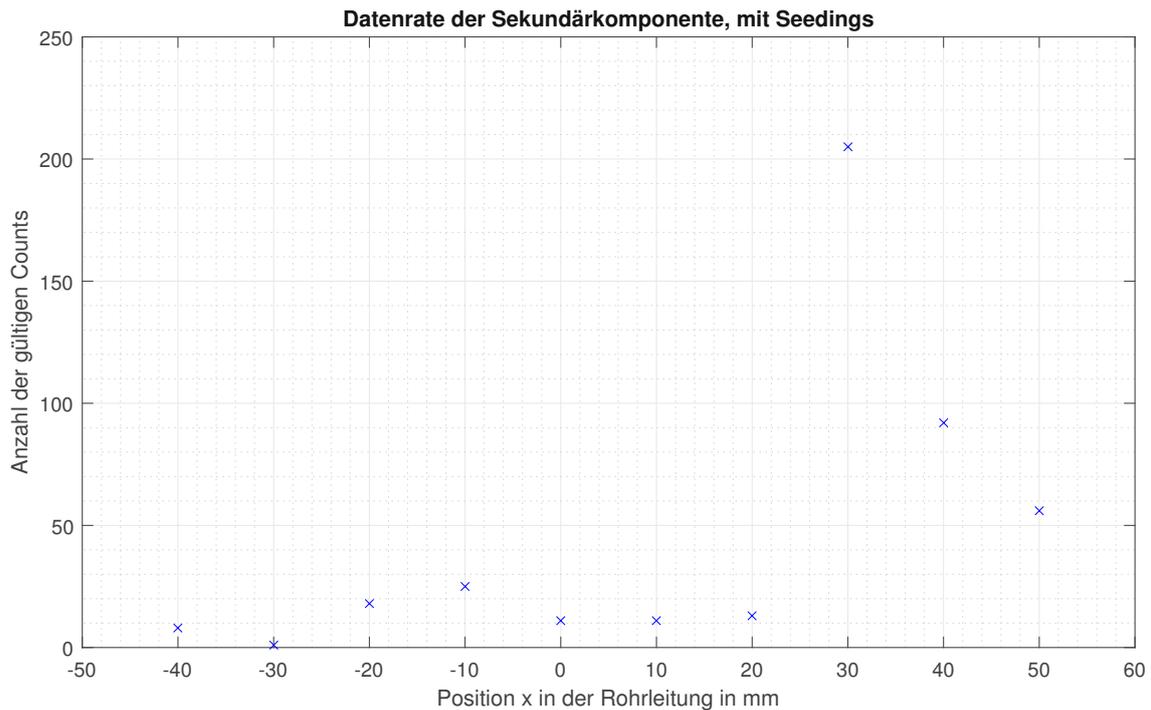
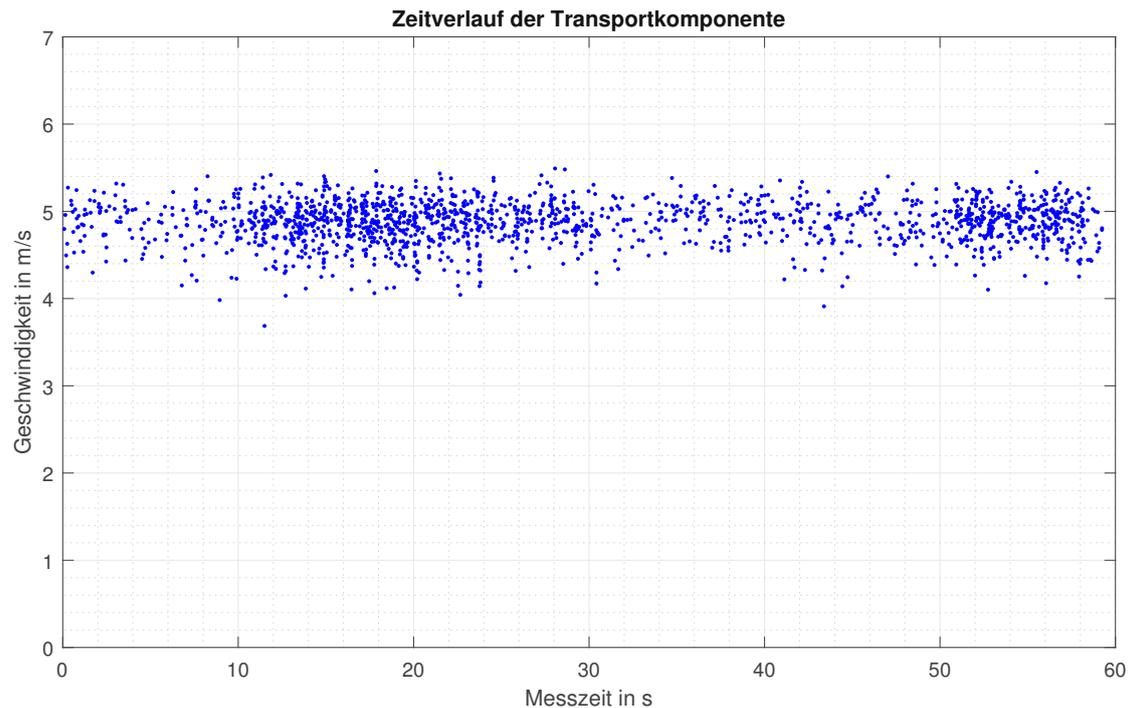


Abbildung 4.8: Datenrate der Sekundärkomponente

Der Mittelwert der detektierten Counts liegt hier bei  $Mean_{Counts_z} = 44$  Counts pro Messposition was bei der vorliegenden Messzeit einer Datenrate von 0.73 Hz entspricht. Generell ist festzustellen, dass die Datenrate für die Sekundärkomponente deutlich niedriger ist als die Datenrate der Transportkomponente.

## 4.2.2 Zeitverlauf der Messungen

Im Zeitverlauf einer Messung kann dargestellt werden, zu welchen Zeitpunkten Partikel detektiert werden konnten und welche Geschwindigkeit diese hatten. Nachfolgend ist exemplarisch der Zeitverlauf einer Messung bei einer Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm an der Messposition  $x = 0$  mm dargestellt.



**Abbildung 4.9:** Zeitverlauf einer Messung bei  $H = 60$  m und  $s = 24$  mm an der Messposition  $x = 0$  mm

In Abbildung 4.9 ist die Seedingwolke zu erkennen, die sich aufgrund der Eindüsung des Seeding-Wasser-Gemisches mithilfe der Pumpe ergibt. Es werden über die gesamte Messdauer von 60 s Partikel detektiert. Die Verdichtungen der Seedingwolke in den Bereichen von 10-30 s und 50-60 s zeigen jene Zeitbereiche an, währenddessen das Seeding-Wasser-Gemisch eingebracht wurde. Weiters kann man über die Breite dieses Wolkenbandes Rückschlüsse auf die Qualität der Messung ziehen. Je schmaler dieses Band um den Mittelwert der Geschwindigkeit liegt, desto geringer ist die Schwankung der Messergebnisse. Man erkennt an diesem exemplarisch angeführten Messsignal auch, dass sich die Breite des Wolkenbandes über die gesamte Messdauer hinweg nicht verändert. Dadurch kann gezeigt werden, dass es durch die Eindüsung der Seedings zu keiner Beeinflussung der Streuung kommt.

### 4.2.3 Abschätzung des Durchflusses mittels LDA-Messung

Mithilfe der LDA-Messergebnisse sollte es möglich sein den Gesamtdurchfluss nachzurechnen, indem man den Gesamtquerschnitt der Rohrleitung in einzelne Teilflächen um die Messpositionen unterteilt, von denen die einzelnen Geschwindigkeiten gemessen wurden. In Abbildung 4.10 sind mit schwarzen Kreisen die einzelnen Messpositionen markiert, an denen die Geschwindigkeit gemessen wurde. Zusätzlich dazu sind die Flächenstücke eingezeichnet, in die die Gesamtfläche unterteilt wurde.

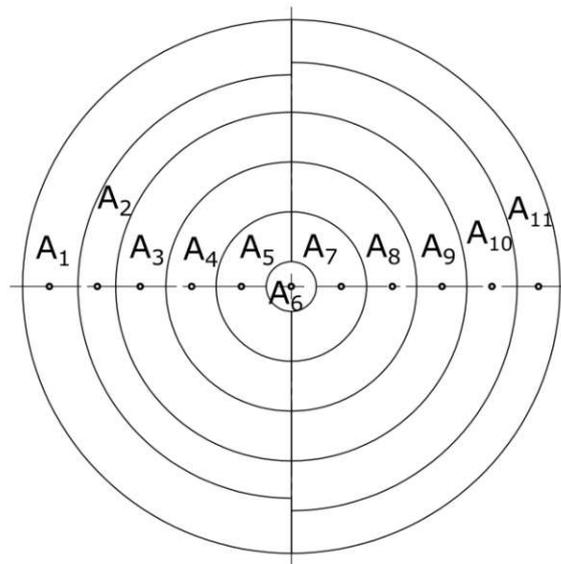


Abbildung 4.10: Fehlerbetrachtung des Durchflusses

Die Partialdurchflüsse können mithilfe der Kontinuitätsgleichung berechnet werden zu:

$$Q_i = c_i \cdot A_i \quad (4.1)$$

Den Gesamtdurchfluss erhält man durch aufsummieren der einzelnen Teildurchflüsse.

$$Q_{ges} = \sum Q_i \quad (4.2)$$

Diese Betrachtung wurde für eine Messung bei einer Fallhöhe von  $H = 60$  m und einer Düsenstellung von  $s = 24$  mm exemplarisch durchgeführt und die Ergebnisse in nachstehender Tabelle zusammengefasst.

Messposition in mm	$c_i$ in m/s	$A_i$ in $mm^2$	$Q_i$ in l/s
-45	3.5	1667.2	5.8351
-40	3.679	913.0	3.3590
-30	4.1395	942.5	3.9014
-20	4.3957	628.3	2.7619
-10	4.67	314.2	1.4671
0	4.8197	78.5	0.3785
10	4.8301	314.2	1.5174
20	4.5503	628.3	2.8590
30	4.2856	942.5	4.0391
40	3.9162	1256.6	4.921
50	3.0901	1323.6	4.0899

**Tabelle 4.2:** Fehlerbetrachtung der Durchflussmessung

Für den Gesamtdurchfluss ergibt sich ein Wert von  $Q_{ges} = 35.13$  L/s. Dieses Ergebnis liegt deutlich über dem am Durchflusssensor gemessenen Wert von  $Q_{Sensor} = 31.5$  L/s. Dass das Ergebnis der Abschätzung größer ist, als jenes am Sensor ist wenig überraschend. Wie in Kapitel 2.5 zur Rohrströmung erwähnt, nimmt die Geschwindigkeit der Strömung zur Wand hin stark ab. Da dieser Verlauf aufgrund der gewählten Messpositionen nicht exakt aufgelöst werden konnte ist dies in der Abschätzung auch nicht berücksichtigt. Für eine bessere Abschätzung müssten wohl mehr Messpunkte aufgenommen werden, um insbesondere in Wandnähe das Geschwindigkeitsprofil besser abbilden zu können. Dann sollte der abgeschätzte Wert für den Durchfluss auch besser mit dem vom Durchflusssensor übereinstimmen.

#### 4.2.4 Position der Seedingeindüsung

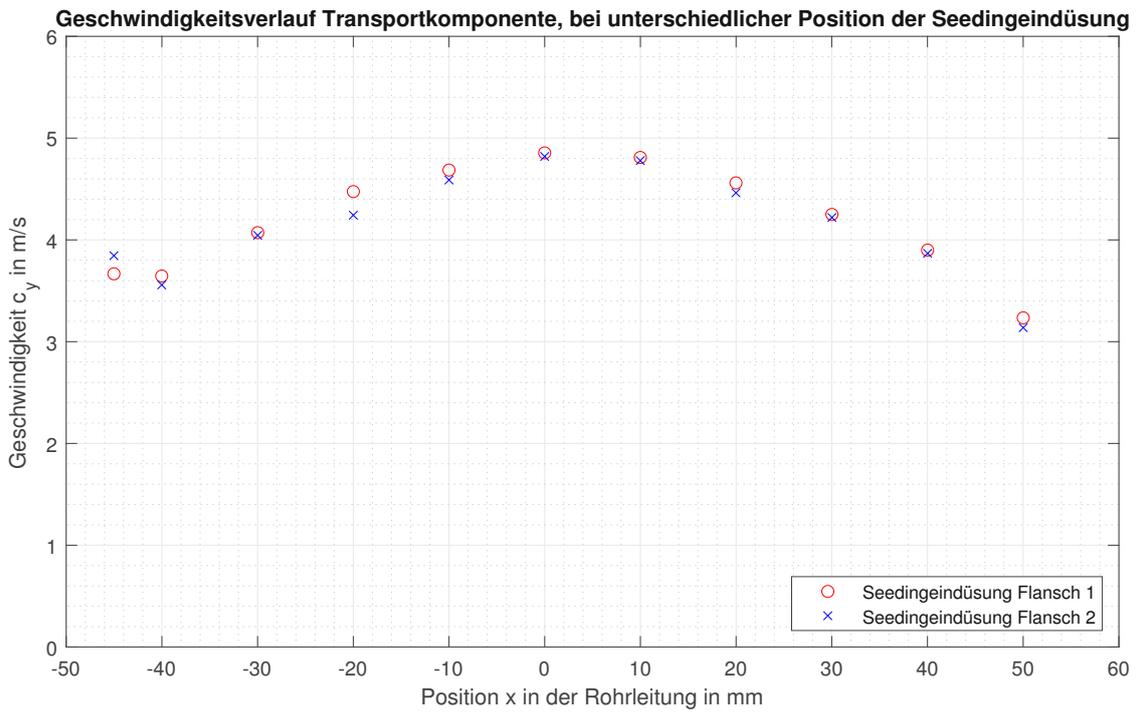
Im nächsten Schritt wurden Messungen durchgeführt bei denen die beiden möglichen Positionen der Seedingeindüsung variiert wurden. Flansch 1 und Flansch 2 die zur Seedingeindüsung zur Verfügung stehen sind baugleich und unterscheiden sich lediglich in der Entfernung zum Messfenster. Der Flansch 1 zur Seedingeindüsung liegt in etwa 4 m von der LDA-Messebene entfernt, das entspricht einer Länge von ungefähr 40-mal dem Rohrrinnendurchmesser  $d_i$ . Flansch 2 liegt näher an der LDA-Messebene und hat mit ca  $7 \cdot d_i$  einen Abstand von 0.8 m zum LDA-Messfenster.

Die Parameter der Messungen sind in nachstehender Tabelle 4.3 zusammengefasst:

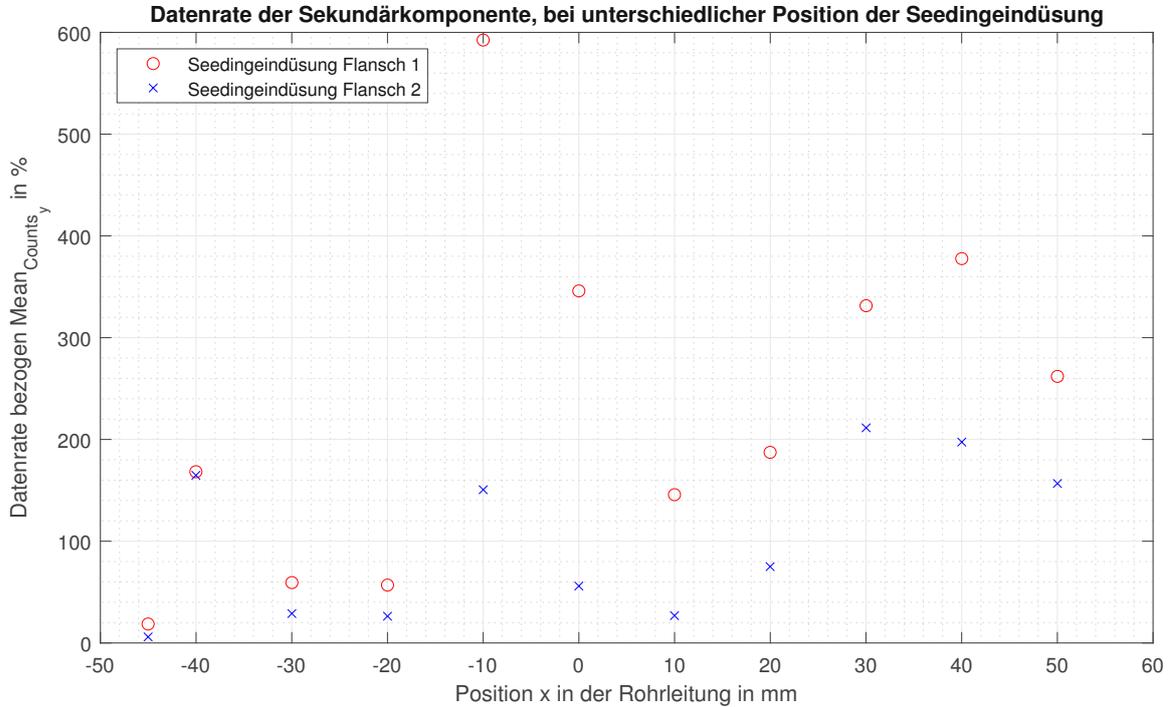
<b>Messzeit</b>	60 s	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 1	Flansch 2
<b>Verwendete Seedings</b>	PSP50	PSP50
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1	Geometrie 1
<b>Fallhöhe</b>	60 m	60 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm	24 mm

**Tabelle 4.3:** Parameter der Messungen bei unterschiedlicher Position der Seedingeindüsung

In der Abbildung 4.11 ist der Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente der beiden Messungen ersichtlich. Darin erkennt man, dass die Ergebnisse des Geschwindigkeitsprofils innerhalb der Messtoleranz annähernd deckungsgleich sind. Die Anzahl der detektierten Counts, siehe Abbildung 4.12, ist allerdings bei Eindüsung der Seedings über Flansch 1 bei jeder Messposition höher als bei Flansch 2. Das kann den Grund haben, dass sich die Seedings aufgrund der längeren Vorlaufstrecke besser in der Strömung über den Querschnitt hinweg verteilen können. Zusätzlich erkennt man, insbesondere bei den Messungen bei Seedingeindüsung bei Flansch 1, dass die Datenrate bei jenen Messpositionen die näher am Messfenster liegen deutlich höher ist, als bei jenen Punkten die weiter entfernt liegen. Das liegt unter anderem an der weiteren Strecke, die die Laserstrahlen im Wasser zurücklegen müssen, wodurch diese zunehmend geschwächt werden.

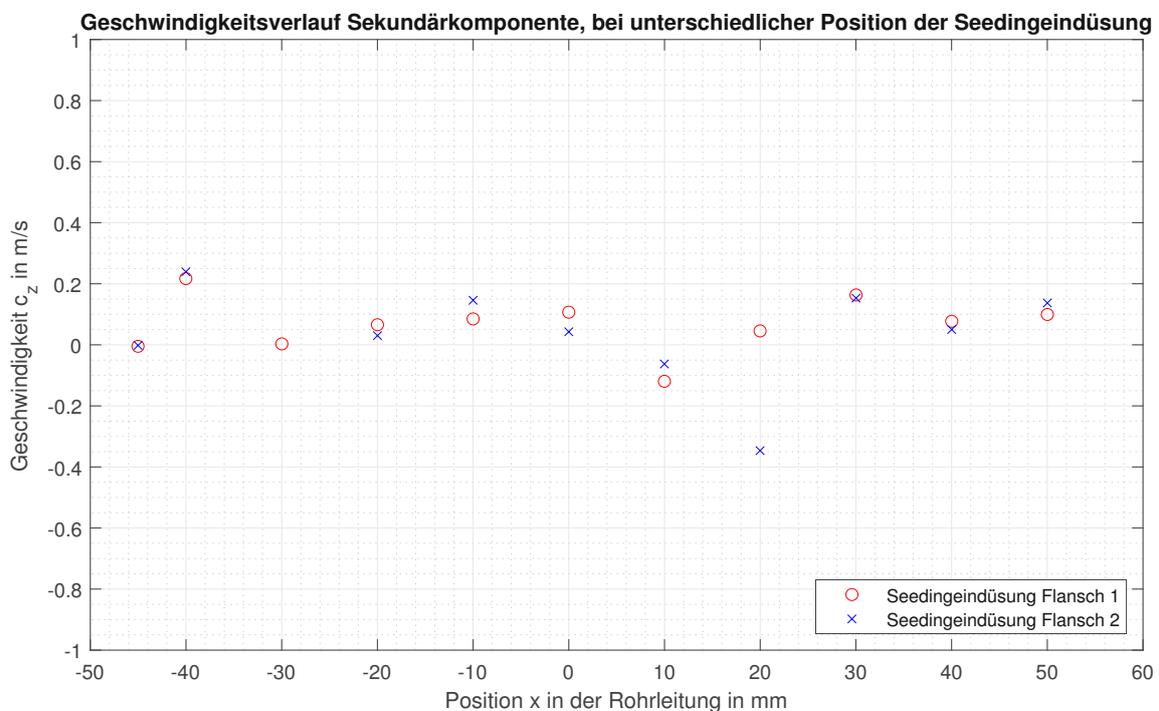


**Abbildung 4.11:** Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente bei unterschiedlicher Position der Seedingeindüsung

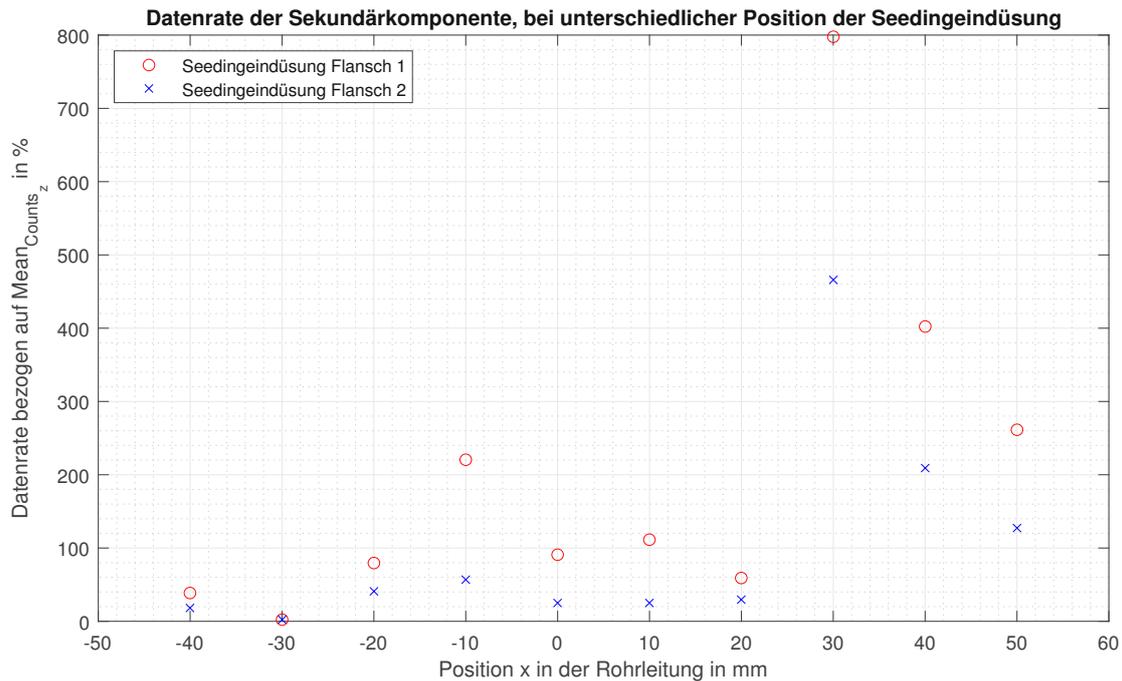


**Abbildung 4.12:** Datenrate der Transportkomponente bei unterschiedlicher Position der Seedingeindüsung

In Abbildung 4.13 sind die Verläufe der Sekundärgeschwindigkeiten dargestellt. Da es aufgrund der langen geraden Vorlaufstrecke kaum zu Sekundärströmungen kommt, nehmen die gemessenen Geschwindigkeiten Werte  $\pm 0$  m/s an. Es zeigt sich, dass auch die Seedingeindüsung näher zur LDA-Messebene keinen Einfluss auf die Sekundärströmungen liefert, obwohl es hier zu einer seitlichen Einströmung in die Hauptströmung kommt. Die Datenrate der Sekundärkomponente, ersichtlich in Abbildung 4.14, ist bei Eindüsung der Seedings bei Flansch 1 durchwegs höher als bei Eindüsung über Flansch 2. Dadurch, dass sich die Geschwindigkeitsprofile der Transport- und der Sekundärkomponente nicht wesentlich unterscheiden, aber die erzielte Datenrate bei Seedinginjizierung über Flansch 1 deutlich höher liegt, wurden die Seedings bei allen nachfolgenden Messungen bei Flansch 1 eingedüst.



**Abbildung 4.13:** Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente bei unterschiedlicher Position der Seedingeinbringung



**Abbildung 4.14:** Datenrate der Sekundärkomponente bei unterschiedlicher Position der Seedingeindüsung

#### 4.2.5 Variation der Messfenstergeometrie

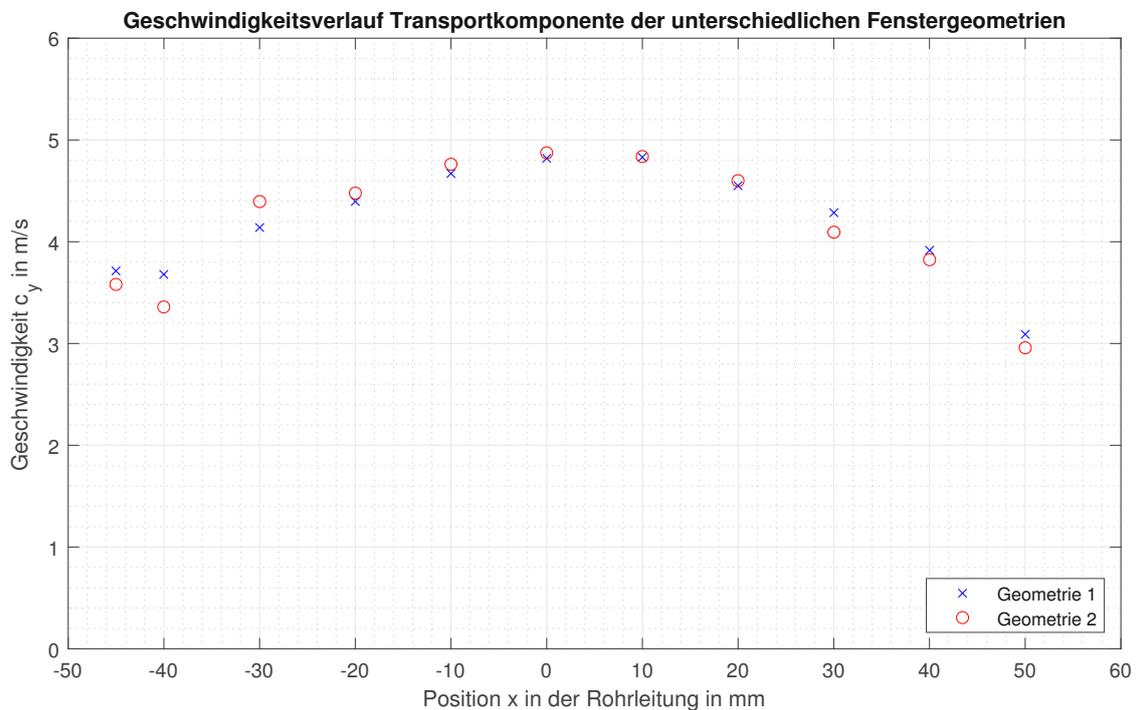
Im Zuge der Planung und Konstruktion des Bauteils, durch dass die optische Zugänglichkeit in der Rohrleitung ermöglicht wird, wurden zwei unterschiedliche Messfenstergeometrien entworfen, die im folgenden Abschnitt verglichen werden sollen.

Die Parameter der Messungen sind in nachstehender Tabelle 4.4 zusammengefasst. Aufgrund nicht ausreichender Menge von PSP50 Partikeln wurden bei der Messung von Messfenstergeometrie 2 zusätzlich PSP5 Partikel zugemischt.

<b>Messzeit</b>	60 s	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 1	Flansch 1
<b>Verwendete Seedings</b>	PSP50	PSP5 und PSP50 gemischt
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1	Geometrie 2
<b>Fallhöhe</b>	60 m	60 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm	24 mm

**Tabelle 4.4:** Parameter der Messungen bei unterschiedlicher Messfenstergeometrie

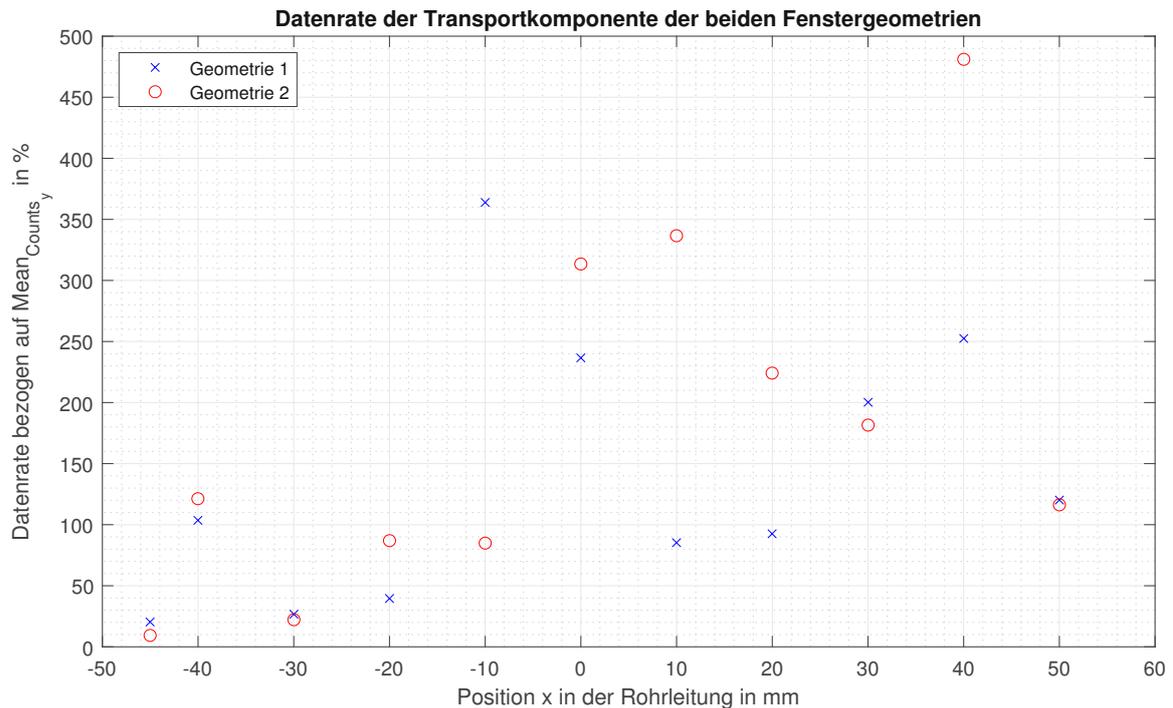
Die Ergebnisse dieser Messungen sind in nachstehenden Abbildungen dargestellt.



**Abbildung 4.15:** Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente bei unterschiedlicher Messfenstergeometrie

Zunächst sind in den Abbildungen 4.15 und 4.16 der Geschwindigkeitsverlauf und die Datenrate für die Transportkomponente dargestellt. Im Vergleich liegt die Datenrate bei der Messfenstergeometrie 2 etwas höher. Bei dieser Messung wurde eine Mischung von PSP5 und PSP50 Partikel injiziert. Da PSP5 Partikel deutlich kleiner sind, werden bei Zugabe der gleichen Volumsmenge mehr Seedingpartikel dem System zugefügt als bei Verwendung von PSP50 Partikeln. Das Geschwindigkeitsprofil der beiden Messungen ist für die meisten Messpositionen annähernd deckungsgleich. Bei Messposition  $x = -30$  mm liegt das Ergebnis von Messfenster 2 höher als jenes von Messfenster 1. Da hier allerdings auch eine sehr niedrige Datenrate vorherrscht liegt der Grund der Abweichung vermutlich an der Messungenauigkeit.

In den Abbildungen 4.17 und 4.18 ist das Geschwindigkeitsprofil und die Datenrate für die Sekundärkomponente zu sehen. Hier erkennt man ebenfalls die Tendenz, dass die Datenrate bei der Messung mit dem Messfenster 2 bei nahezu jeder Messposition höher ist als bei Fenstergeometrie 1. Es zeigt sich auch, dass der Geschwindigkeitsverlauf für Geometrie 2 deutlich glatter ist und sich weniger Ausreißer bilden. Im Vergleich mit Messfenster 1 ist zu erkennen, dass die Ausreißer



**Abbildung 4.16:** Datenrate der Transportkomponente bei unterschiedlicher Messfenstergeometrie

bei Fenster 1 auch mit einer sehr geringen Datenrate verbunden sind, was zu einer höheren Messgenauigkeit führen kann. Aus diesen Gründen erscheint das Geschwindigkeitsprofil von Geometrie 2 deutlich belastbarer als jenes von Geometrie 1.

Wie zuvor erwähnt, ist für beide Geschwindigkeitskomponenten der Trend erkennbar, dass die Datenrate für die Fenstergeometrie 2 höher ist, als bei Messfenster 1. Abgesehen von der Verwendung kleinerer Seedingpartikel könnte ein weiterer Grund dafür an der unterschiedlichen Dicke der Messfenster liegen. Mit einer Dicke von 8 mm ist das Messfenster 2 um 2 mm dünner als das Messfenster 1. Da die Laserstrahlen beim Durchqueren von Material abgeschwächt werden, kann die geringere Dicke von Messfenster 2 ein Grund für die höhere Datenrate sein. Eine Ausnahme für diesen Trend zeigt sich bei Messposition  $x = 30$  mm, bei der für die Fenstergeometrie 2 für beide Geschwindigkeitskomponenten eine niedrigere Datenrate als für das Messfenster 1 generiert wurde. Dies könnte an einer nicht optimalen Eindüsung der Seedings bei diesem Messpunkt liegen.

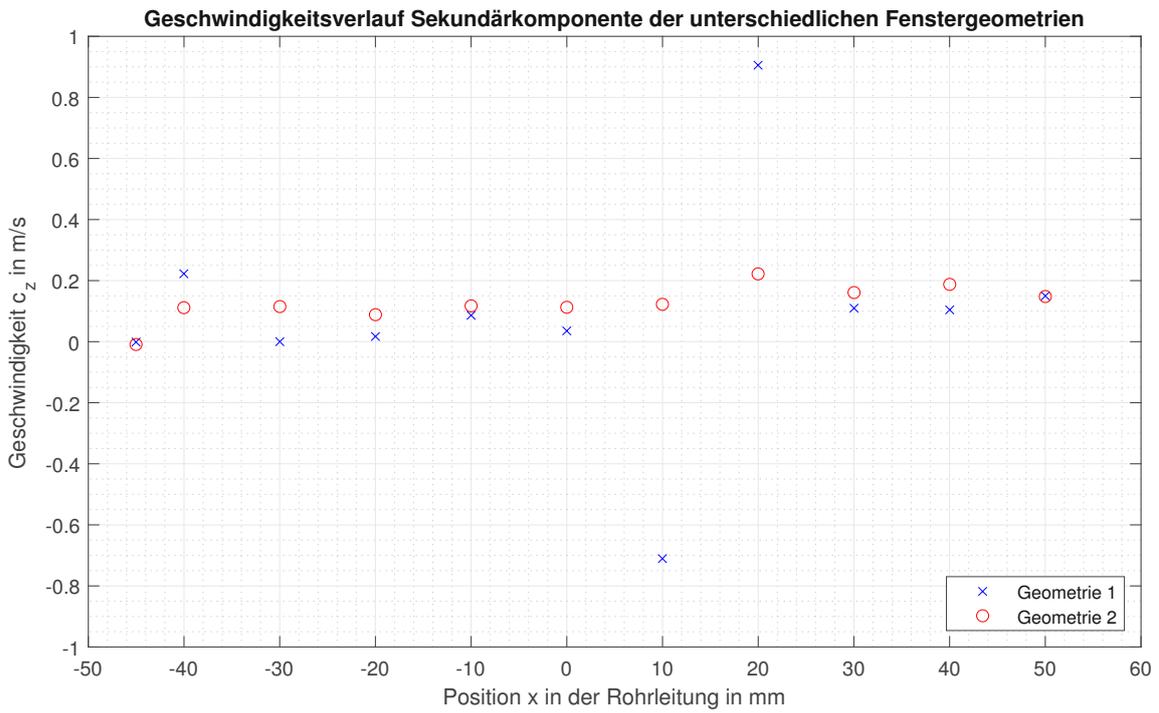


Abbildung 4.17: Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente bei unterschiedlichen Messfenstergeometrien

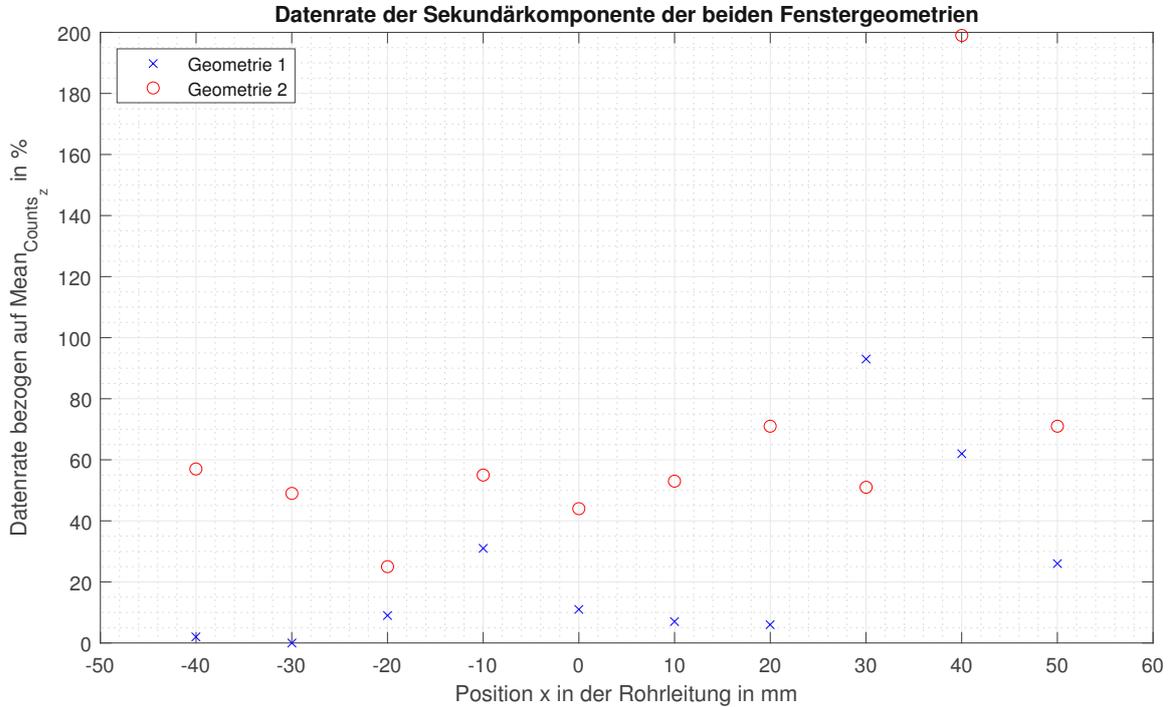


Abbildung 4.18: Datenrate der Sekundärkomponente bei unterschiedlichen Messfenstergeometrien

## 4.2.6 Geschwindigkeitsprofil unterschiedlicher Fallhöhen

Der Geschwindigkeitsverlauf der Transport- und Sekundärkomponente wurde für die drei Fallhöhen  $H = 50$  m,  $H = 60$  m und  $H = 70$  m gemessen.

Die Parameter der Messungen sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst:

<b>Messzeit</b>	60 s	60 s	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 1	Flansch 1	Flansch 1
<b>Verwendete Seedings</b>	PSP50	PSP50	PSP50
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1	Geometrie 1	Geometrie 1
<b>Fallhöhe</b>	50 m	60 m	70 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm	24 mm	24 mm

**Tabelle 4.5:** Parameter der Messungen bei unterschiedlicher Fallhöhe

Die Ergebnisse der Messungen sind in nachstehenden Abbildungen dargestellt. Zunächst sind in Abbildung 4.19 die Geschwindigkeitsprofile der Transportkomponente bei unterschiedlicher Fallhöhe zu sehen. Alle drei Messungen zeigen den typischen Geschwindigkeitsverlauf und unterscheiden sich lediglich im Betrag der Geschwindigkeit. Wie zu erwarten war, ergibt sich bei größerer Fallhöhe eine höhere Geschwindigkeit als bei niedrigeren Fallhöhen. Abbildung 4.20 sind die Datenraten der Transportkomponente zu entnehmen. Hier zeigt sich, dass die Datenrate bei allen drei Messungen ähnlich hoch ist. Auffällig ist allerdings, dass es Messpositionen gibt, wie beispielsweise bei  $x = -30$  mm und  $x = -20$  mm, an denen die Datenrate mit unter 50% von  $Mean_{Counts_y}$  bei allen Messungen sehr niedrig ist. Es gibt aber auch Messpositionen, wie  $x = -10$  mm,  $x = 30$  mm und  $x = 40$  mm, an denen die Datenrate mit 200-450% von  $Mean_{Counts_y}$  immer sehr hoch ist. Dies kann am Gefüge des Acrylglases liegen. Wenn dieses an gewissen Stellen Inhomogenitäten aufweist, können die Laserstrahlen dort umgelenkt und abgeschwächt werden. Weitere Gründe für eine geringere Datenrate an einzelnen Positionen können an Beschädigungen und Bearbeitungsfehler am Glas liegen, wodurch die Laserstrahlen ebenfalls abgelenkt werden können.



Abbildung 4.19: Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente bei unterschiedlichen Fallhöhen

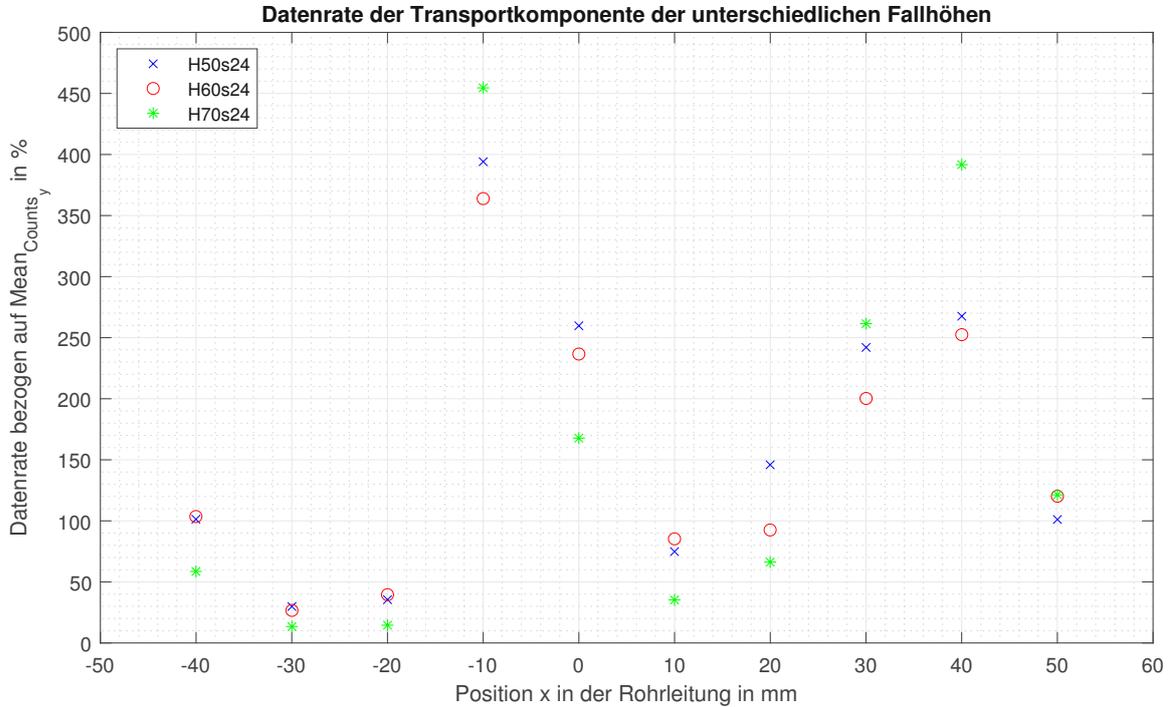
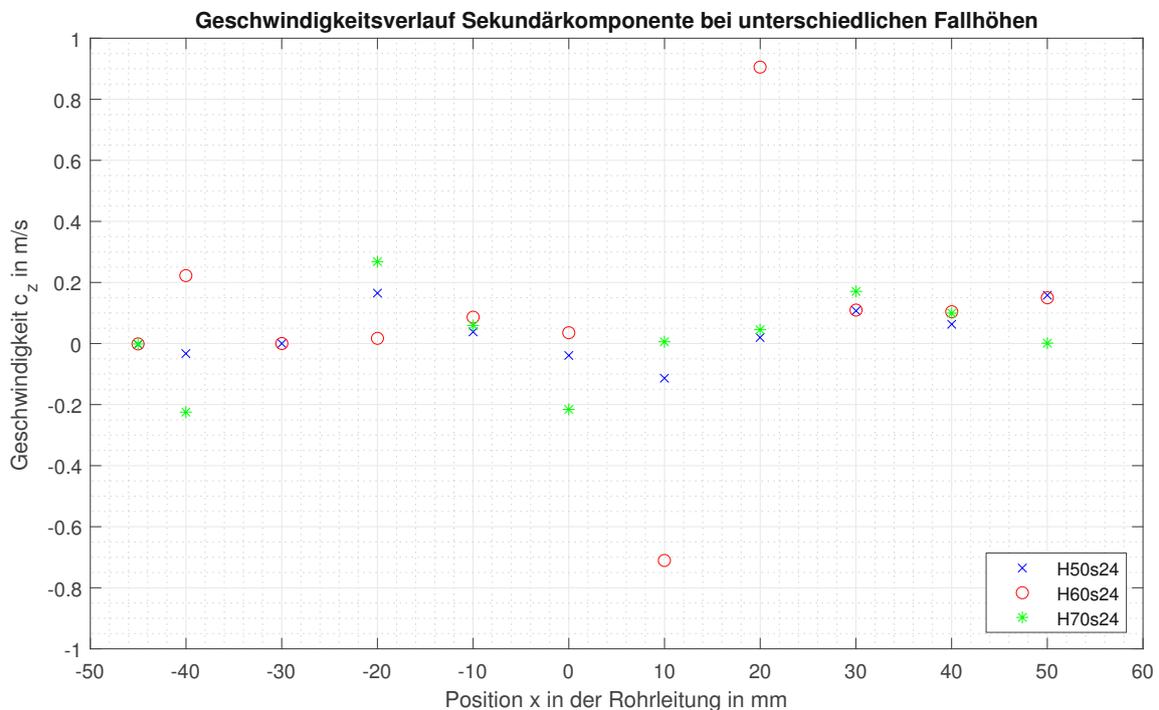
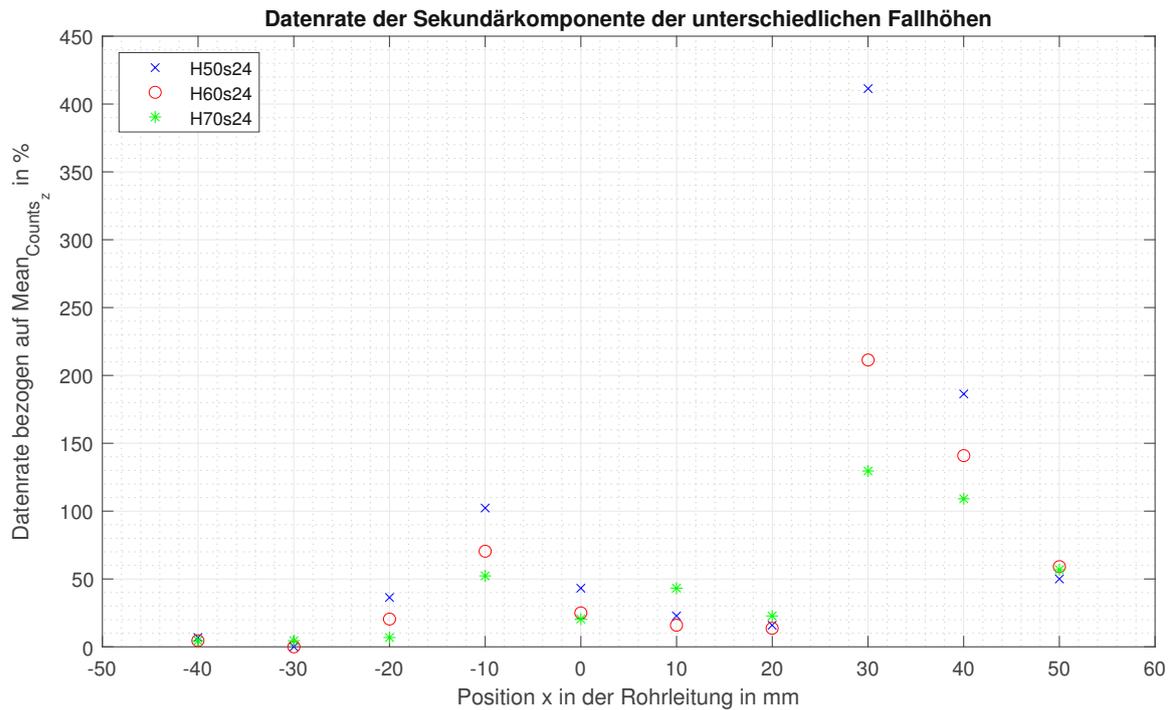


Abbildung 4.20: Datenrate der Transportkomponente bei unterschiedlichen Fallhöhen

In den Abbildungen 4.21 und 4.22 sind die Geschwindigkeitsverläufe und die Datenraten der Sekundärkomponente ersichtlich. Da es sich bei dem untersuchten Prüfstand um eine gerade Zuleitung handelt, sollte es zu keinen Sekundärströmungen kommen und daher die Geschwindigkeit in Sekundärrichtung im Bereich von 0 m/s liegen. Dies ist bei den erhaltenen Messergebnissen auch meist der Fall. Nur bei der Messung von einer Fallhöhe von  $H = 60$  m kommt es zu zwei Ausreißern bei  $x = 10$  mm und  $x = 20$  mm. Da bei diesen Messpositionen aber nur 6 bzw 7 Counts detektiert werden konnte ist anzunehmen, dass die Abweichung der Geschwindigkeit lediglich aufgrund von Fehldetektionen oder einzelnen Fehlströmungen zu Stande kommt.



**Abbildung 4.21:** Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente bei unterschiedlichen Fallhöhen



**Abbildung 4.22:** Datenrate der Sekundärkomponente bei unterschiedlichen Fallhöhen

#### 4.2.7 Turbulenzgrad

Durch die gewählte Messfenstergeometrie, bei der es möglich ist die Geschwindigkeiten der Transport- und der Umfangskomponente im selben Punkt zu messen, ist es auch möglich den Turbulenzgrad zu bestimmen.

Die Parameter der Messungen sind in nachstehender Tabelle 4.6 zusammengefasst:

<b>Messzeit</b>	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 1
<b>Verwendete Seedings</b>	PSP50
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1
<b>Fallhöhe</b>	60 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm

**Tabelle 4.6:** Parameter der Messungen des Turbulenzgrades

Der Gesamtturbulenzgrad lässt sich wie in Kapitel 2.6 beschrieben mit der Gleichung

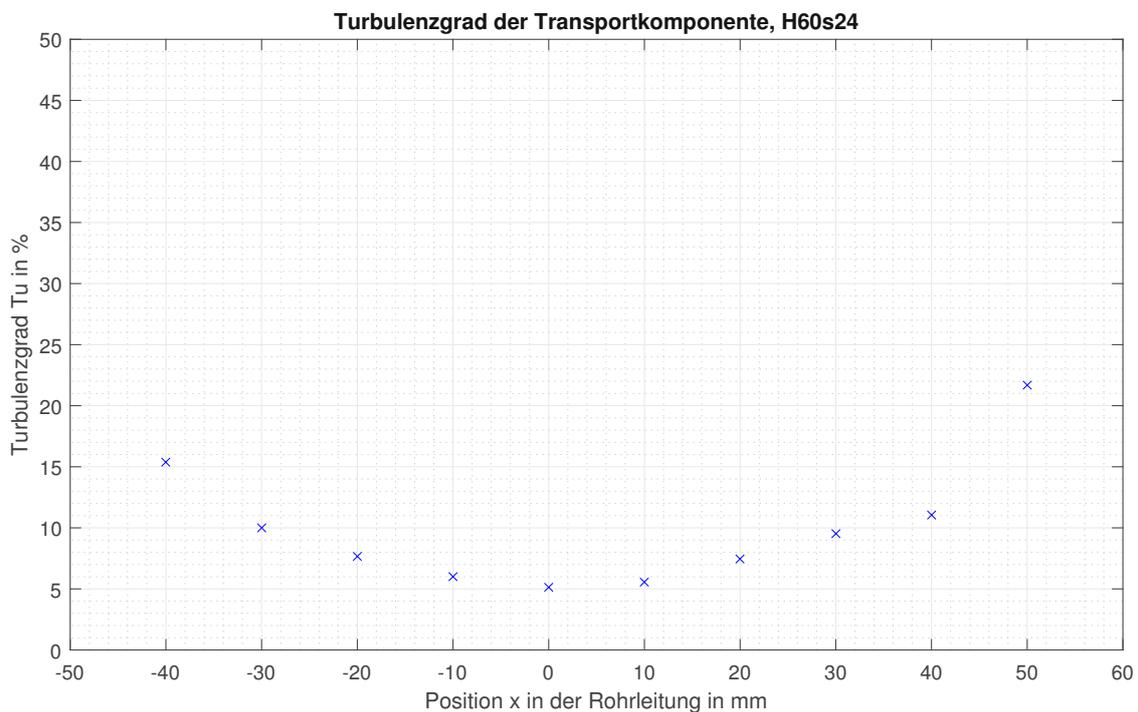
$$Tu = \frac{1}{c_\infty} \sqrt{\frac{1}{3}(\overline{c_x'^2} + \overline{c_y'^2} + \overline{c_z'^2})} \quad (4.3)$$

berechnen. Des Weiteren ist es möglich den Turbulenzgrad auch für die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten zu bestimmen. Die Formeln zur Berechnung des Turbulenzgrades für die Transportkomponente  $Tu_y$  und die Sekundärkomponente  $Tu_z$  lauten:

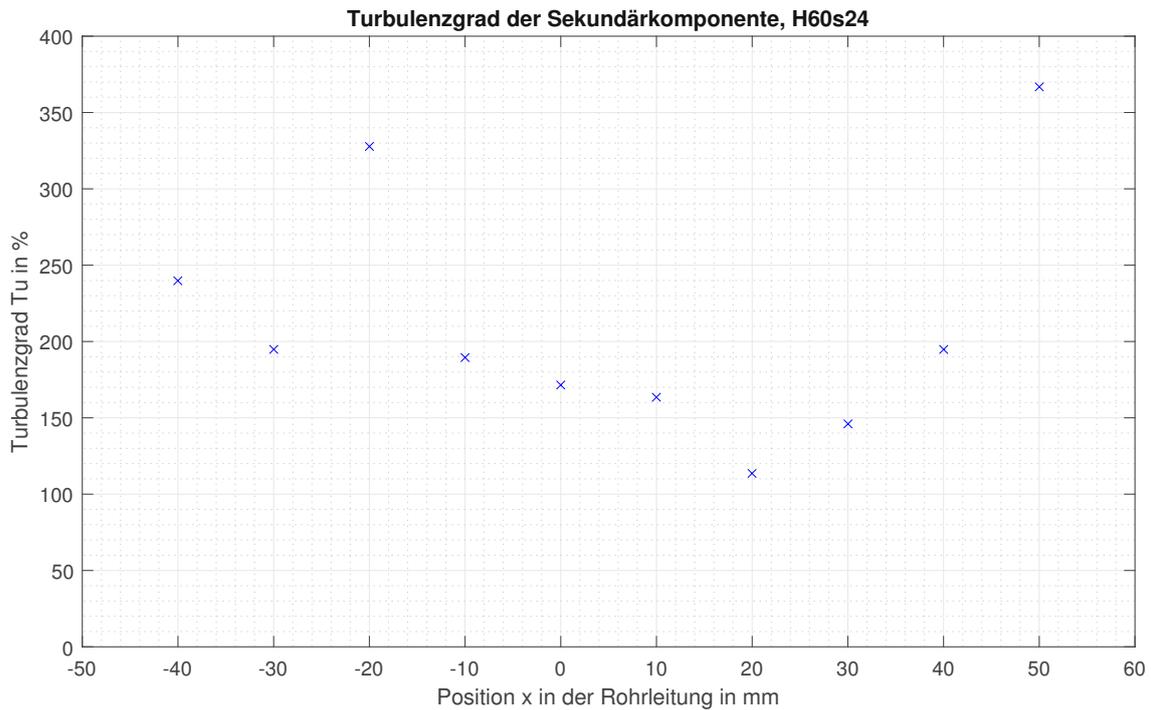
$$Tu_y = \frac{\sqrt{\overline{c_y'^2}}}{c_y} \quad (4.4)$$

$$Tu_z = \frac{\sqrt{\overline{c_z'^2}}}{c_z} \quad (4.5)$$

Damit ergeben sich die nachfolgenden Abbildungen 4.23 und 4.24 in denen der Turbulenzgrad der jeweiligen Richtung für jede Messposition aufgetragen wurde.



**Abbildung 4.23:** Turbulenzgrad der Transportkomponente bei einer Fallhöhe  $H = 60$  m und einer Düsenstellung  $s = 24$  mm



**Abbildung 4.24:** Turbulenzgrad der Sekundärkomponente bei einer Fallhöhe  $H = 60$  m und einer Düsenstellung  $s = 24$  mm

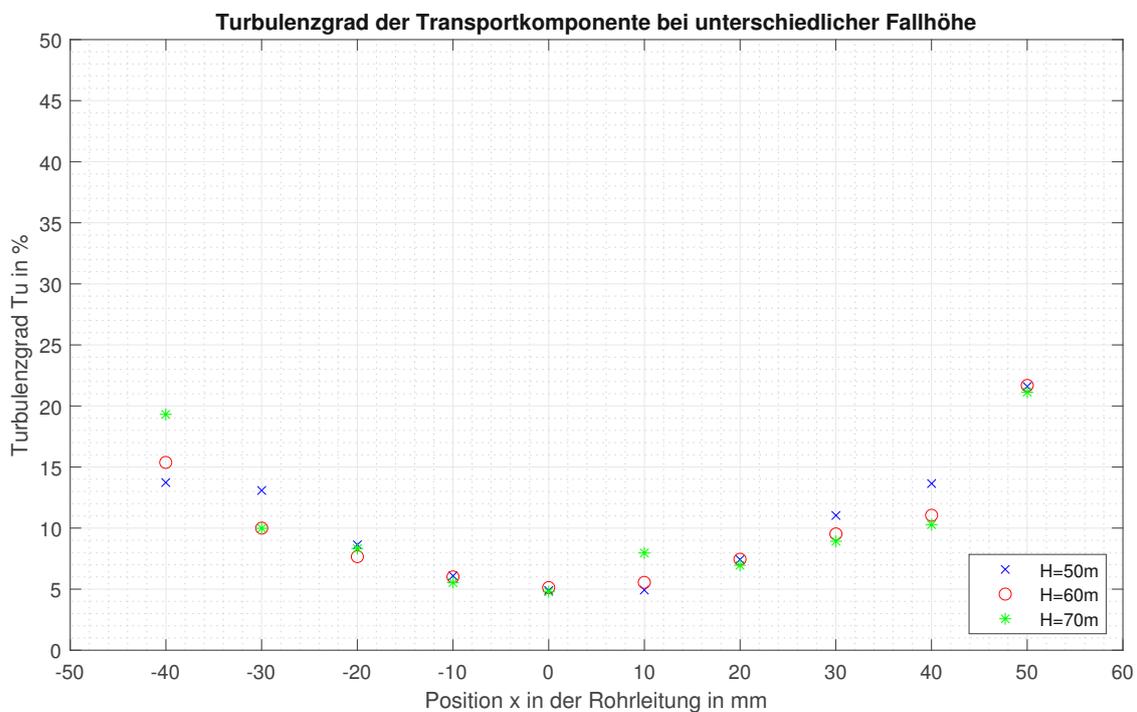
In Abbildung 4.23 ist zunächst der Turbulenzgrad für die Transportkomponente  $Tu_y$  dargestellt. Es zeigt sich ein umgekehrt proportionaler Verlauf zum Geschwindigkeitsprofil, was sich aufgrund der Formel zur Berechnung des Turbulenzgrades erklären lässt. Die zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Schwangungsgeschwindigkeiten  $\overline{c_y^2}$  liegen bei allen Messpositionen in etwa in der gleichen Größenordnung, tendenziell sind sie bei jenen Messpositionen in Wandnähe etwas höher als bei jenen Messpositionen in der Mitte der Rohrleitung. Die Geschwindigkeiten  $\overline{c_y}$  an den einzelnen Messstellen sind, wie in bereits abgebildeten Verläufen, in der Mitte der Rohrleitung am höchsten und nehmen zur Wand hin ab. Aus diesen beiden Gründen ergibt sich der hier vorherrschende Verlauf für den Turbulenzgrad. Wie in Kapitel 2.6 bereits erwähnt, wird in der Literatur [20] ein üblicher Turbulenzgrad einer turbulenten Strömung von  $Tu \approx 0,1$  angeführt, was einem Turbulenzgrad von 10% entspricht. Mit Turbulenzgraden der einzelnen Messpositionen zwischen 5 und 22% liegen die Messergebnisse daher in einem Bereich der sich mit diesen Angaben deckt.

Beim Turbulenzgrad für die Sekundärkomponente  $Tu_z$  in Abbildung 4.24 liegen die Werte allerdings deutlich höher. Unter Betrachtung der Formel 4.5 mit der

der Turbulenzgrad berechnet wird, lässt sich dies aber gut erklären. Da es sich bei diesem Prüfstand aufgrund der langen, geraden Zuleitung um eine weitgehend drallfreie Strömung handelt, liegen die mittleren Geschwindigkeiten  $\bar{c}_z$  der einzelnen Messpositionen im Bereich von  $-0.2$  bis  $0.2$  m/s und sind somit sehr klein. Liegt bei einer Division ein Quotient sehr kleinen Wertes nahe Null vor, so ergibt sich ein sehr hohes Ergebnis.

Aufgrund der durchwegs drallfreien Strömung, wodurch die maßgebliche Geschwindigkeitskomponente jene in Transportrichtung ist, kann der Turbulenzgrad dieser Richtung als repräsentativ für die gesamte Strömung angesehen werden.

In nachfolgender Abbildung 4.25 ist der Turbulenzgrad für die drei untersuchten Fallhöhen  $H = 50$  m,  $H = 60$  m und  $H = 70$  m dargestellt.



**Abbildung 4.25:** Turbulenzgrad bei unterschiedlicher Fallhöhe

Es ist für alle drei Fallhöhen ein ähnlicher Verlauf des Turbulenzgrades ersichtlich. Die Werte des Turbulenzgrades liegen für alle Fallhöhen zwischen 5 und 22% und somit in einem plausiblen Bereich. Es ist eine leichte Tendenz erkennbar, dass der Turbulenzgrad bei stiegender Fallhöhe, und somit höherer Geschwindigkeit abnimmt. An jenen Positionen, an denen sich dieser Trend nicht widerspiegelt, kann aufgrund niedriger Datenrate auf Messunsicherheiten geschlossen werden.

## 4.2.8 Reproduzierbarkeit

Eine gute Reproduzierbarkeit gibt Auskunft über das Maß an Qualität einer Messung. Ist ein Messaufbau von guter Qualität, dann erhält man bei mehrmaligem Messen des selben Betriebspunkt immer gleiche Ergebnisse. Um dies zu Betrachten wurden nachstehend die Ergebnisse mehrerer Messungen desselben Betriebspunkts dargestellt.

Die Parameter der Messungen sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst:

<b>Messzeit</b>	60 s
<b>Position Seedingeindüsung</b>	Flansch 1
<b>Verwendete Seedings</b>	PSP50
<b>Messfenstergeometrie</b>	Geometrie 1
<b>Fallhöhe</b>	60 m
<b>Düsenstellung</b>	24 mm

**Tabelle 4.7:** Parameter der Messungen zur Betrachtung der Reproduzierbarkeit

In den Abbildungen 4.26 und 4.27 sind die Geschwindigkeitsverläufe für die Transport- und Sekundärkomponente dargestellt. Hierbei zeigt sich insbesondere für die Transportkomponente eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse. Bei der Geschwindigkeit der Sekundärkomponente kommt es bei den meisten Messpositionen ebenfalls zu guten Überlappungen der Ergebnisse, lediglich an den Positionen  $x = 10 \text{ mm}$  und  $x = 20 \text{ mm}$  weichen die Messergebnisse stärker voneinander ab. Bei einer Betrachtung der Datenrate in Abbildung 4.28 zeigt sich, dass an diesen beiden Stellen bei Messreihe 1 (blaue x-Markierungen) und 3 (grüne \*-Markierungen) weniger Counts detektiert werden konnten, als bei Messreihe 2 (rote o-Markierungen), wodurch die Messergebnisse der Messreihe 1 und 3 einer größeren Messunsicherheit unterliegen.



Abbildung 4.26: Geschwindigkeitsverlauf der Transportkomponente bei H60s24

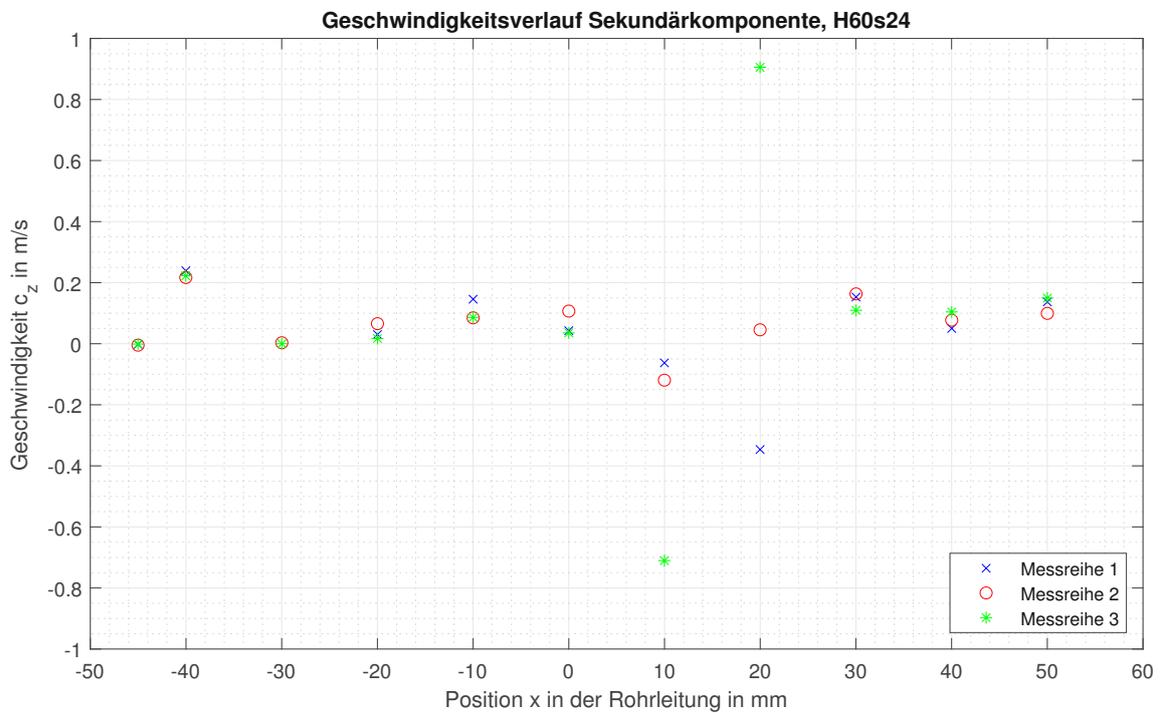


Abbildung 4.27: Geschwindigkeitsverlauf der Sekundärkomponente bei H60s24

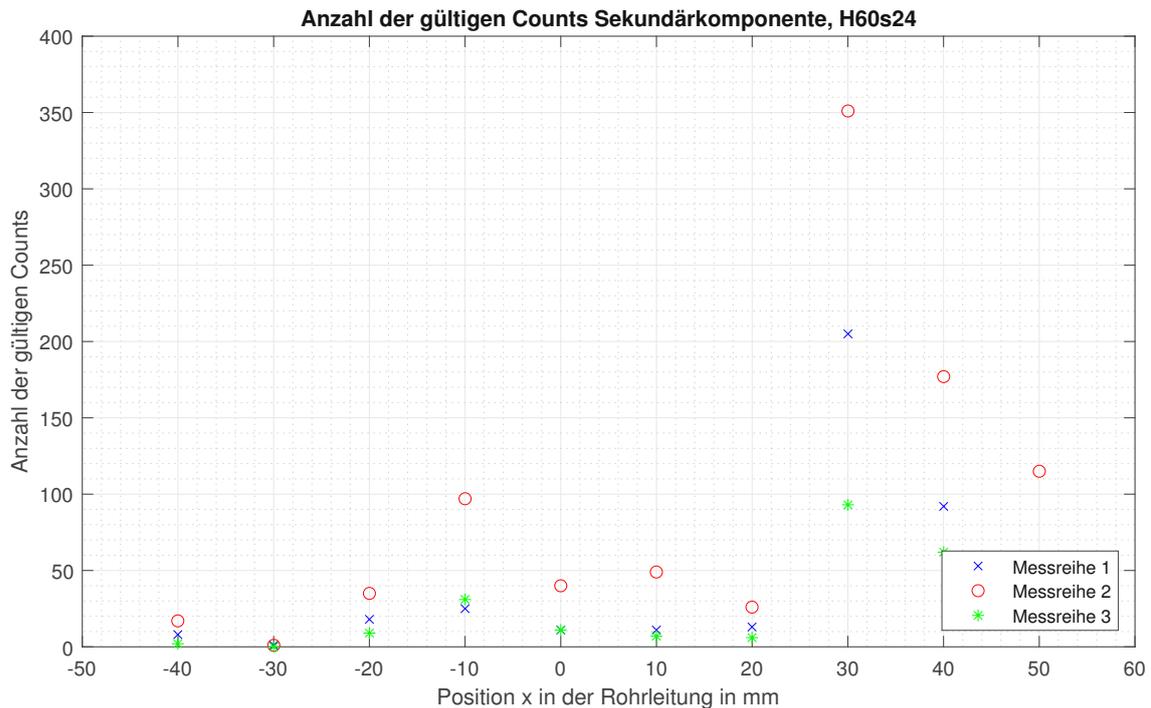


Abbildung 4.28: Anzahl der gültigen Counts der Sekundärkomponente

### 4.3 Zusammenfassung

Die LDA-Messungen haben zusammenfassend folgende Ergebnisse geliefert:

- Durch die LDA-Messungen in der Rohrleitung konnte ein vollausgebildetes, turbulentes Strömungsprofil nachgewiesen werden.
- Der Flansch 1 hat sich aufgrund der höheren Datenrate als bessere Position zur Eindüsung der Seedings gezeigt.
- Die Messfenstergeometrie 2 ist vorzuziehen, da hier aufgrund der geringeren Dicke des Fensters eine höhere Datenrate erzielt werden konnte.
- An jener Messposition die nahe an der Aluminium-Rohrinnenseite liegt ( $x = -45$  mm) war es aufgrund von Reflexionen der Laserstrahlen am Aluminium schwieriger die Strömungsgeschwindigkeit zu messen. Hier kam es zu höheren Messabweichungen.
- Für die Seedinginjizierung sollte die Verwendung einer kontinuierlich fördernden Pumpe angedacht werden, um das Seeding-Wasser-Gemisch gleichmäßig über die gesamte Messdauer in das System einbringen zu können.

# Kapitel 5

## Optische Strahlanalyse mittels Kamera

### 5.1 Messablauf

Um Rückschlüsse auf die Strahlqualität eines Freistrahls ziehen zu können betrachtet man folgende Eigenschaften eines Freistrahls:

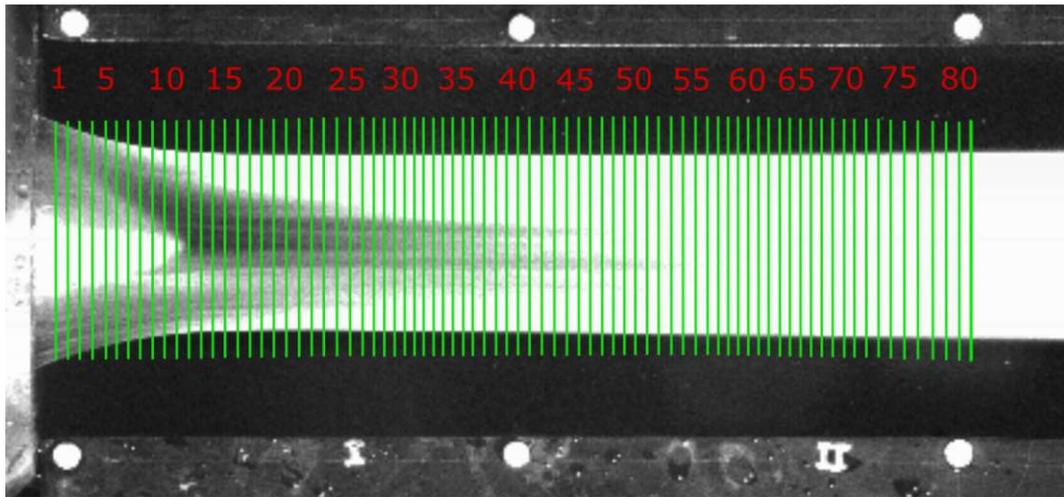
- Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung
- Strahlaufweitung
- Strahlablenkung

Hierfür wurden Messungen bei insgesamt 16 Betriebspunkten durchgeführt. Die Fallhöhe  $H$  und die Düsenstellung  $s$  wurden dabei wie folgt variiert:

- Variation der Fallhöhe:  $H = 40$  m,  $H = 50$  m,  $H = 60$  m,  $H = 70$  m
- Variation der Nadelstellung:  $s = 12$  mm,  $s = 18$  mm,  $s = 24$  mm,  $s = 30$  mm

Der untersuchte Bereich des Freistrahls umfasst die ersten 140 mm nach dessen Austritt aus der Düse. Dieser Bereich wurde in 80 *Regions of Interest* unterteilt, was bedeutet, dass an diesen 80 Stellen entlang der Strahlachse die Strahldicke und Lage der Strahlmittellachse erfasst wurde. Diese Unterteilung ist in Abbildung 5.1

ersichtlich. Für jeden Betriebspunkt wurde die Strahlkontur mindestens 100 mal gemessen und im Zuge der Nachbearbeitung ausgewertet. Dabei wurde für jede Position der ROI's der Mittelwert und die Standardabweichung der Strahlkontur und der Strahlmittelachse ermittelt. Jeder Betriebspunkt wurde mindestens dreimal vermessen, um auch Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit der Messungen ziehen zu können.

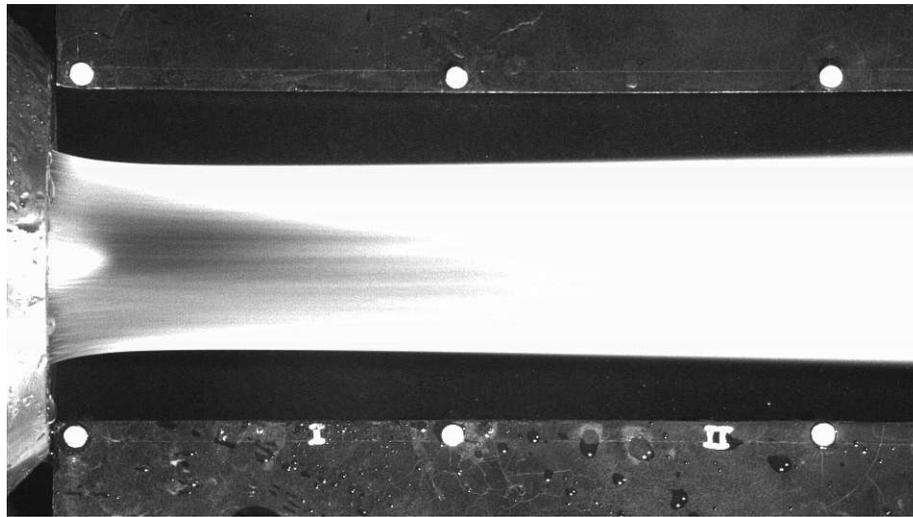


**Abbildung 5.1:** ROI's entlang des Freistrahls

## 5.2 Messergebnisse und Interpretation

### 5.2.1 Strahlkontur

Bei sämtlichen Messungen wurde die Strahlkontur des Freistrahls vermessen und zusätzlich dazu eine Aufnahme des Freistrahls gespeichert. Exemplarisch ist in Abbildung 5.2 die Aufnahme beim Betriebspunkt  $H = 60$  m und  $s = 24$  mm angeführt. Zur besseren Übersicht der Arbeit wurden die Aufnahmen der restlichen Betriebspunkte im Anhang A angeführt.



**Abbildung 5.2:** Aufnahme des Freistrahls bei  $H = 60$  m und  $s = 24$  mm

In den nachfolgenden Abbildungen 5.3, 5.4, 5.5 und 5.6 sind die Strahlkonturen der betrachteten Betriebspunkte abgebildet. Dabei sind in den unterschiedlichen Farben die obere und untere Strahlkontur sowie die Strahlmittelachse bei verschiedenen Düsenstellungen dargestellt. Die schwarzen x-Markierungen zeigen den Punkt der maximalen Einschnürung des Freistrahls an.

Bei diesen Abbildungen ist gut zu erkennen, dass der Strahl nach dem Austritt aus der Düse zunächst eingeschnürt wird, bis er den Punkt der maximalen Einschnürung erreicht. Anschließend weitet sich der Strahl wieder auf. Bei geringerer Düsenöffnung schnüren sich die Strahlen deutlich stärker ein, als bei größeren Düsenöffnungen.

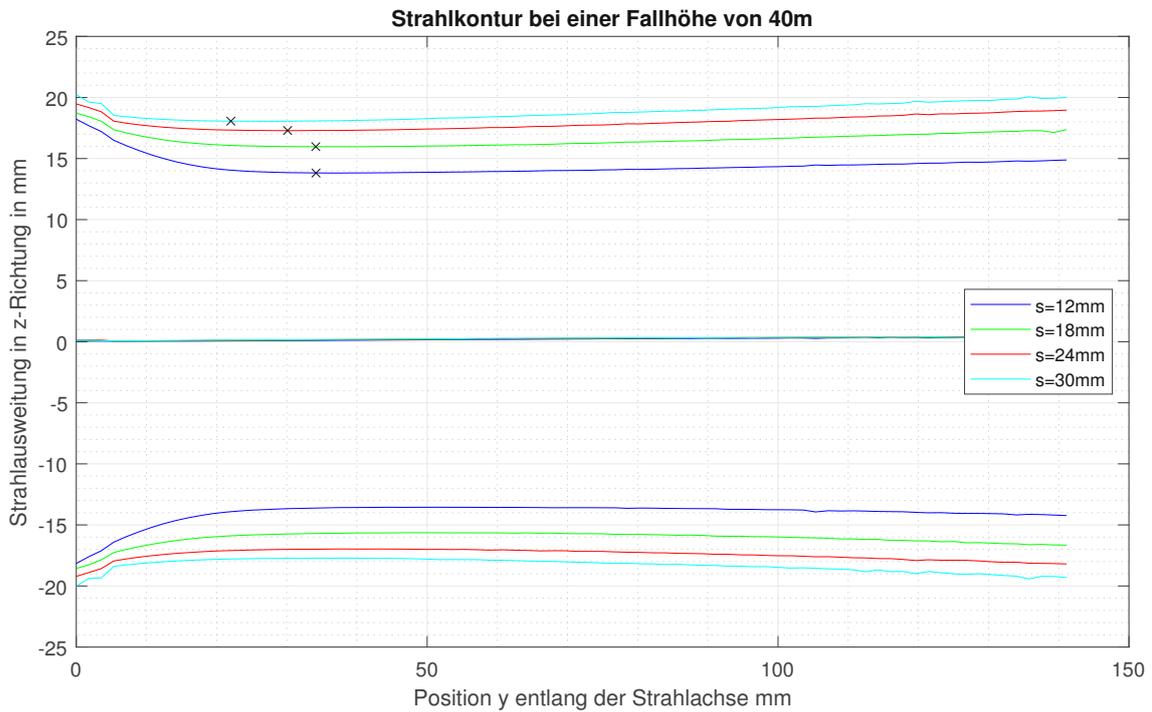


Abbildung 5.3: Strahlkonturen bei einer Fallhöhe von 40m

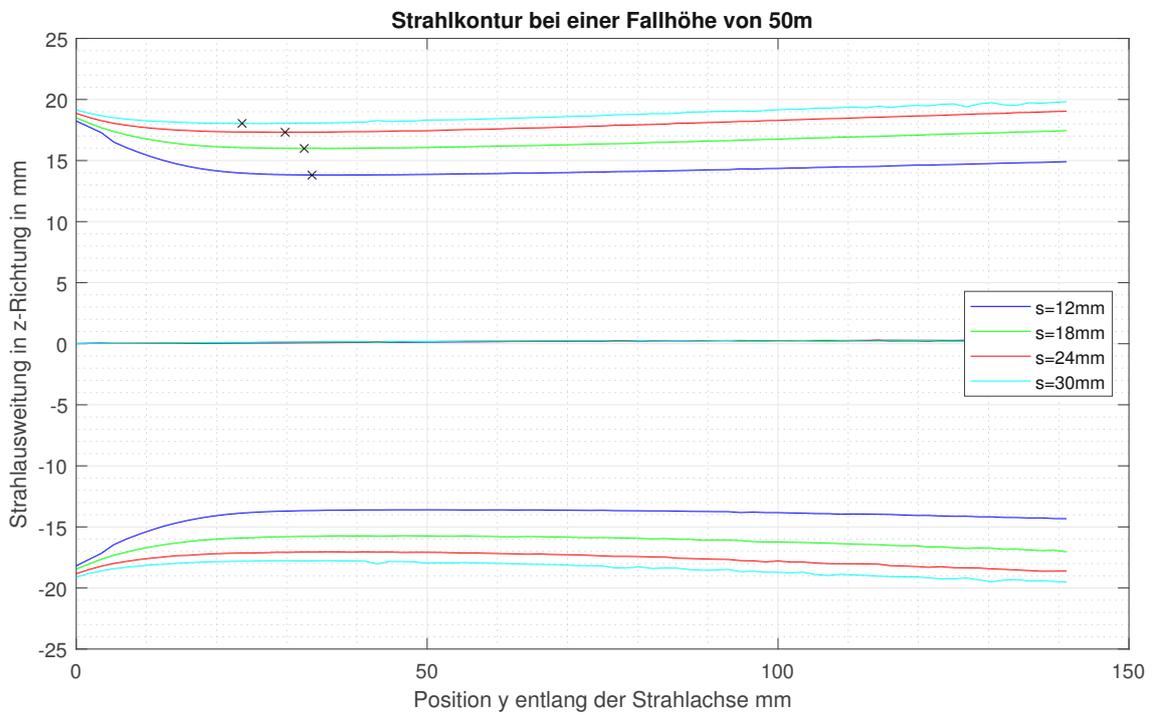


Abbildung 5.4: Strahlkonturen bei einer Fallhöhe von 50m

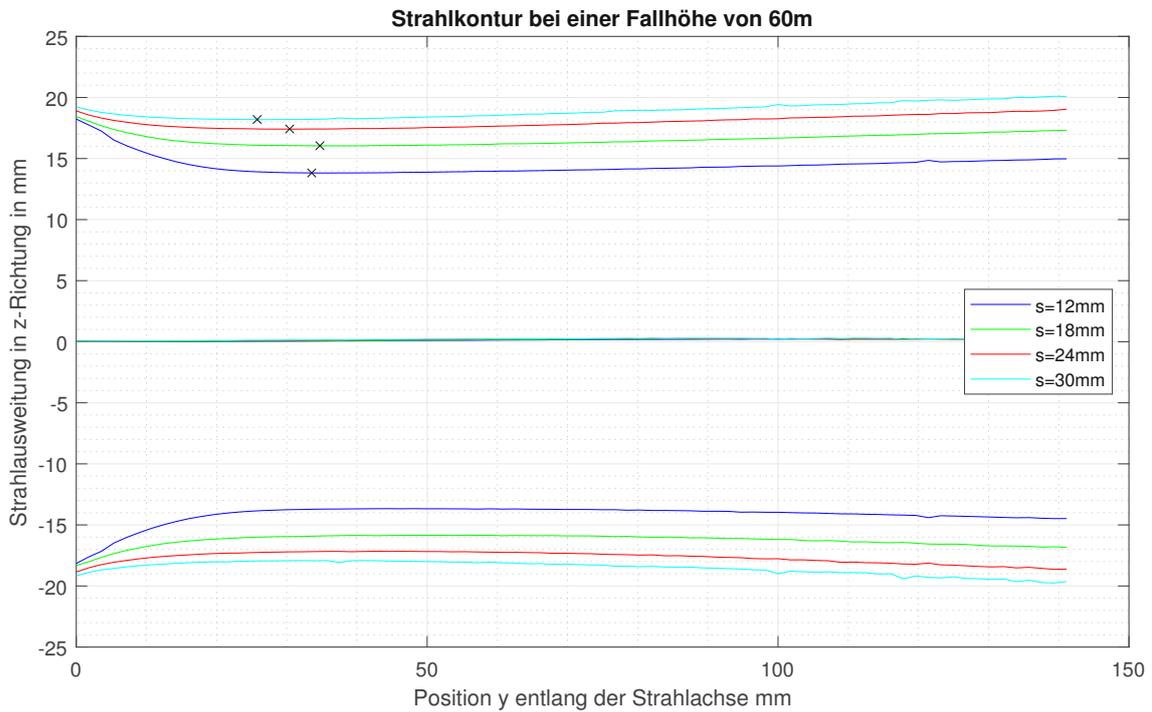


Abbildung 5.5: Strahlkonturen bei einer Fallhöhe von 60m

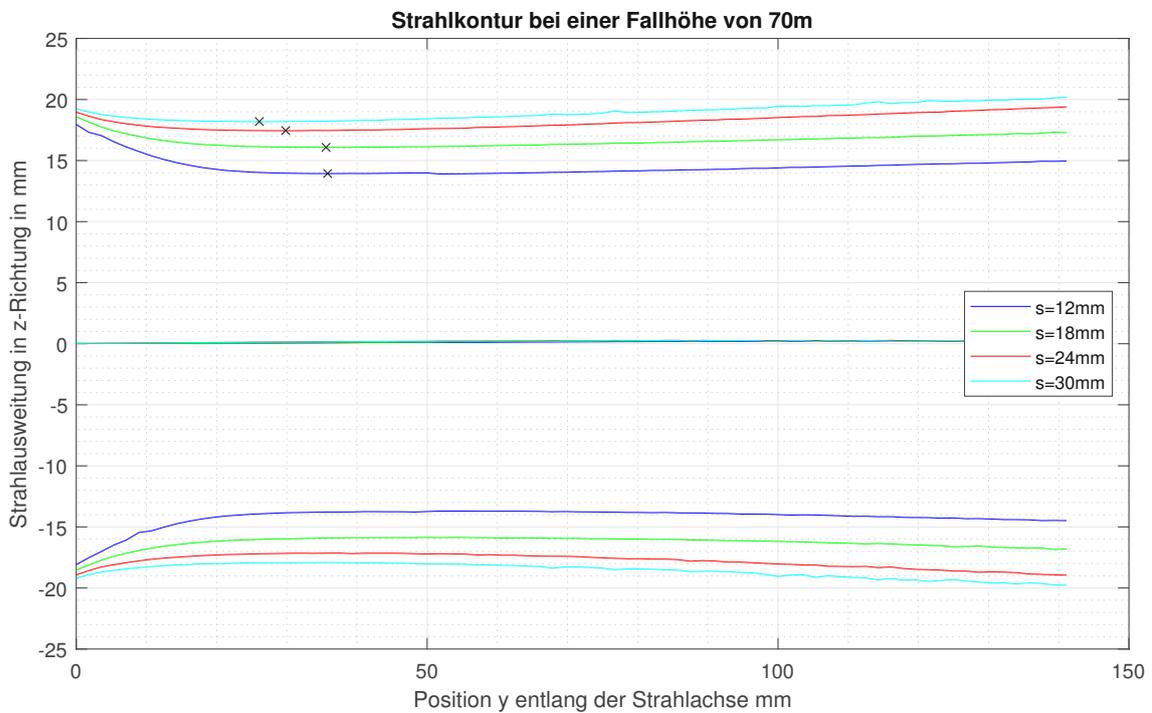


Abbildung 5.6: Strahlkonturen bei einer Fallhöhe von 70m

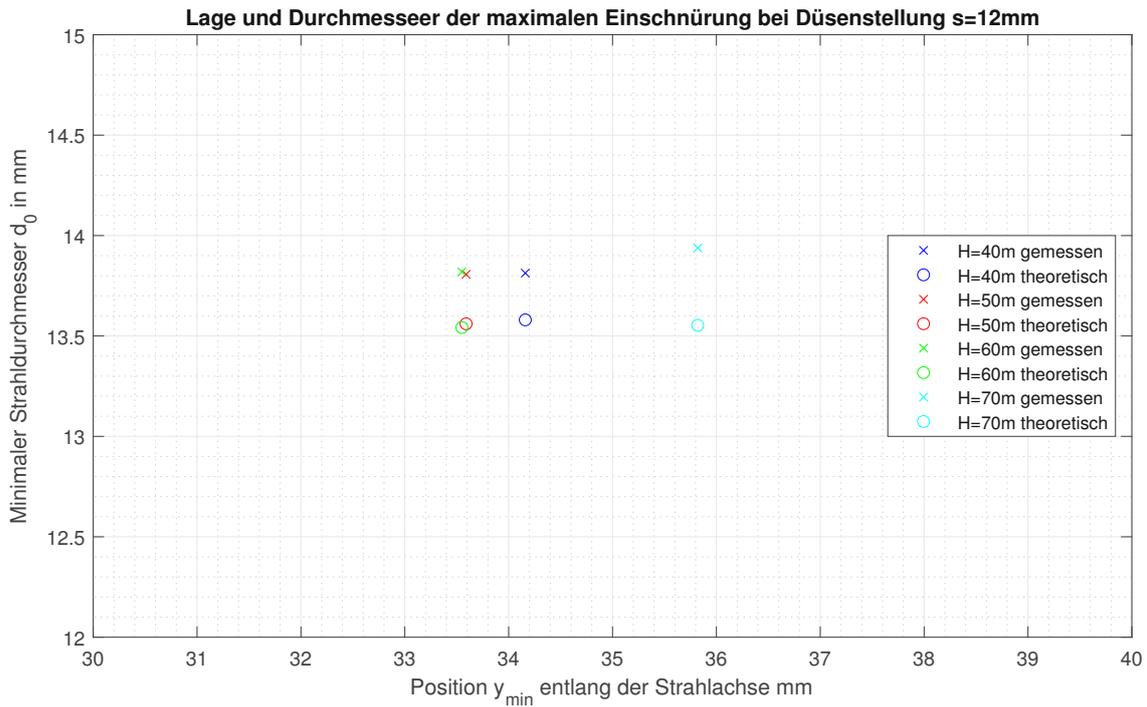
## 5.2.2 Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung

In den zuvor angeführten Diagrammen 5.3, 5.4, 5.5 und 5.6 wurde der Punkt der maximalen Einschnürung bereits markiert. In nachfolgender Tabelle 5.1 sind die Positionen  $y_0$  und die Durchmesser  $d_0$  dieser Punkte zusammengefasst. Zusätzlich dazu wurde der theoretische Strahldurchmesser  $d_{0_{theor}}$  nach Gleichung 2.3 aus [21] berechnet, mit dem minimalen Durchmesser der Messung  $d_0$  verglichen und sowohl die absoluten als auch die relativen Abweichungen der beiden Größen ermittelt.

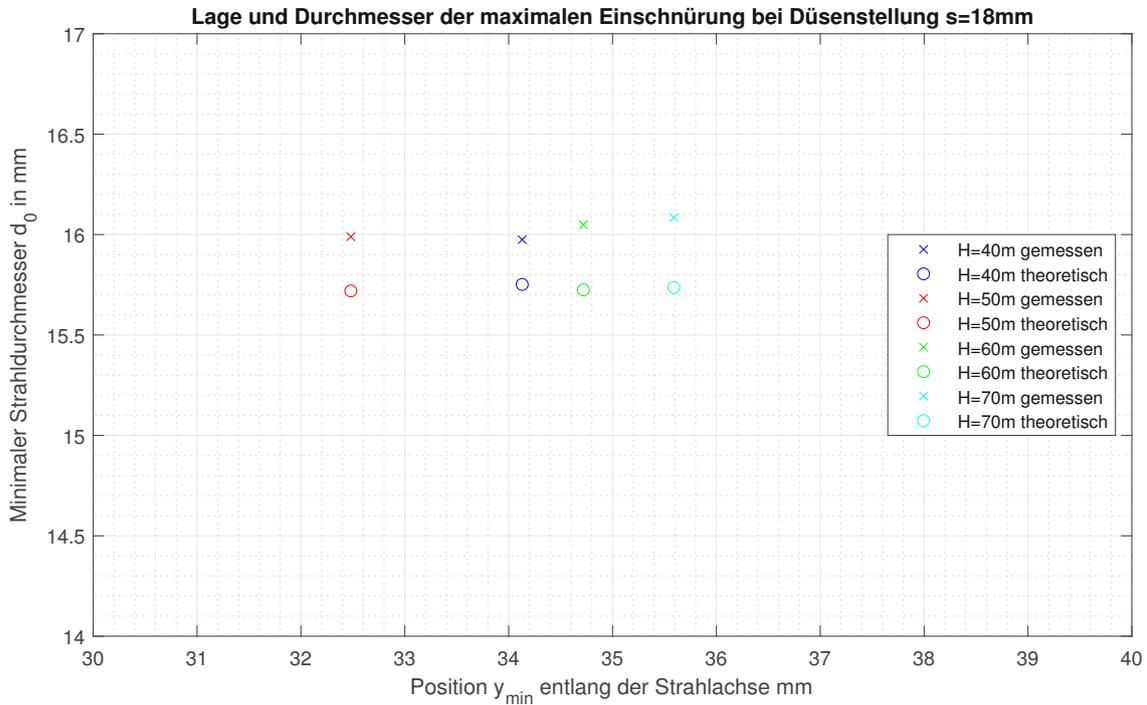
Betriebsp.	$y_{min}$ in mm	$d_0$ in mm	$d_{0_{theor}}$ in mm	$d_{0_{theor}} - d_0$	$\frac{d_{0_{theor}} - d_0}{d_{0_{theor}}}$
H40s12	34.16	27.626	27.1604	0.4656	0.0171
H40s18	34.13	31.9493	31.5035	0.4458	0.0142
H40s24	30.12	34.5952	34.0440	0.5512	0.0162
H40s30	22.03	36.1239	35.5661	0.5578	0.0157
H50s12	33.59	27.614	27.1211	0.4929	0.0182
H50s18	32.48	31.9783	31.4389	0.5394	0.0172
H50s24	29.76	34.635	34.1005	0.5345	0.0157
H50s30	23.63	36.0903	35.5714	0.5189	0.0146
H60s12	33.55	27.6377	27.0841	0.5536	0.0204
H60s18	34.72	32.0976	31.4490	0.6486	0.0206
H60s24	30.41	34.8426	34.0133	0.8293	0.0244
H60s30	25.78	36.3969	35.5458	0.8511	0.0240
H70s12	35.82	27.8763	27.1057	0.7706	0.0284
H70s18	35.59	32.1689	31.4728	0.6961	0.0221
H70s24	29.84	34.9092	34.0339	0.8753	0.0257
H70s30	26.09	36.3922	35.5031	0.8891	0.0250

**Tabelle 5.1:** Maximale Einschnürung des Freistrahls

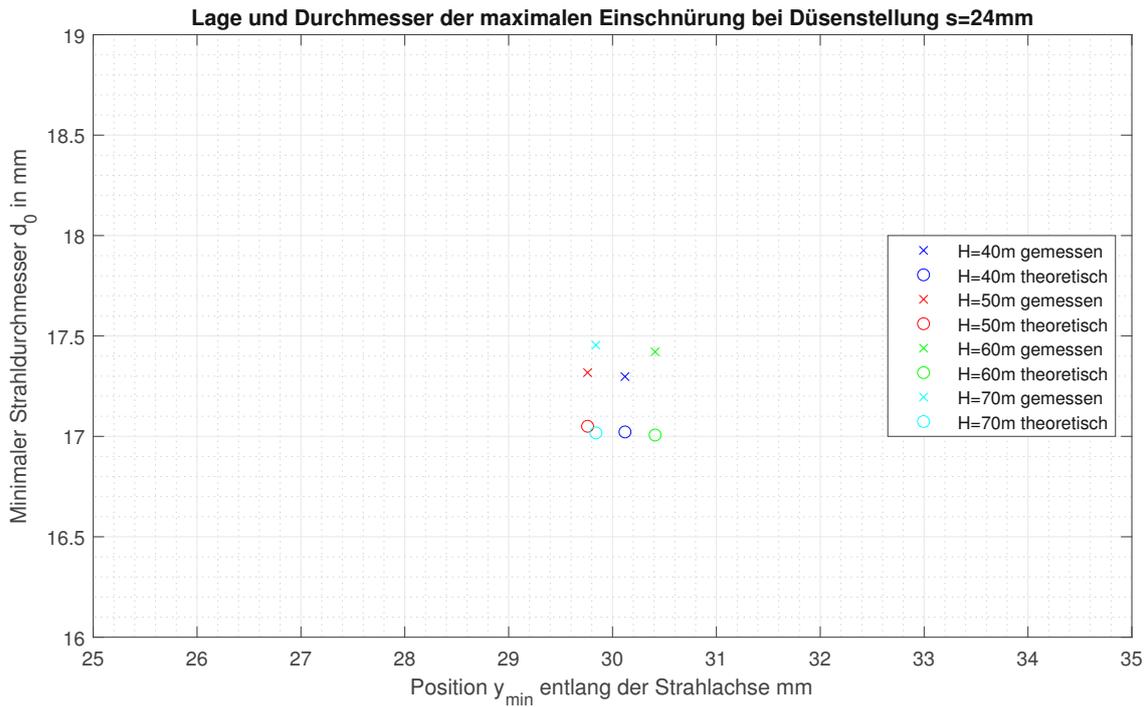
In den Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9 und 5.10 sind die Lage und der Durchmesser der maximalen Einschnürung für die unterschiedlichen Fallhöhen bei gleicher Düsenstellung dargestellt. Zusätzlich dazu wurde der berechnete theoretische Strahldurchmesser eingezeichnet. Es ist zu beachten, dass die Werte des theoretischen Strahldurchmessers zur besseren Vergleichbarkeit an den selben Positionen wie die gemessenen Werte  $d_0$  eingezeichnet wurden, die Lage der maximalen Einschnürung aufgrund mangelnder Formel aber nicht berechnet wurde.



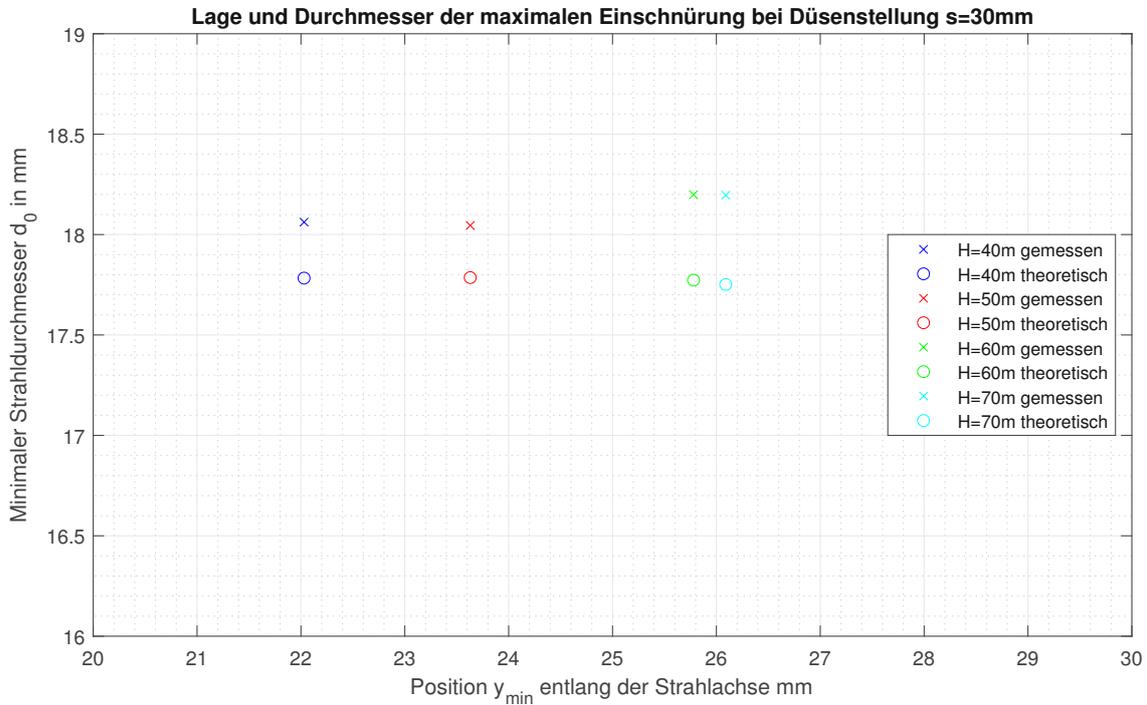
**Abbildung 5.7:** Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung bei einer Düsenstellung von  $s = 12\text{ mm}$



**Abbildung 5.8:** Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung bei einer Düsenstellung von  $s = 18\text{ mm}$



**Abbildung 5.9:** Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung bei einer Düsenstellung von  $s = 24\text{ mm}$



**Abbildung 5.10:** Lage und Durchmesser der maximalen Einschnürung bei einer Düsenstellung von  $s = 30\text{ mm}$

Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigen, dass bei steigender Düsenöffnung, der Ort der maximalen Einschnürung immer näher am Düsenaustritt liegt. Der Vergleich der minimalen Durchmesser der Messungen  $d_0$  und der theoretischen Strahldurchmesser  $d_{0_{theor}}$  zeigt, dass der reale Wert ein wenig höher liegt, als der berechnete Wert. Dies ist auch in den Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9 und 5.10 erkennbar. Die Abweichungen ansich liegen in einem Bereich zwischen 1.4 und 2.8 %, somit liefert die analytische Formel durchwegs plausible Ergebnisse für erste Abschätzungen des Durchmesseres des Freistrahls.

Die Abbildungen 5.7, 5.8, 5.9 und 5.10 zeigen auch, dass der Wert des minimalen Strahldurchmessers  $d_0$  bei gleicher Düsenstellung für alle betrachteten Fallhöhen gleich groß ist, lediglich die Lage der maximalen Einschnürung  $y_{min}$  variiert. Ab einer Fallhöhe von  $H = 50$  m zeigt sich die Tendenz, dass die maximale Einschnürung des Freistrahls bei steigender Fallhöhe immer weiter entfernt von der Düse eintritt. Dies ist bei den drei Düsenstellungen  $s = 12$  mm (Abbildung 5.7),  $s = 18$  mm (Abbildung 5.8) und  $s = 30$  mm (Abbildung 5.10) besonders gut erkennbar. Eine Ausnahme dieses Trends ist bei der Düsenstellung  $s = 24$  mm (Abbildung 5.9) festzustellen, bei der die Lage der maximalen Einschnürung  $y_{min}$  deutlich weniger von der Fallhöhe abhängig ist und die Ergebnisse daher viel näher aneinander liegen.

### 5.2.3 Strahlaufweitung

Nachdem der Freistrahls seine maximale Einschnürung erreicht hat, weitet sich dieser wieder auf. Die Strahlaufweitung führt zu einer geringeren Energiedichte im Freistrahls. Je stärker diese Dispersion ausgeprägt ist, desto höher sind die Verluste bei der Energieumsetzung. [21]

In nachstehender Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Strahlaufweitung angeführt.

Betriebspunkt	Strahlaufweitung $\alpha$
H40s12	0.6672°
H40s18	0.8949°
H40s24	1.0301°
H40s30	1.1366°
H50s12	0.7013°
H50s18	0.9201°
H50s24	1.0346°
H50s30	0.9636°
H60s12	0.7431°
H60s18	0.8239°
H60s24	0.9470°
H60s30	1.1148°
H70s12	0.7299°
H70s18	0.7689°
H70s24	1.1538°
H70s30	1.1211°

**Tabelle 5.2:** Strahlaufweitung des Freistrahls

Diese Ergebnisse sind in Abbildung 5.11 graphisch dargestellt. Hier wurde die Strahlaufweitung über der jeweiligen Fallhöhe aufgetragen. Gleiche Düsenstellungen wurden bei jeder Fallhöhe gleich markiert. Betrachtet man die drei Düsenstellungen  $s = 12$  mm (blaue x-Markierungen),  $s = 18$  mm (rote o-Markierungen) und  $s = 24$  mm (grüne \*-Markierung) zeigt sich die Tendenz, dass die Strahlaufweitung bei größerer Düsenöffnung zunimmt. Eine Ausnahme dieses Trends ist bei Düsenstellung  $s = 30$  mm für die beiden Fallhöhen  $H = 50$  m und  $H = 70$  m festzustellen. Da bei diesen Fallhöhen die Messergebnisse für die Düsenstellung  $s = 24$  mm

und  $s = 30 \text{ mm}$  recht nahe aneinanderliegen, kann sich die Abweichung dieses Trends aufgrund von Messunsicherheiten ergeben. Ein Einfluss der Fallhöhe auf die Strahlaufweitung ist nicht eindeutig erkennbar.

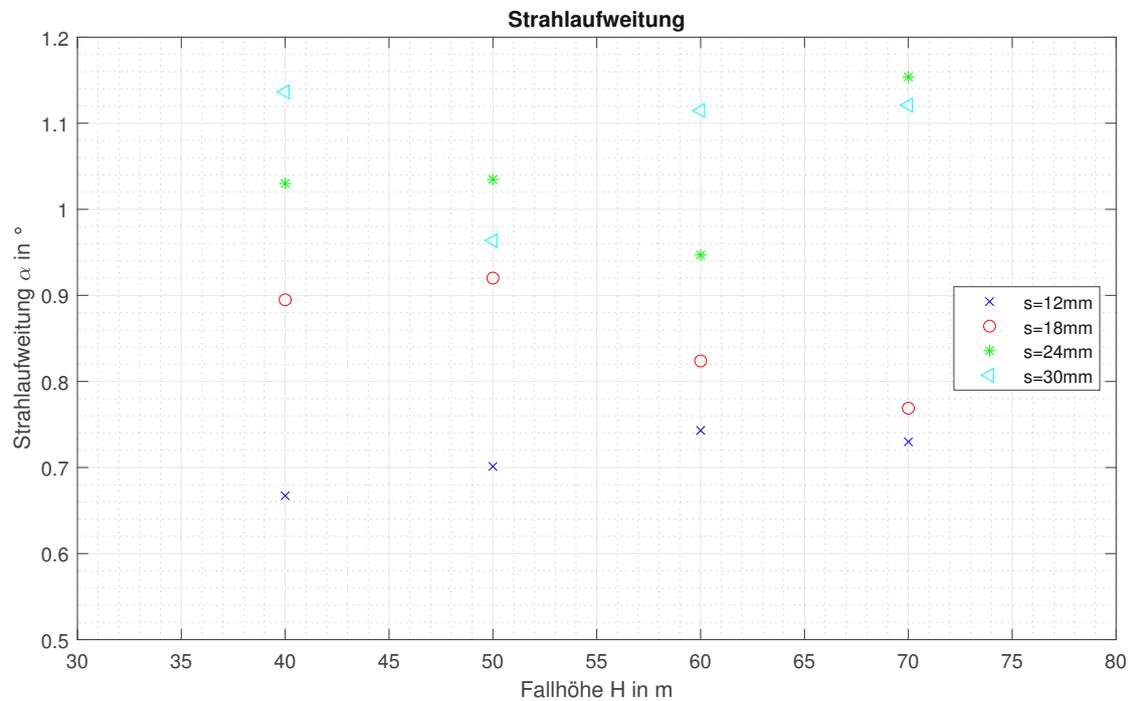


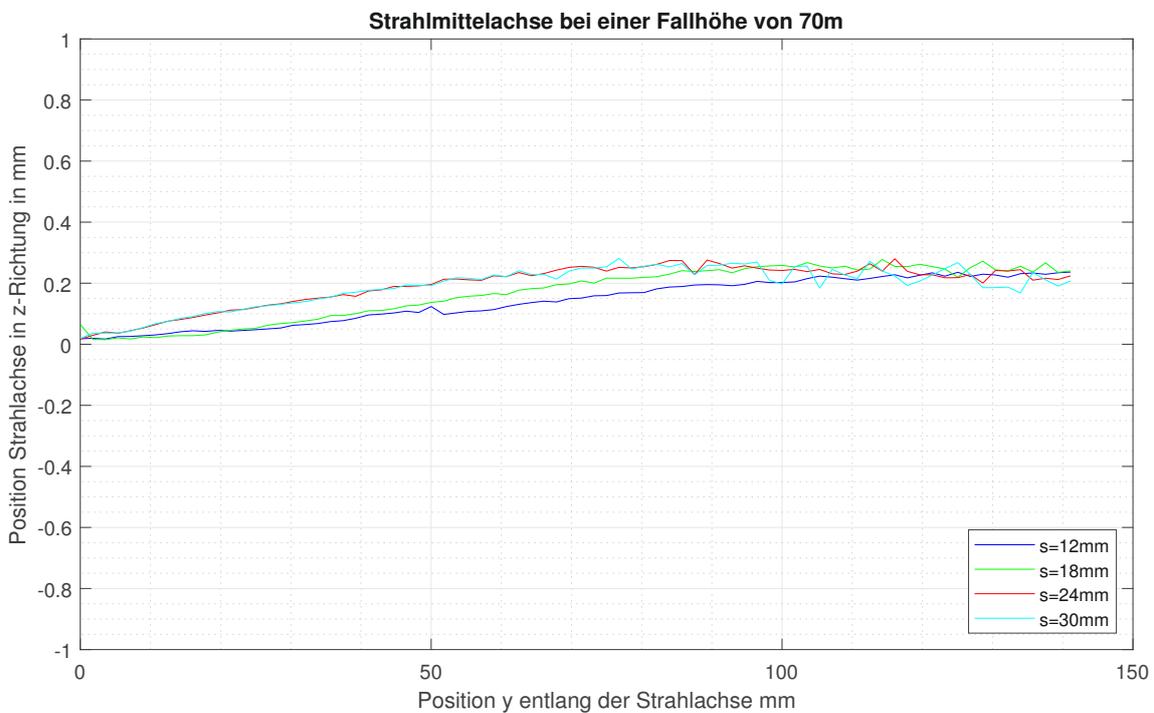
Abbildung 5.11: Strahlaufweitung des Freistrahls

Mit der Grundlage von Experimenten kam *Staubli* in *Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Pelton-turbinen* [21] auf Messergebnisse von ca.  $1.1^\circ$  für die Strahlaufweitung bei einer geraden Zuleitung. Die Messergebnisse am Peltondüsenprüfstand des Labors für hydraulische Strömungsmaschinen weisen durchwegs ähnliche Ergebnisse wie bei *Staubli* auf. Mit Ergebnissen zwischen  $0.67^\circ$  und  $1.15^\circ$  ist die Strahlaufweitung bei den meisten Betriebspunkten sogar deutlich niedriger. In der Literatur führt *Zhang* in *Freistrahlturbinen* [26] eine übliche Strahlaufweitung von  $0.2^\circ$  bis  $0.5^\circ$  aufgrund von Beobachtungen an. Allerdings spricht *Zhang* hier von einer scheinbaren Strahlerweiterung die sich aufgrund von turbulentem Impulsaustausch mit der Umgebungsluft ergibt. Bei einer Abschätzung des Energieverlustes für eine Strahlaufweitung von  $0.2^\circ$  errechnete er einen Verlust von 11%. Da dieser Wert allerdings sehr unrealistisch ist schloss *Zhang* darauf, dass sich die Strahlaufweitung eines Freistrahls nur auf dessen Oberfläche beschränkt. Laut seinen Abschätzungen würde ein anzunehmender Energieverlust von 1% sogar nur einer Strahlaufweitung von lediglich  $0.02^\circ$  bedeuten. [26]

### 5.2.4 Strahlableitung

Aufgrund diverser Einbauten, Umlenkungen und Abzweigungen in der Rohrleitung vor der Düse, kann der Freistrahel von seiner idealen theoretischen Strahlachse abgelenkt werden. Ist dies der Fall, trifft der Freistrahel nicht mehr ideal auf die Becherschneide, was zu einer schlechteren Energieumsetzung und höheren mechanischen Belastungen der Turbinenwelle führt. Mithilfe optischer Strahlanalyse ist es möglich die Strahlachse auszuwerten und die Strahlabweichung zu ermitteln.

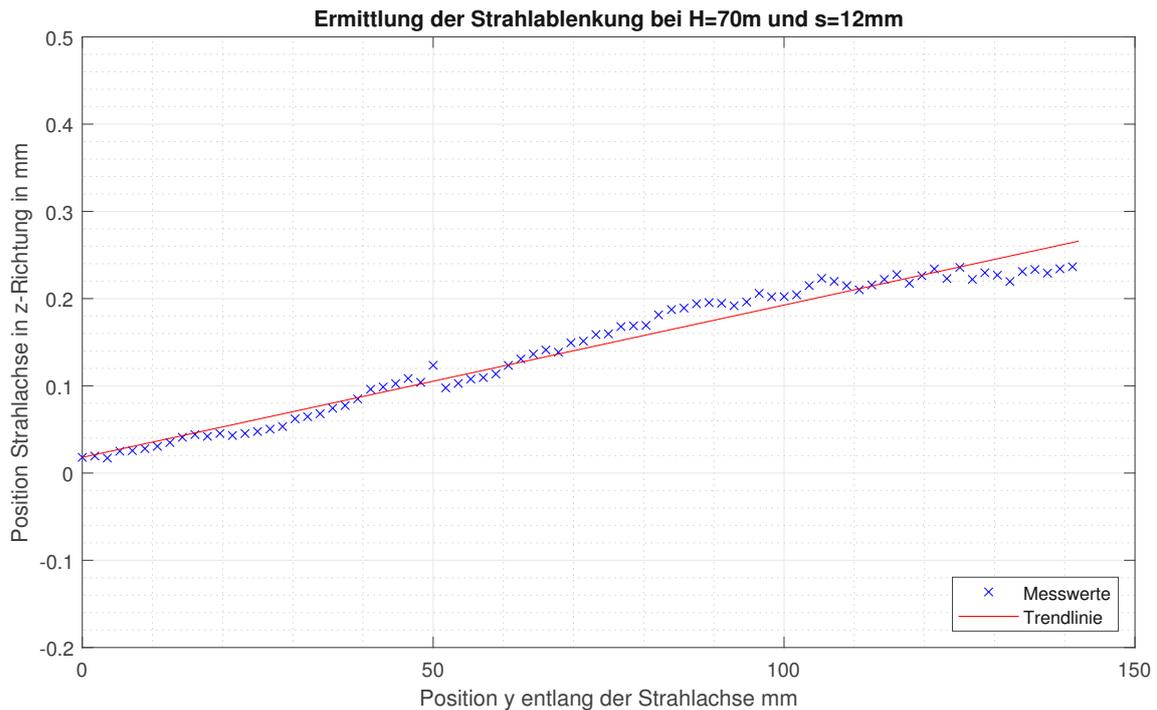
In Abbildung 5.12 sind exemplarisch die Verläufe der Strahlmittelachse der unterschiedlichen Düsenstellungen bei einer Fallhöhe von  $H = 70$  m angeführt. Die Diagramme der Fallhöhen  $H = 40$  m,  $H = 50$  m und  $H = 60$  m sind Anhang B zu entnehmen.



**Abbildung 5.12:** Strahlmittelachsen bei einer Fallhöhe von 70m

Da die Strahlabweichung erheblich von Einbauten und Rohrkrümmern vor der Düse abhängt ist anzunehmen, dass die Strahlableitung bei einer geraden Zuleitung gegen Null geht. Die Abbildung 5.12 zeigt für jeden Betriebspunkt einen nahezu geraden Verlauf mit einer leichten Tendenz in die positive vertikale Richtung.

Um die Strahlablenkung der einzelnen Betriebspunkte besser analysieren und vergleichen zu können, wurde durch die Messpunkte der Strahlmittelachse eine Trendgerade gelegt und deren Steigung ermittelt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 5.13 für den Betriebspunkt  $H = 70$  m und  $s = 12$  mm dargestellt. Die gemessenen Punkte der Strahlmittelachse sind mit blauen x markiert und die Trendlinie ist in rot eingezeichnet.



**Abbildung 5.13:** Ermittlung der Strahlablenkung bei  $H = 70$  m und  $s = 12$  mm

Für die in Abbildung 5.13 ersichtliche Trendlinie ergab sich folgende Funktionsgleichung:

$$f(y) = 0,001746 \cdot y + 0,018 \tag{5.1}$$

Aus der Steigung von 0.007 46 ergibt sich somit eine Strahlablenkung von  $0.100^\circ$ .

In nachstehender Tabelle 5.3 sind die Strahlablenkungen  $\gamma$  für alle untersuchten Betriebspunkte zusammengefasst.

Betriebspunkt	Strahlablenkung $\gamma$
H40s12	0.137°
H40s18	0.136°
H40s24	0.142°
H40s30	0.128°
H50s12	0.127°
H50s18	0.103°
H50s24	0.083°
H50s30	0.060°
H60s12	0.111°
H60s18	0.112°
H60s24	0.082°
H60s30	0.060°
H70s12	0.100°
H70s18	0.113°
H70s24	0.077°
H70s30	0.068°

**Tabelle 5.3:** Strahlablenkung des Freistrahls

Diese Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 auch grafisch dargestellt. Hier wurde die Strahlablenkung über der Fallhöhe H aufgetragen. Jene Werte die den selben Düsenöffnungen entsprechen wurden gleich markiert.

Die Abbildung 5.14 zeigt, dass die Strahlablenkung mit zunehmender Düsenöffnung abnimmt. Dies könnte zum einen an der größeren Wassermasse bei größeren Düsenöffnungen liegen. Zum anderen könnte die geringere Strahlablenkung bei größerer Düsenöffnung auch daran liegen, dass sich die Düsenadel bei diesen Positionen weiter in ihrer Führung befindet als bei geringen Düsenöffnungen. Dazu kommt, dass sich bei großer Düsenöffnung eine größere Wassermenge rund um die Düsenadel befindet, wodurch sich aufgrund des höheren Wasserdrucks eine zusätzliche Selbstzentrierung der Düsenadel einstellt.

Des Weiteren ist in Abbildung 5.14 zu erkennen, dass der Freistrahls bei einer Fallhöhe von 40 m, unabhängig von der Düsenstellung, die stärkste Ablenkung aufweist. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Fallhöhe und damit die Geschwindigkeit und

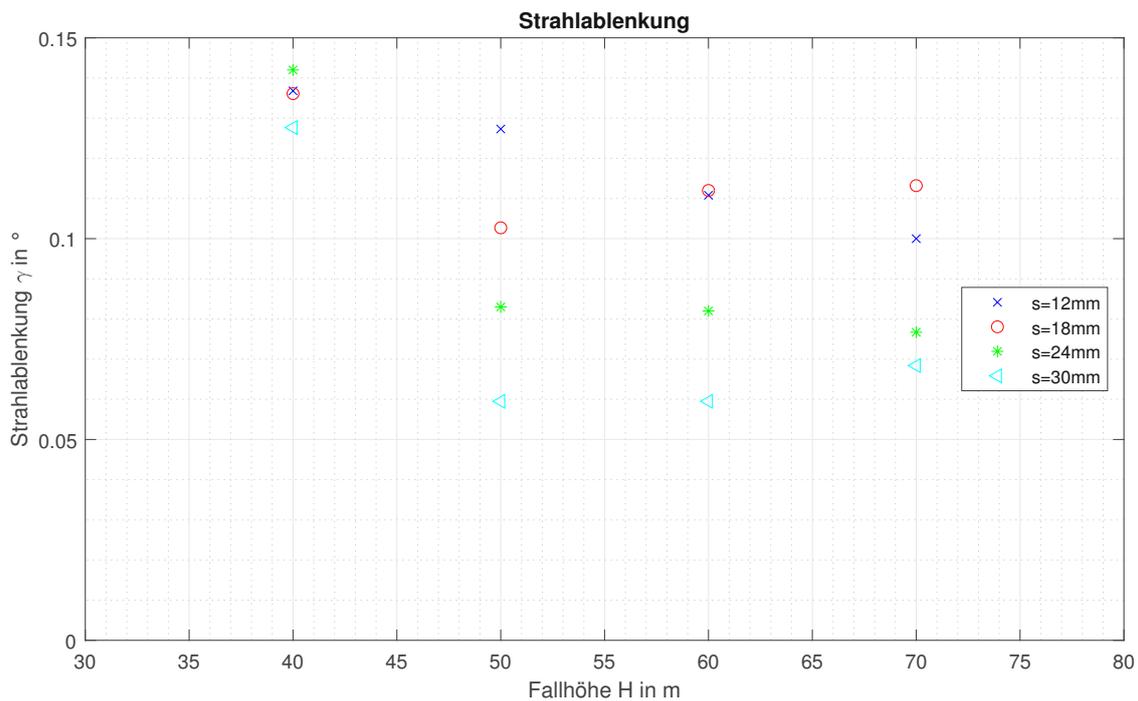


Abbildung 5.14: Strahlablenkung des Freistrahls

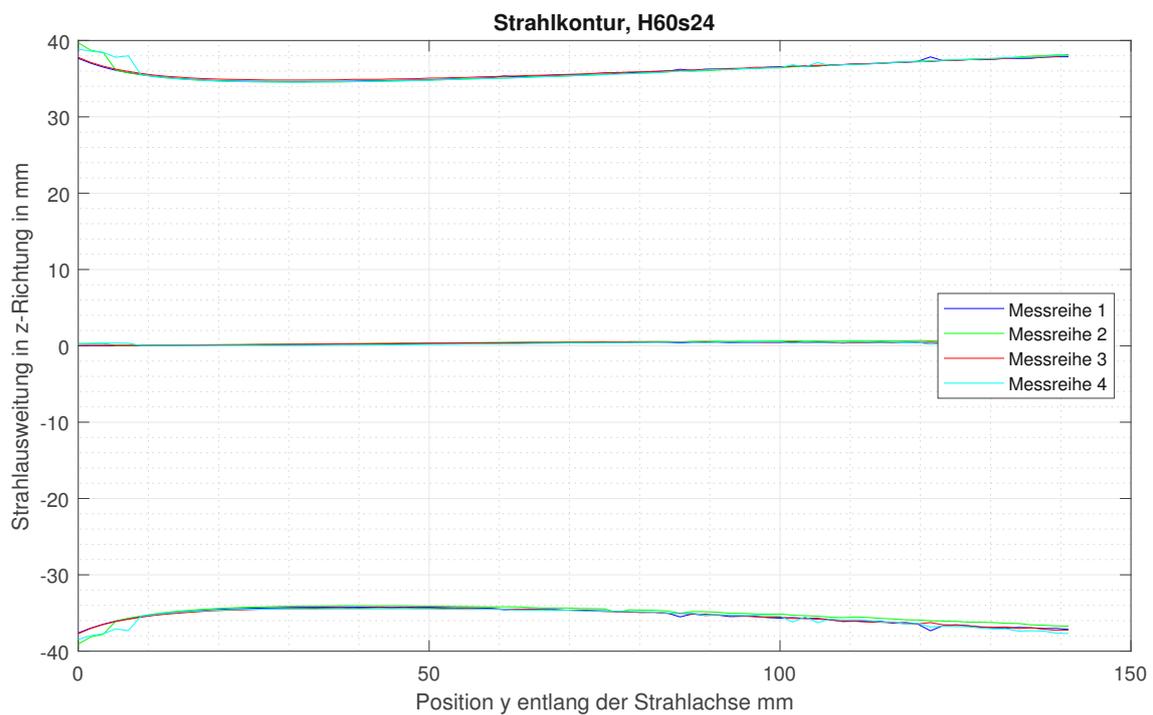
der Druck zu gering sind, sodass sich keine Selbstzentrierung der Düsenadel durch das Wasser ergibt. Sonst ist keine wesentliche Abhängigkeit der Strahlablenkung von der Fallhöhe erkennbar.

Die Ergebnisse für die Strahlablenkung liegen für alle Betriebspunkte im Bereich von  $0.06^\circ$  bis  $0.14^\circ$ . In absoluten Zahlen entspricht das auf einer betrachteten Länge von 140 mm einer Ablenkung der Freistrahls von 0.2 mm nach oben. Da es sich dabei um eine sehr geringe absolute Abweichung handelt, kann davon ausgegangen werden, dass sich diese innerhalb der Messunsicherheit befindet.

### 5.2.5 Reproduzierbarkeit

Ein Maß für die Qualität von Messungen ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Hierfür werden bei gleichen Versuchsbedingungen mehrere Messungen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend verglichen.

In Abbildung 5.15 sind die Messergebnisse der Strahlkontur für vier verschiedene Messungen beim Betriebspunkt  $H = 60$  m und  $s = 24$  mm dargestellt.



**Abbildung 5.15:** Reproduzierbarkeit bei einer Fallhöhe von 70m und einer Düsenstellung von 24mm

Hier ist zu erkennen, dass sich die Konturen durchwegs überdecken, was für eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Messungen spricht. Lediglich im Bereich der ersten 10 mm nach dem Düsenaustritt kommt es bei der Messreihe 2 (grüne Linie) und der Messreihe 4 (hellblaue Linie) zu Abweichungen der Strahlkontur. Diese kamen aufgrund von nicht optimal gewählter Blendeneinstellung an der Kamera zustande. Dies führt zu fehlerhafter Kantendetektierung aufgrund schlechter Kontrastverhältnisse.

## 5.3 Zusammenfassung

Die optische Strahlanalyse hat zusammenfassend folgende Ergebnisse geliefert:

- Die maximale Einschnürung des Freistrahles findet bei steigender Düsenöffnung immer näher am Düsenaustritt statt.
- Die Strahlaufweitung die beim Peltondüsenprüfstand gemessen wurde, liegt mit Werten von  $0.67^\circ$  bis  $1.15^\circ$  in einem üblichen Bereich für gerade Zuleitungen, wie man sie auch in der Literatur vorfindet.
- Es konnte eine leichte Strahlablenkung in positiver vertikaler Richtung festgestellt werden. Diese liegt allerdings aufgrund der sehr kleinen absoluten Werte innerhalb der Messunsicherheit.
- Die optische Strahlanalyse hat gezeigt, dass die Messungen sehr sensibel auf Kamera- und Lichteinstellungen sind, wodurch es bei schlechter Wahl der Einstellungen vermehrt zu Fehldetektionen der Strahlkontur kommen kann.

# Kapitel 6

## Resümee und Ausblick

### LDA-Messungen in der Rohrleitung

Mithilfe der LDA-Messungen konnte das Geschwindigkeitsprofil in der Rohrleitung gemessen und sowohl das Messsystem, als auch das im Zuge dieser Diplomarbeit konstruierte Messfenster, erprobt werden. Das Messfenster ansich hat sich als geeignet gezeigt für die Verwendung bei LDA-Messungen. Eine Verbesserungsmöglichkeit für zukünftige Messungen wäre es, die Innenseite des LDA-Adapterstücks mit einer nichtreflektierenden Farbe zu bestreichen um bei den nahegelegenen Messpositionen Reflexionen der Laserstrahlen zu verhindern. Eine weitere Möglichkeit wäre auch, das gesamte LDA-Adapterstück aus Kunststoff statt aus Aluminium zu fertigen.

Bei den beiden Messfenstergeometrien haben sich beide Geometrien als durchaus geeignet gezeigt, wobei die Datenrate bei der Geometrie 2 etwas höher lag, was auf die geringere Dicke des Messfenster zurückzuführen ist. Hier wäre in weiterer Folge auch ein Vergleich mit Messfenstern aus Glas, zum Beispiel Borosilikatglas oder optischen Quarzglas, möglich. Aufgrund des homogeneren Gefüges könnten diese noch bessere Messergebnisse beziehungsweise eine höhere Datenrate erzielen.

Das System der Seedingeinbringung könnte man durch Verwendung einer kontinuierlich fördernden Pumpe, anstatt der bisher verwendeten Prüfpumpe, verbessern. Dadurch wäre eine gleichmäßige Einbringung des Seeding-Wasser-Gemisches in das System möglich. Des Weiteren könnte ein größerer Behälter zur Mischung des Seeding-Wasser-Gemisches angedacht werden. Unter der Voraussetzung, dass dieser Tank genug Fassungsvermögen für eine gesamte Messreihe bietet, würde dies für gleichmäßige Seeding Verhältnisse bei allen Messpositionen sorgen. Werden die

Seedings kontinuierlich eingedüst, ohne der Notwendigkeit des Mischens und des Nachfüllens der Seedings, könnte auch die Messzeit reduziert werden, was ebenfalls zu einer höheren Datenrate führt.

### **Optische Strahlanalyse**

Die optische Strahlanalyse hat sich äußerst sensibel auf Kamera- und Lichteinstellungen gezeigt. Um hier die Einstellungen von Blende, Zoom und Beleuchtung erleichtern zu können, wäre es anzudenken für zukünftige Messungen eine Kamera sowie ein Objektiv anzuschaffen, welche sind über den PC aus der Ferne ansteuern lassen. Dies wäre einerseits eine Erleichterung, da momentan der Prüfstand und der Mess-PC im Labor örtlich voneinander getrennt sind. Andererseits könnte dadurch eine Feineinstellung und Speicherung der Einstellungen ermöglicht werden was zu einer höheren Qualität der Messergebnisse führt.

Das vorhandene Messprogramm könnte zum Beispiel in Hinblick auf die Ausgabe der Messergebnisse optimiert werden. Hier hat sich gezeigt, dass insbesondere beim Speichervorgang und beim Postprocessing Verbesserungspotential besteht. Als Alternative zum bestehenden LabView-Programm könnte auch angedacht werden ein neues Auswerteprogramm in Matlab aufzubauen. Auch hier gibt es Programmbausteine mithilfe deren Kantendetektierung möglich wäre.

Zusätzlich zur Strahlanalyse von der Seite könnten in Zukunft auch Messungen von oben durchgeführt werden, wodurch es möglich wäre die seitliche Strahlablenkung und die Strahlovalität zu messen. Um auch das Geschwindigkeitsprofil und Sekundärströmungen zu untersuchen, könnten LDA-Messungen im Freistrahle, ähnlich wie bei *Zhang* [25], durchgeführt werden.

# Literatur

- [1] Bauer, C., *Vorlesungsskriptum Hydraulische Maschinen und Anlagen I & II*, Technische Universität Wien, 2015.
- [2] Bschorer, S. und Költzsch, K., *Technische Strömungslehre : Mit 262 Aufgaben und 31 Beispielen*, 12th ed. 2021.; Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Vieweg: Wiesbaden, 2021.
- [3] Dantec Dynamics - Seeding Materials, Aufgerufen am 19.10.2023.
- [4] DIN 1319-1: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Norm, 1995.
- [5] Durst, F., Melling, A. und Whitelaw, J. H, *Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie*; Wissenschaft und Technik : Taschenausgaben; Braun: Karlsruhe, 1987.
- [6] Eckelmann, H., *Einführung in die Strömungsmesstechnik*; Teubner-Studienbücher : Mechanik; Teubner: Stuttgart, 1997.
- [7] Eichler, H. J. und Eichler, J., *Laser : Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*, 8., aktualisierte u. überarb. Aufl. 2015; Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg: Berlin, Heidelberg, 2015.
- [8] Endress + Hauser - Technische Information - Cerabar PMP71B; Prozessdruck- und Füllstandsmessung in Flüssigkeiten oder Gasen, Aufgerufen am 20.10.2023.
- [9] Endress + Hauser - Technische Information - Proline Promag 50W, 53W; Magnetisch-induktives Durchfluss-Messsystem - Durchflussmengenmessung von Flüssigkeiten in Wasser- oder Abwasserapplikationen, Aufgerufen am 20.10.2023.
- [10] Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Aufgerufen am 23.10.2023.

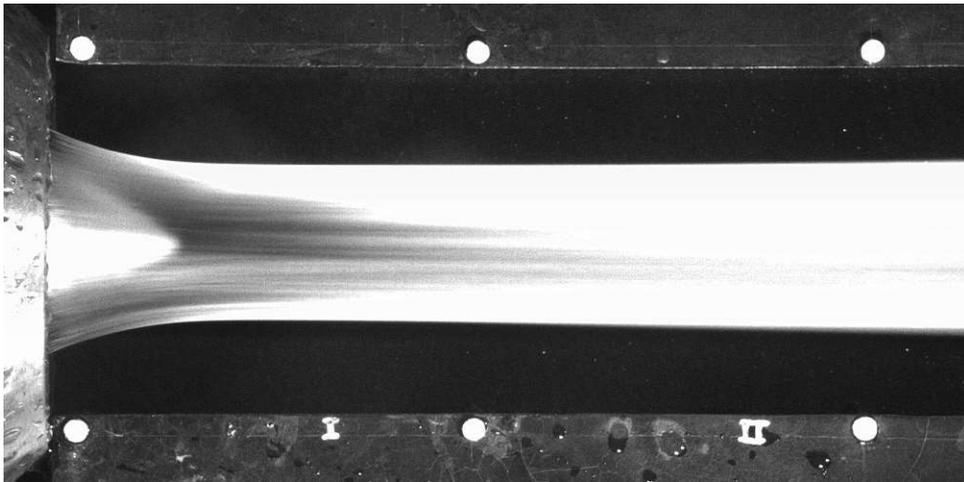
- [11] Flois, C., *Experimentelle Untersuchung der Einfüsse auf LDA-Messungen*, Wien, 2016.
- [12] Giesecke, J., Heimerl, S. und Mosonyi, E., *Wasserkraftanlagen : Planung, Bau und Betrieb*, 6., aktualisierte u. erw. Aufl.; Springer Vieweg: Berlin [u.a.], 2014.
- [13] Gmelch, M. und Reineke, S., *Durchblick in Optik*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019, S. 1–40.
- [14] Käfer, K. und Maly, A., *Unterlagen zur Laborübung Hydraulische Maschinen und Anlagen I*, Technische Universität Wien, 2019.
- [15] Lechner, T., *Optische Vermessung des Strahls von Peltondüsen*, Wien, 2016.
- [16] Mack, R. und List, B. (2022). Multijet horizontal Pelton Turbine Concept - Development and Prototype. *21st International Seminar on Hydropower Plants - Vienna Hydro 2022*.
- [17] Mayinger, F., *Optical measurements : techniques and applications*, 2., corr. ed.; Heat and mass transfer; Springer: Berlin [u.a.], 2001.
- [18] Nitsche, W. und Brunn, A., *Strömungsmesstechnik*, 2., aktualisierte und bearbeitete Auflage.; VDI-Buch; Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2006.
- [19] *Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA)/ Laser Doppler Velocimeter - Operations Manual*, TSI Incorporated, 2012.
- [20] Sigloch, H., *Technische Fluidmechanik*, 11th ed. 2022., Berlin Heidelberg, 2022.
- [21] Staubli, T., Abgottspon, A., Weibel, P., Bissel, C., Parkinson, E. und Leduc, J. (2009). Die Auswirkung der Strahlqualität auf den Wirkungsgrad von Peltonturbinen. *Wasser Energ. Luft 101*, 181–188.
- [22] The Imaging Source - DMK 23GP031 Monochromcamera, Aufgerufen am 20.10.2023.
- [23] Zahoransky, R., *Energietechnik : Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*, 8. Aufl. 2019, Wiesbaden, 2019.
- [24] Zhang, Z. (2004). Optical guidelines and signal quality for LDA applications in circular pipes. *Experiments in Fluids 37*, 29–39.

- [25] Zhang, Z. und Casey, M (2007). Experimental studies of the jet of a Pelton turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 221, 1181–1192.
- [26] Zhang, Z., *Freistrahlturbinen : Hydromechanik und Auslegung*; VDI-Buch; Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, 2009.

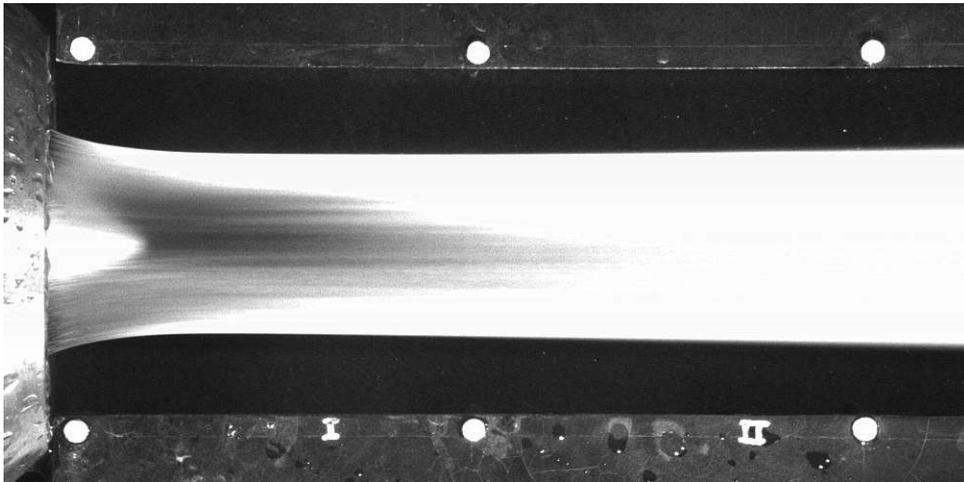
# Anhang A

## Aufnahmen des Freistrahls

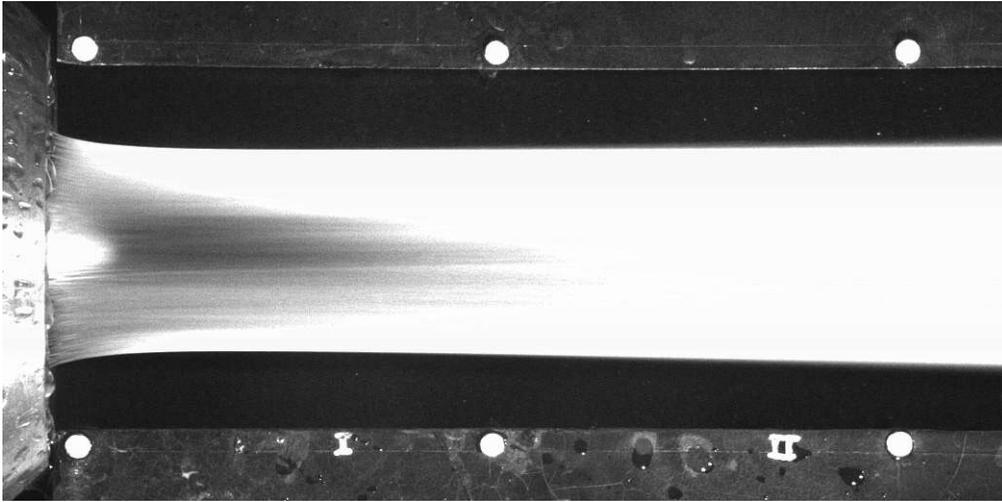
Fallhöhe  $H = 40$  m und Düsenstellung  $s = 12$  mm



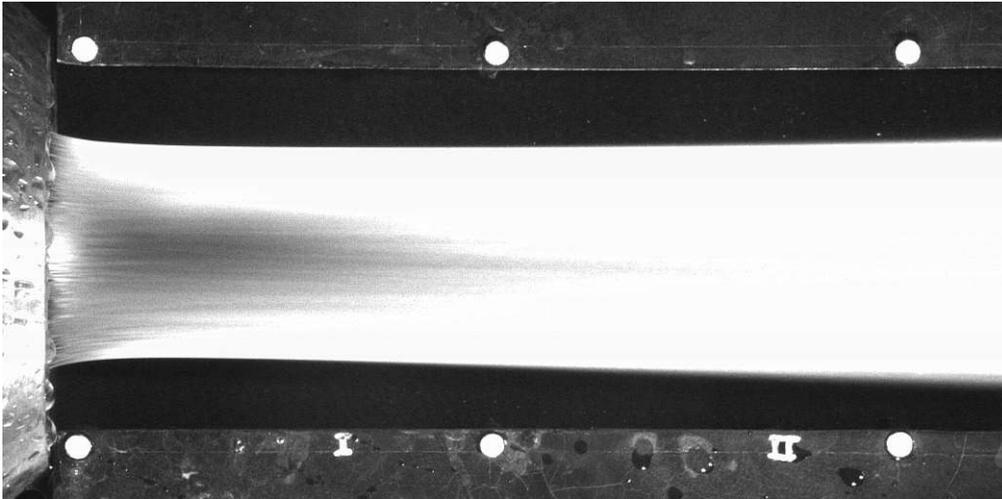
Fallhöhe  $H = 40$  m und Düsenstellung  $s = 18$  mm



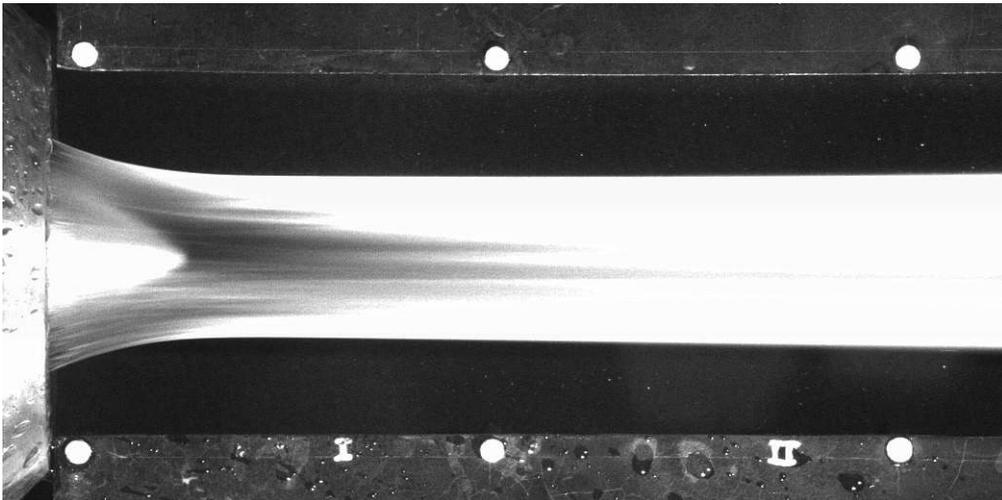
Fallhöhe  $H = 40$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm



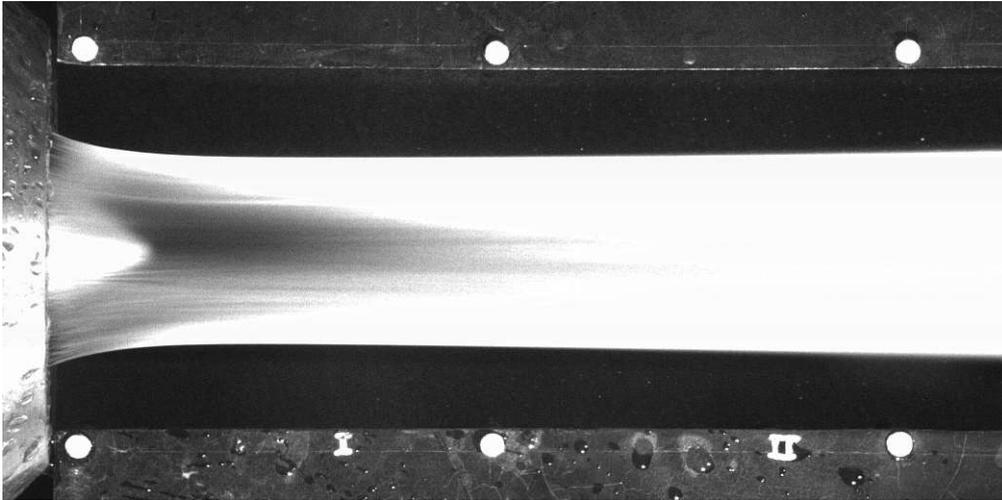
Fallhöhe  $H = 40$  m und Düsenstellung  $s = 30$  mm



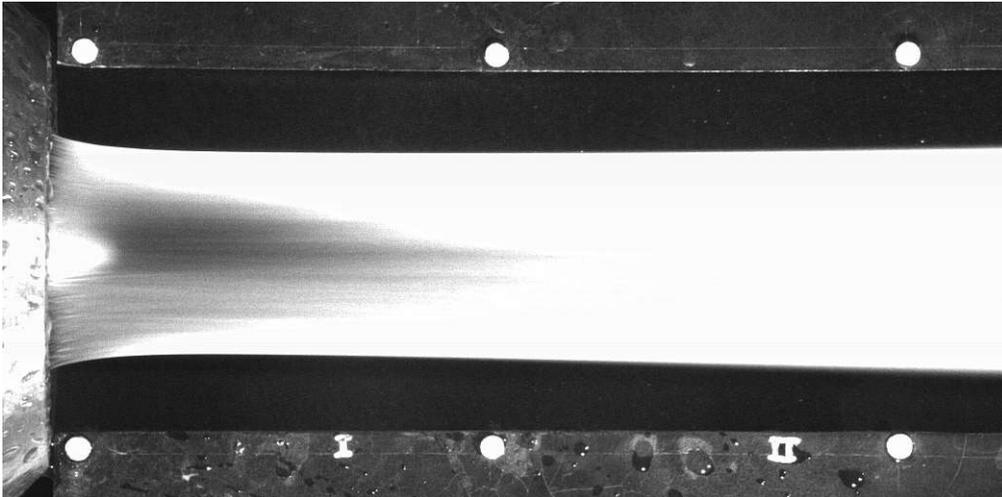
Fallhöhe  $H = 50$  m und Düsenstellung  $s = 12$  mm



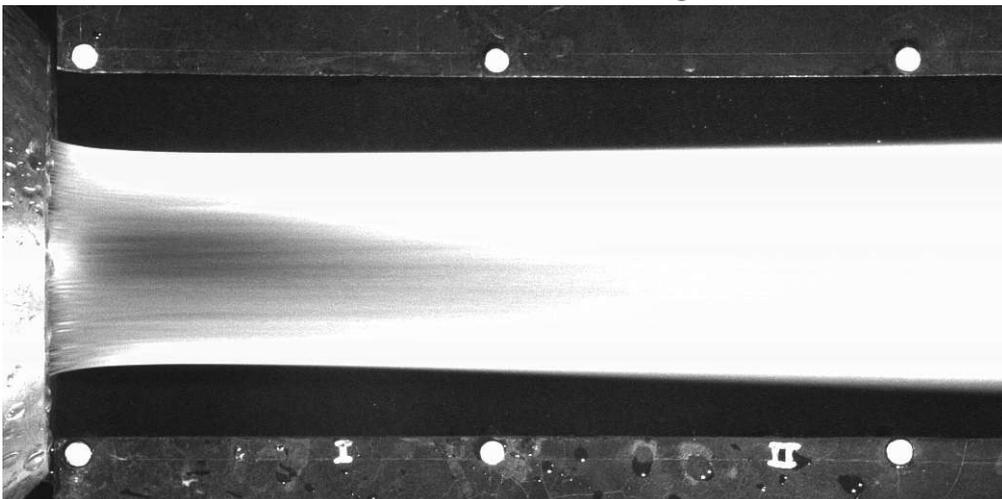
Fallhöhe  $H = 50$  m und Düsenstellung  $s = 18$  mm



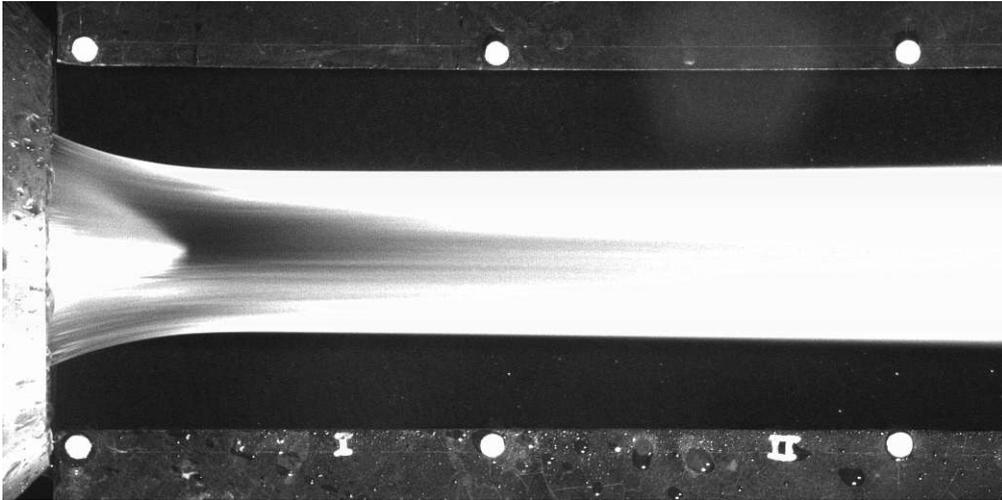
Fallhöhe  $H = 50$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm



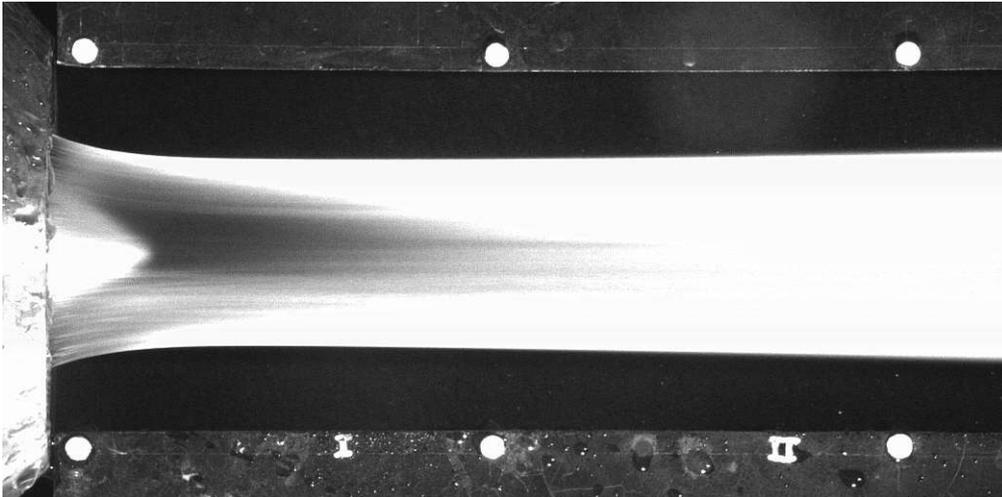
Fallhöhe  $H = 50$  m und Düsenstellung  $s = 30$  mm



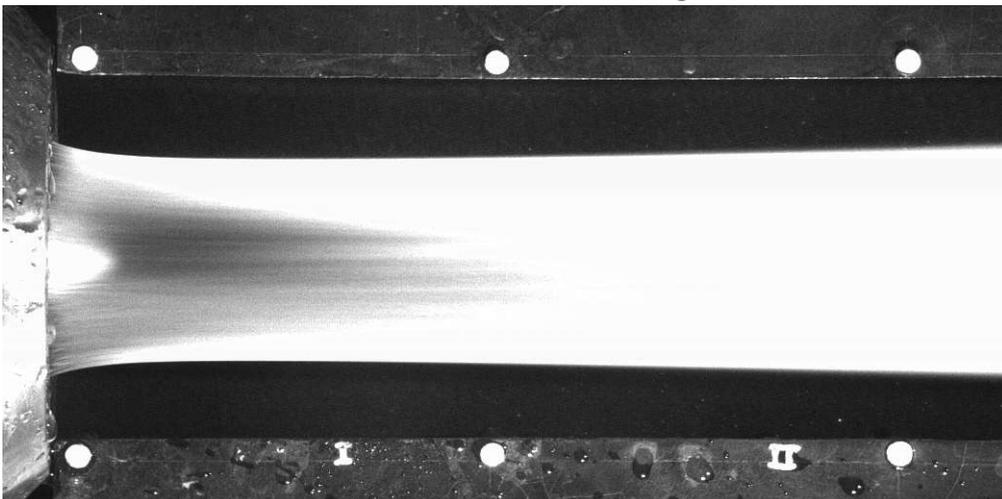
Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 12$  mm



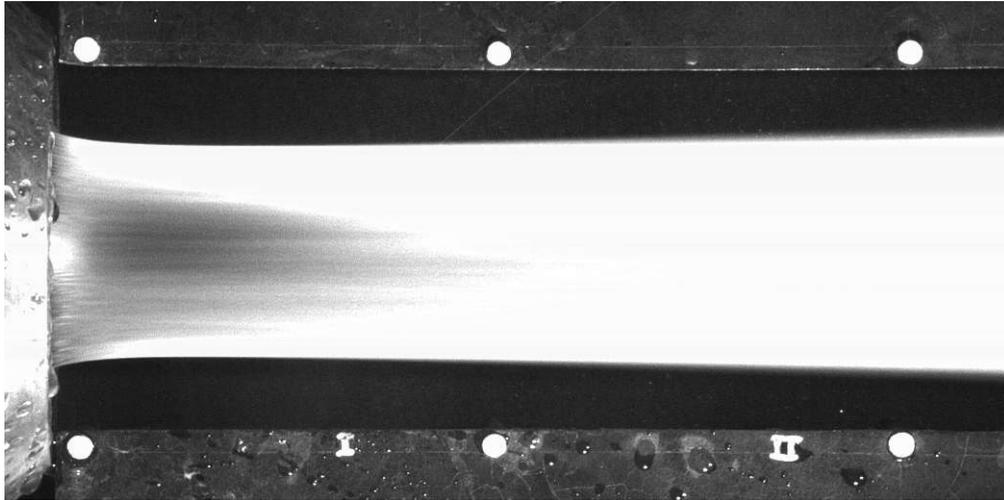
Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 18$  mm



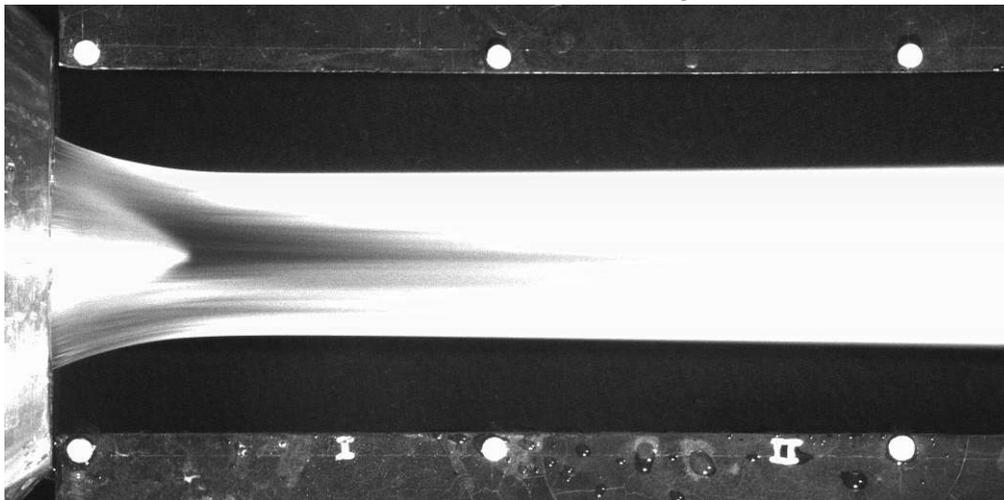
Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm



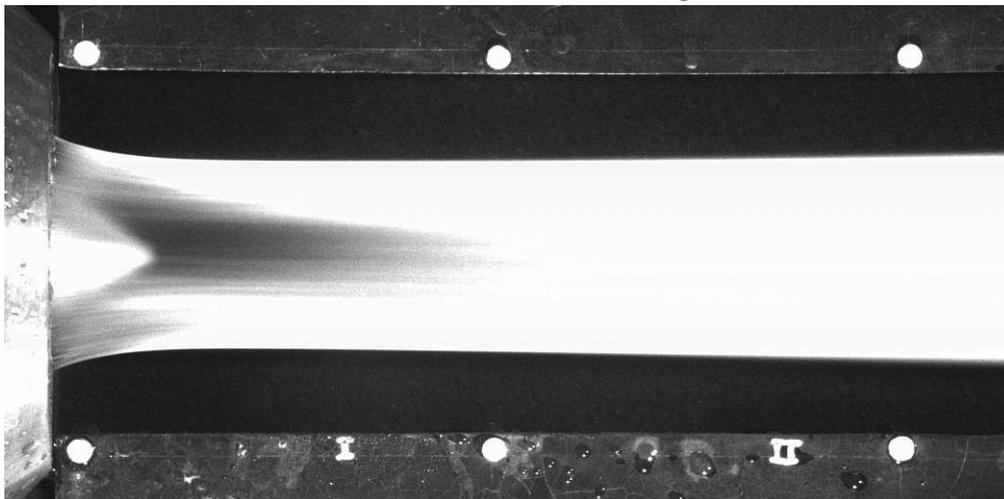
Fallhöhe  $H = 60$  m und Düsenstellung  $s = 30$  mm



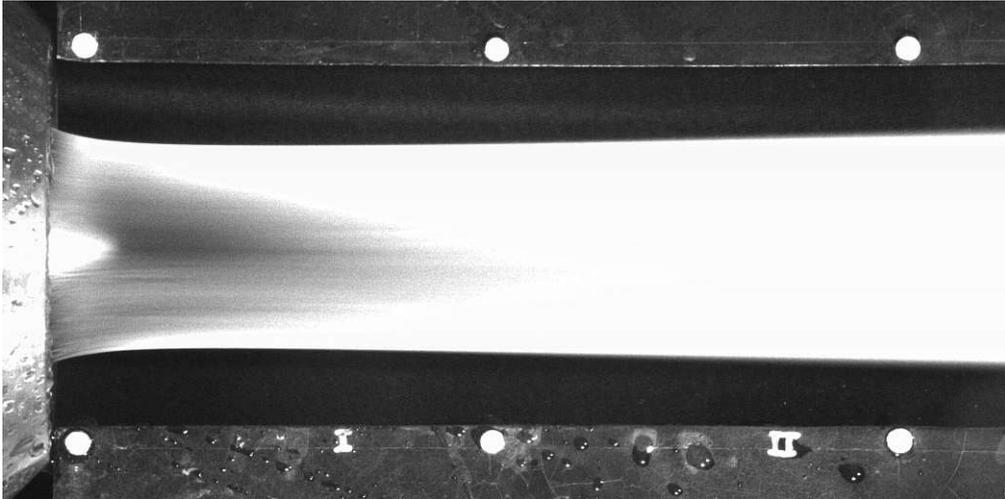
Fallhöhe  $H = 70$  m und Düsenstellung  $s = 12$  mm



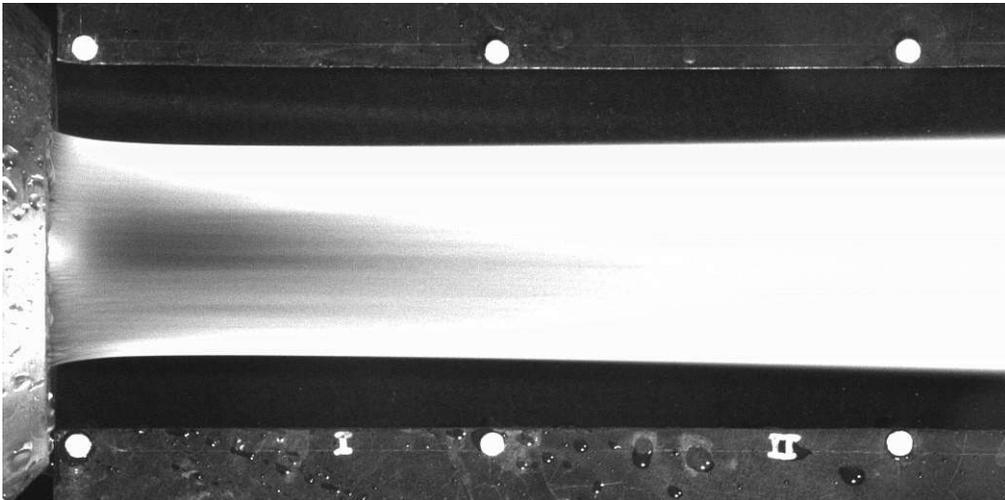
Fallhöhe  $H = 70$  m und Düsenstellung  $s = 18$  mm



Fallhöhe  $H = 70$  m und Düsenstellung  $s = 24$  mm



Fallhöhe  $H = 70$  m und Düsenstellung  $s = 30$  mm



# Anhang B

## Diagramme der Strahlmittelachsen

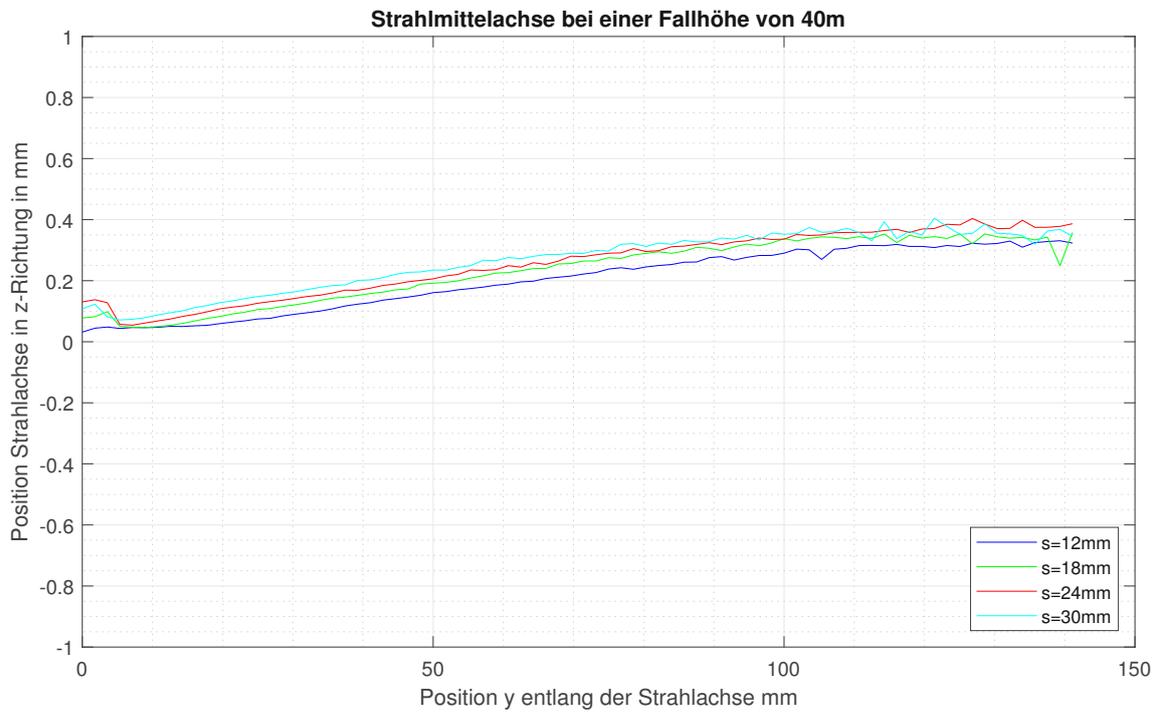


Abbildung B.1: Strahlmittelachsen bei einer Fallhöhe von 40m

## Diagramme der Strahlmittelachsen

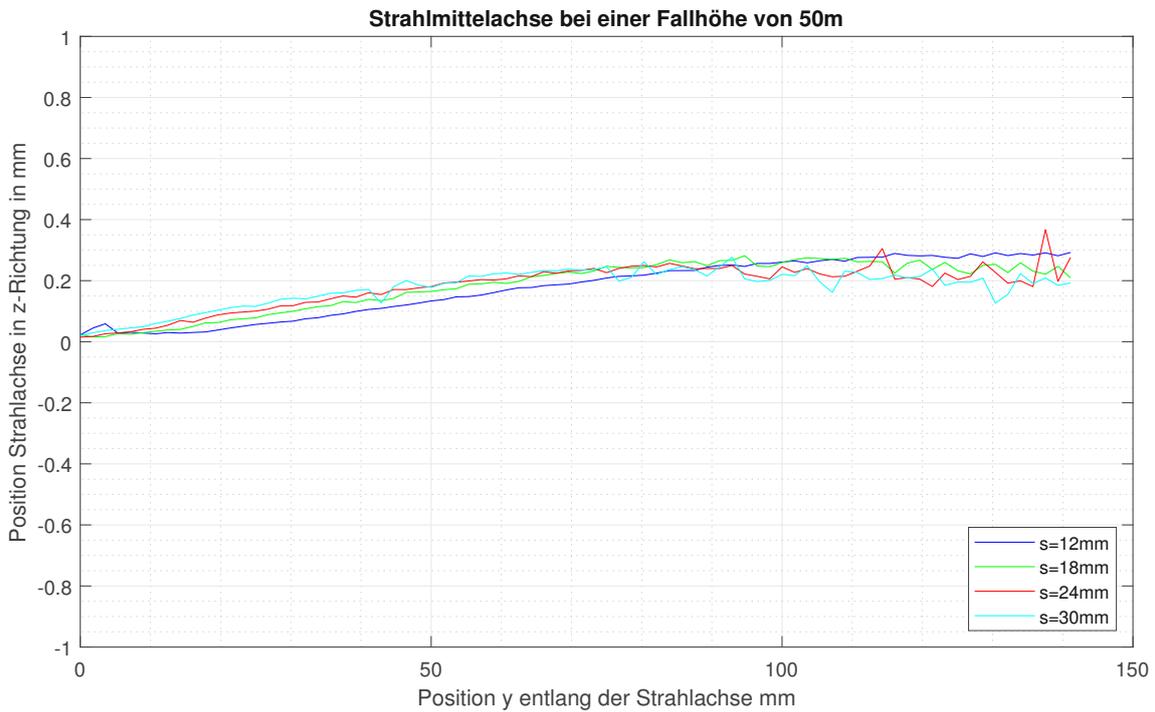


Abbildung B.2: Strahlmittelachsen bei einer Fallhöhe von 50m

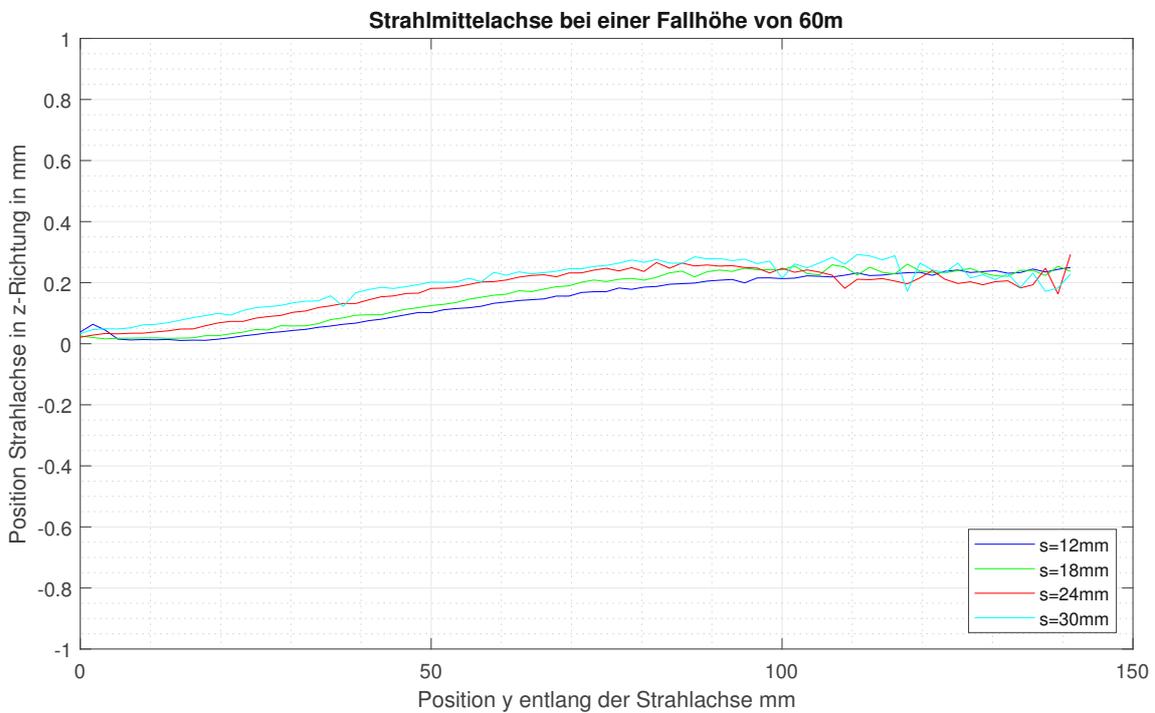


Abbildung B.3: Strahlmittelachsen bei einer Fallhöhe von 60m

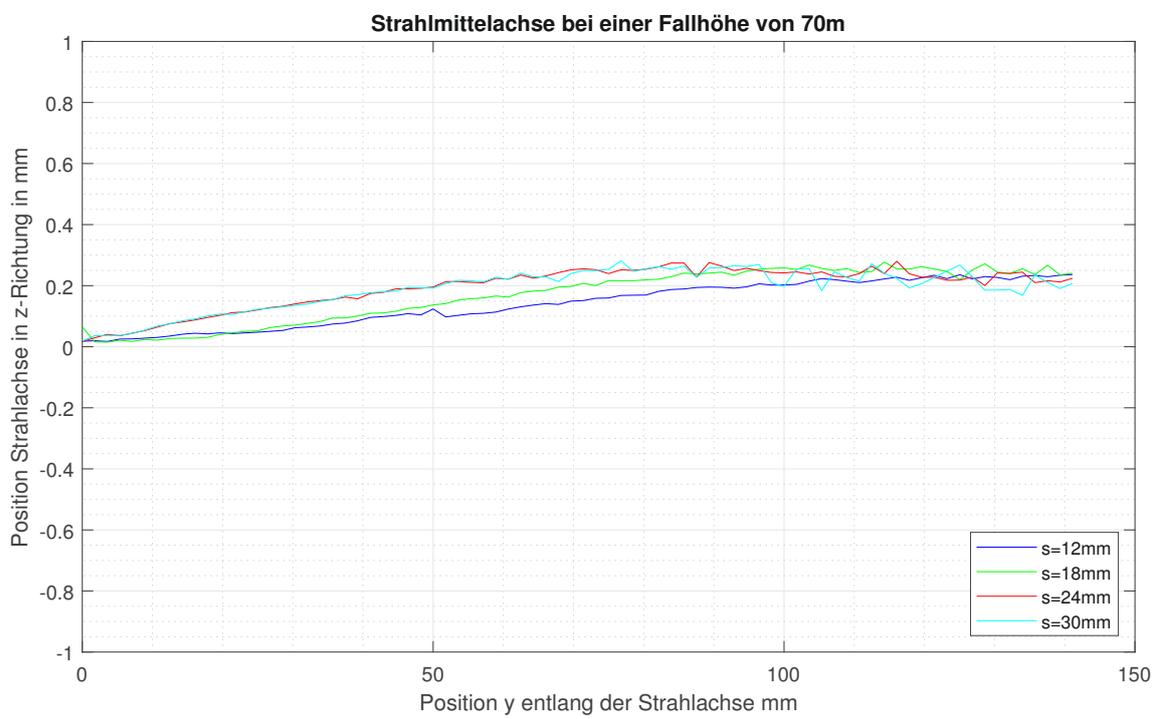


Abbildung B.4: Strahlmittelachsen bei einer Fallhöhe von 70m