

DIPLOMARBEIT

Experimentelle Untersuchung der Einflüsse auf LDA-Messungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Christian BAUER

Projektass. Dipl.-Ing. Anton MALY

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaft

von

Christopher Flois, BSc

Matr.Nr. 1125297

Wienerstraße 38, 3040 Neulengbach

Wien, am 1. November 2016

.....

(Christopher Flois)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Ing. Christian Bauer für die Leitung dieser Arbeit bedanken. Ein besonderer Dank gebührt auch meinen Betreuern Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech Klaus Käfer und Herrn Dipl.-Ing. Anton Maly, die mir tatkräftig bei dieser Arbeit zur Seite standen. Ihre fachliche Unterstützung war eine große Hilfe. Den Herren Josef Herig, Andreas Hofer und Lorenz Werner danke ich für die Anfertigung der Bestandteile und Unterstützung bei dem Aufbau der Versuchsanlage.

Ich möchte die Gelegenheit nutzen, um mich bei meinen Eltern zu bedanken, die mir es ermöglichten, dieses Studium abzuschließen und mich immer unterstützt haben.

Meinen fleißigen Korrekturlesern Pia, Lukas, Julian, Tina und meiner Freundin Nina gebührt großer Dank, da ich ihnen viel Arbeit beschert habe.

Da diese Arbeit das Ende eines für mich sehr wichtigen Lebensabschnittes bedeutet, bedanke ich mich noch bei allen meinen Freuden, Studienkollegen und der besten WG der Welt für die Freundschaft, die Hilfe und die unvergessliche schöne Zeit. Ohne euch hätte ich all das nicht geschafft.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung verschiedener Einflüsse auf die Messergebnisse der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA). Die LDA ist ein berührungsloses optisches Geschwindigkeitsmessverfahren, welches punktuelle Messwerte der Geschwindigkeitskomponenten einer Fluidströmung liefert. Hierfür wird ein Radialpumpen-Prüfstand umgebaut, um an diesem mittels Versuchen die Einflüsse untersuchen zu können. Diese Diplomarbeit setzt sich aus mehreren Abschnitten zusammen.

Es werden die Funktionsweise von LDA-Systemen und die Theorie der verschiedenen Einflüsse auf die Messergebnisse erklärt. Weiters wird der Aufbau des Prüfstandes und die verwendete Messtechnik beschrieben. Besonderes Augenmerk liegt auf der Messfenstergeometrie, der Einblasung und der Art der Seedings sowie den Einstellungen des LDA-Systems. Abschließend werden die Messergebnisse der Versuche, die am Prüfstand durchgeführt wurden, in Diagrammen anschaulich dargestellt und interpretiert.

Das Ziel dieser Arbeit ist, den besten Versuchsaufbau für zukünftige LDA-Messungen im Hydrodynamischen Labor des Instituts für Thermodynamik und Energietechnik (E302) der TU Wien zu finden.

Abstract

This thesis deals with the investigation of various influence parameters on the Laser Doppler velocimetry (LDV), also known as Laser Doppler Anemometry (LDA), through experiments. The LDV is a non-contact velocity measurement method. Measurement with LDA is absolute and requires no pre-calibration. It uses the Doppler-shift of a laser beam caused by a bypassing particle in a transparent fluid flow. For the investigation of these influences it was necessary to convert a testing-rig for centrifugal pumps at the Hydrodynamic Laboratory of the Institut for Energy Systems and Thermodynamics (IET). This thesis is divided into several chapters.

The first chapter contains theoretical basics about LDV, centrifugal pumps and the different influences on the measurement-data followed by a description of the testing-rig and the measurement equipment, focused on the geometry of the transparent measurement windows, the insufflation of the seed particles and the settings of the used LDV-system. Finally the obtained measurement-data is presented in diagrams and interpreted accordingly.

Aim of this thesis is to find the best setup for future measurements with LDV at the Hydrodynamic Laboratory.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	1
1.1	Hintergrund zu optischen Geschwindigkeitsmessverfahren	1
1.2	Laser Doppler Anemometrie	2
1.2.1	Allgemeines	2
1.2.2	Funktionsweise	3
1.2.3	Signalverarbeitung	5
1.2.4	Bragg-Zelle	7
1.2.5	Mehrdimensionale Messung	8
1.2.6	Verwendung von Seedings	9
1.3	Einfluss der Geometrischen Optik auf LDA-Messungen	11
1.4	Weitere Geschwindigkeitsmessverfahren	13
1.4.1	Hitdrahtanemometrie	13
1.4.2	Particle-Image-Velocimetry	14
1.5	Kreiselpumpen	16
1.5.1	Geschwindigkeitsdreiecke	17
1.5.2	Funktionsweise	18
1.5.3	Aufbau	20
1.6	Turbulente Strömungen	22
1.6.1	Allgemeines	22
1.6.2	Turbulenzgrad	23
2	Versuchsaufbau und Messtechnik	24
2.1	Radialpumpenprüfstand	24

2.1.1	Umbau des Radialpumpenprüfstandes	24
2.2	Aufbau des Prüfstandes	26
2.2.1	Beschreibung des Wärmetauschers	28
2.3	Messfenstergeometrien	30
2.4	Messtechnik	32
2.4.1	Durchflussmessung und Förderhöhe	32
2.4.2	Temperaturmessung	33
2.4.3	Wirkungsgradmessung	33
2.4.4	Betriebspunkt der Pumpe	35
2.5	Verwendetes LDA-System	36
2.5.1	Einstellungen des LDA-Systems	37
2.6	Travesierung des LDA-System	39
2.7	Verwendete Seedings	40
2.8	Einbringung der Seedings	42
3	Messergebnisse und Interpretation	44
3.1	Untersuchung des Einflusses der Messfenstergeometrie auf Messergebnisse	45
3.1.1	Messergebnisse bei Variation der Messfenstergeometrien	45
3.1.2	Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Messfenstergeometrien	48
3.2	Untersuchung von eingeblasener Luft als Seeding	50
3.2.1	Untersuchung des Einflusses der Luftmenge	50
3.2.2	Untersuchung des Einflusses der Einblasart	54
3.3	Untersuchung des Einflusses der Seedings auf Messergebnisse	58
3.3.1	Messergebnisse bei Variation der Seedings	58
3.3.2	Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Seedings	61
3.4	Untersuchung der möglichen Verwendung von Seedings in großen Kreisläufen	62
3.4.1	Messergebnisse bei Seeding einblasung	63
3.4.2	Interpretation der Messergebnisse bei Seeding einblasung	64

3.5	Berechnung des Turbulenzgrades der Strömung	66
3.6	Untersuchung von weiteren Einflüssen auf die Messergebnisse	67
3.6.1	Variation der LDA-Einstellung	67
3.6.2	Einfluss der Größe der transparenten Messfläche	69
3.6.3	Einfluss der Wellenlänge des Lasers auf Messergebnisse	71
4	Fehlerbetrachtung der LDA-Messungen	72
5	Zusammenfassung und Ausblick	74
A	Anhang	78

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
\vec{c}	Absolutgeschwindigkeit	m/s
c_m	mittlere Durchflussgeschwindigkeit	m/s
F	Kraft	N
f	Frequenz	Hz
g	Schwerebeschleunigung	m/s^2
H	Förderhöhe	m
L	Länge	m
M	Moment	Nm
m	Masse	kg
n	Brechungsindex	-
P	Leistung	W
p	Druck	Pa
Q	Durchfluss	m^3/s
\vec{r}	Radius	m
Re	Reynoldszahl	-
T	Messzeit	s
Tu	Turbulenzgrad	-
\vec{u}	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
u	Seedinggeschwindigkeit	m/s
\vec{w}	Relativgeschwindigkeit	m/s
$Y_{th\infty}$	spezifische Förderarbeit	m^2/s^2

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Brechungswinkel	$^\circ$
η	dynamische Viskosität	$Pa\ s$
η	Wirkungsgrad	-
θ	Brennweitenwinkel	$^\circ$
λ	Wellenlänge	m
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Standardabweichung	-
ω	Winkelgeschwindigkeit	$rad\ s^{-1}$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
CCA	Konstantstrom-Anemometer
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTA	Konstant-Temperatur-Anemometer
LDA	Laser-Doppler-Anemometry
LDV	Laser Doppler velocimetry
PDM	Photodetector Module
PIV	Particle-Image-Velocimetry
PMT	photomultiplier tube
ppm	parts per million
PSP	Polyamide Seeding Particles
Pt	Platintemperatursensor

Kapitel 1

Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus erklärt und wird auf ihre Wechselwirkungen eingegangen.

1.1 Hintergrund zu optischen Geschwindigkeitsmessverfahren

Optische Geschwindigkeitsmessverfahren sind berührungslose und damit störungsfreie Strömungsmessverfahren. Diese werden bevorzugt verwendet, wenn die Strömung sehr empfindlich auf Messsonden reagiert und folglich das Messergebnis bei Verwendung einer Sonde nicht mehr dem einer ungestörten Strömung entsprechen würde. Ein weiteres Einsatzgebiet ist das Messen von Strömungen in rotierenden Komponenten wie Pumpen und Turbinen, wo die Verwendung von Messsonden sehr kompliziert ist. Darüber hinaus sind optische Geschwindigkeitsmessverfahren prädestiniert für Messungen von turbulenten Strömungen, da hier die physikalischen Einsatzgrenzen von Sondenverfahren schnell erreicht bzw. überschritten werden. [13]

1.2 Laser Doppler Anemometrie

1.2.1 Allgemeines

Die Laser Doppler Anemometrie (LDA) ist ein optisches Geschwindigkeitsmessverfahren und beruht auf einer Messung der Lichtstreuung an in einer Strömung mitschwimmenden Partikeln. Als Lichtquelle werden üblicherweise kontinuierlich arbeitende Gas- oder Halbleiterlaser eingesetzt, die kohärentes und monochromatisches Licht hoher Bündelung und Intensität aussenden. Die Laserstrahlen erfahren durch Streuung an bewegten Partikeln eine Frequenzverschiebung, die dem Effekt des akustischen Doppler-Effekt gleicht und diese hängt von der Geschwindigkeit der Partikel ab. Aus diesem Signal kann jene Frequenz herausgefiltert werden, welche die gesuchte Geschwindigkeitsinformation enthält. Um die Auflösung dieser Frequenz zu vereinfachen, wird der Laserstrahl in zwei Partialstrahlen aufgeteilt. Diese werden zu einem Schnittvolumen, welches das Messvolumen ist, überlagert. Der Detektor erfasst gleichzeitig die beiden Doppler-verschobenen Lichtwellen, die durch die unterschiedlichen Richtungsvektoren der Rückstrahlung entstehen. Durch die Überlagerung der beiden Lichtwellen entsteht eine niederfrequente modulierte Signalwelle. Diese Doppler-Frequenz liegt in einem einfacher aufzulösenden Frequenzbereich. Da kontinuierlich Partikel durch das Messvolumen strömen, kann die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit gemessen werden. Dies wird bei turbulenten Strömungen getan oder die Ergebnisse werden statistisch erfasst und Mittelwerte gebildet. Dies ist z.B. bei Messungen in einer stationären Strömungen nötig.

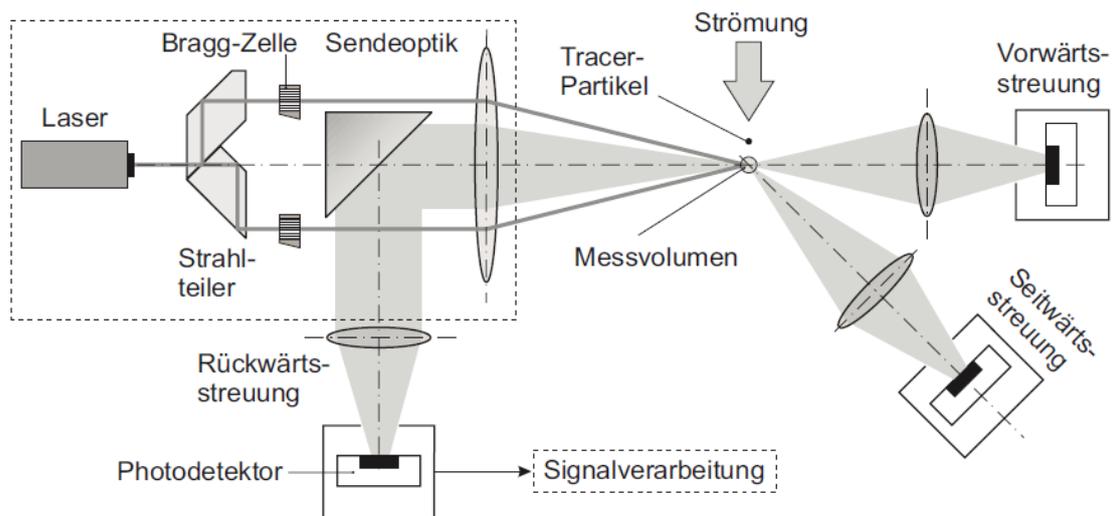


Abbildung 1.1: Prinzipieller Aufbau eines Laser Doppler Anemometers [13]

Die am weitesten verbreitete Methode in der Laser-Doppler-Anemometrie ist das in Abbildung 1.1 dargestellte Zweistrahl- oder Differenzialverfahren. Bei dieser wird das vom Laser erzeugte Lichtbündel in der Sendeoptik von einem Strahlteiler in zwei Strahlen aufgeteilt und danach von einer Linse auf einen Brennpunkt, den eigentlichen Messpunkt, fokussiert. Das Streulicht, das beim Durchgang der Partikel durch den Messpunkt emittiert wird, wird über eine Empfangsoptik an den Photodetektor gesendet. Photodetektoren können verschiedene Funktionsweisen haben. Eines der gängigsten Prinzipien beruht auf der Verwendung eines Photomultipliers. Der Photodetektor gibt das gemessene Signal an die Signalverarbeitung weiter. Diese bestimmt die Doppler-Frequenz und somit die Strömungsgeschwindigkeit. [13]

1.2.2 Funktionsweise

Die folgende Erklärung der Funktionsweise bezieht sich auf eine eindimensionale Messung der Geschwindigkeit. Auf die Funktionsweise einer zwei- bzw. dreidimensionalen Messung wird in Abschnitt 1.2.5 eingegangen.

Die genaue Funktionsweise kann gut mit Hilfe des Interferenzstreifenmodells in Abbildung 1.2 erklärt werden. Diese vereinfachte Darstellung zeigt die sich kreuzenden ebenen Wel-

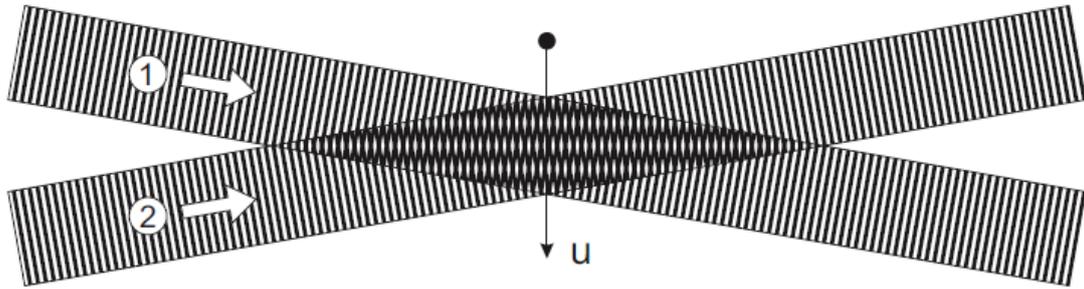


Abbildung 1.2: Interferenzstreifenmodell zweier sich kreuzenden Laserstrahlen[13]

lenfronten zweier Laserstrahlen mit gleicher Frequenz. Der Abstand der Wellenfronten entspricht der Wellenlänge des Laserlichtes. Im Schnittpunkt dieser beiden Laserstrahlen bildet sich durch Überlagerung der Wellenfronten ein Interferenzstreifenmuster in Richtung der mittleren Strahlachse. Der Streifenabstand in diesem Muster hängt von der Wellenlänge des Laserlichtes und dem Schnittwinkel der beiden Strahlen ab. Da diese Interferenzstreifen relativ scharf abgegrenzt sind, Bereiche von hoher und niedriger Lichtintensität wechseln sich ab, emittiert ein durch diesen Bereich durchfliegendes Partikel ein Streulicht das umgekehrt proportional zum Streifenabstand und proportional zur Strömungsgeschwindigkeit ist.

Die aus dem Interferenzstreifenmodell resultierenden messphysikalischen Zusammenhänge ergeben sich im Detail aus Abbildung 1.3: Für den Streifenabstand d zweier Laserstrahlen, die mit dem Winkel θ gekreuzt sind und die Wellenlänge λ haben, gilt die Beziehung

$$f_d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}. \quad (1.1)$$

Der Photodetektor detektiert somit bei orthogonalem Durchgang eines Partikels mit der Geschwindigkeit u durch dieses Interferenzstreifenmuster ein Streulicht mit der Frequenz

$$f_d = \frac{u}{d}. \quad (1.2)$$

Die Geschwindigkeitsmessung mit einem LDA reduziert sich mit Gleichung 1.1 und Gleichung 1.2 auf folgenden Zusammenhang

$$u = \frac{f_d \lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})}. \quad (1.3)$$

Folglich wird ausschließlich das als Doppler-Frequenz bezeichnete Signal f_d bestimmt, da die Wellenlänge des Laserlichtes und der Kreuzungswinkel bekannt sind.

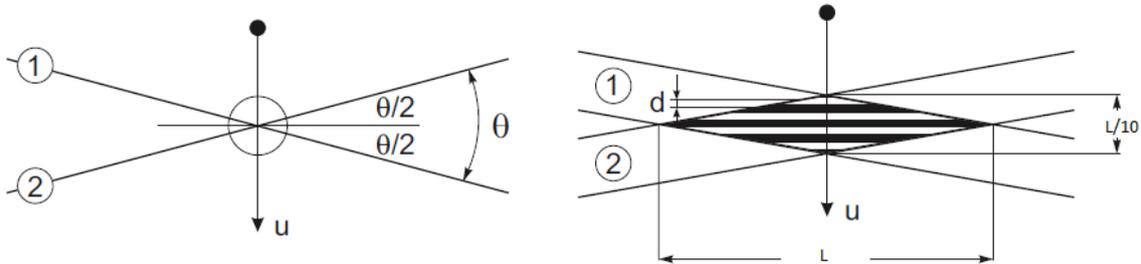


Abbildung 1.3: Geometrie eines Interferenzstreifenmodells: Kreuzungswinkel (links) und Abmessung des Messvolumens, sowie der Streifenstand (rechts)[13]

Im rechten Abschnitt der Abbildung 1.3 ist ein zur vereinfachten Darstellung stark vergrößertes Schnittbild des Messvolumens dargestellt. Das Messvolumen bildet sich als Ellipsoid mit einem Längen- zu Dickenverhältnis von etwa 10:1 aus. [13]

1.2.3 Signalverarbeitung

Die Ermittlung der Doppler-Frequenz und folglich der Geschwindigkeit kann auf verschiedene Arten erfolgen. In Abbildung 1.4 ist das Auswerteschema eines typischen LDA-Signals, eines sogenannten burst, mit einem LDA-Counter dargestellt. Dieser wandelt die vom Photodetektor gelieferten Streulichtsignale in Geschwindigkeitssignale um.

Die Aufbereitung des Signals und der Messablauf beginnt mit der Übergabe des ursprünglichen Signals vom Photodetektor an die Auswertungs elektronik (a). Dieses Signal gibt die typischen Intensitätsschwankungen des emittierten Streulichtes wieder, die entstehen, wenn ein Partikel durch das Interferenzstreifenmuster strömt. Dieses Signal wird einer Gleichspannungs-Filterung unterzogen (b) und dann mit Hilfe eines Triggers in eine Folge von Rechtecksignalen umgewandelt (c). Die Doppler-Frequenz kann aus dem getriggerten Signal aus der Anzahl n der Rechteckimpulse innerhalb der Messzeit T über Gleichung 1.4 bestimmt werden. Aus der Doppler-Frequenz folgt nun mit Gleichung 1.3 die Geschwindig-

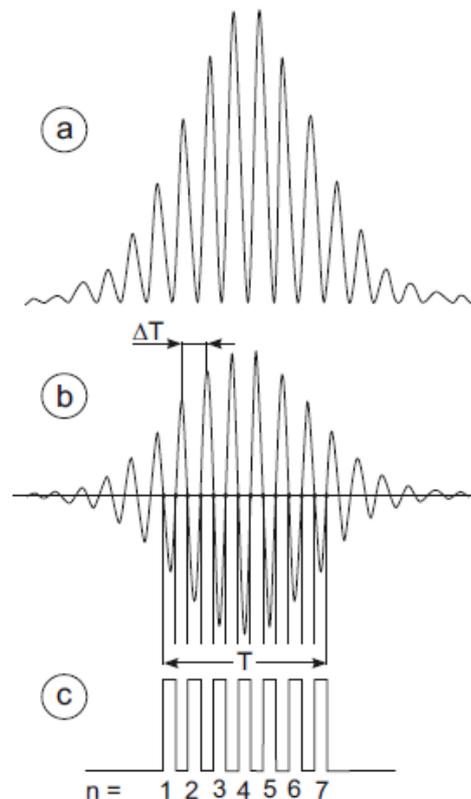


Abbildung 1.4: Darstellung der Auswertung eines LDA-Signals mithilfe eines Counters. a: Eingangssignal, b: gefiltertes Signal, c: getriggertes Signal [13]

keit.

$$f_d = \frac{1}{\Delta T} = \frac{n}{T} \quad (1.4)$$

Ein anderer Weg zur Bestimmung der Doppler-Frequenz ist die Frequenz-Analyse des LDA-Signals. Dies geschieht mit Hilfe eines schnellen Frequenzanalysators. Diese Signalanalyse erfolgt üblicherweise mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT). Bei einer FFT werden die Signalanteile der Frequenz nach sortiert. Bei dieser Methode treten ausgeprägte Signalanteile im Bereich der Doppler-Frequenz deutlich hervor.

In Abbildung 1.5 wird mittels Frequenzanalyse eine ausgeprägte Doppler-Frequenz mit 229,5 kHz bestimmt. Sind Wellenlänge des verwendeten Laserlichtes und Kreuzungswinkel bekannt, kann mittels Gleichung 1.3 die Geschwindigkeit bestimmt werden. [13]

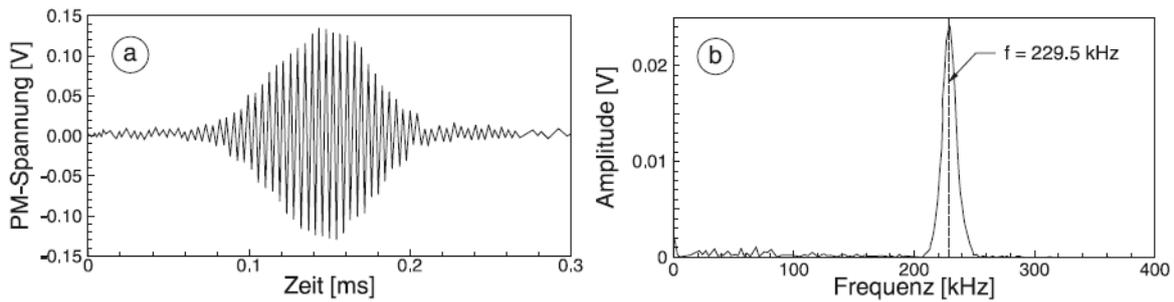


Abbildung 1.5: Darstellung eines LDA-Signals a und der Auswertung des Bursts als Amplitudenspektrum b [13]

1.2.4 Bragg-Zelle

Bei Verwendung der Zweistrahlmethode kann keine Aussage über das Vorzeichen der Geschwindigkeit getroffen werden. Dies führt zu Problemen bei der Messung von turbulenten Strömungen. Daher wird ein akusto-optischer Modulator (Bragg-Zelle) verwendet. Die Frequenz einer der beiden Partialstrahlen wird durch die Bragg-Zelle geringfügig verändert, dadurch entsteht eine kleine Differenzfrequenz Δf_{Bragg} . Dies führt dazu, dass das Interferenzstreifenmuster mit sich mit einer definierter Geschwindigkeit bewegt. Deshalb kommt es zu einer Nullpunktverschiebung der Geschwindigkeitsskala, da die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit nun von einer scheinbaren, durch die laufenden Interferenzstreifen bewirkten Zusatzgeschwindigkeit überlagert ist. In Abbildung 1.6 wird das Messergebnis, mit und ohne Bragg-Zelle einer abgelösten Grenzschichtströmung dargestellt. [13]

Die echte Geschwindigkeit kann dann leicht durch Subtraktion von Δf_{Bragg} , siehe Gleichung 1.5, ermittelt werden

$$u = \lambda \frac{f_d - \Delta f_{Bragg}}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (1.5)$$

Die erforderliche Shift-Frequenz kann, wenn die maximale Rückströmgeschwindigkeit u_{max} bekannt ist, ermittelt werden:

$$\Delta f_{Bragg} > |u_{max}| \frac{2 \sin(\frac{\theta}{2})}{\lambda} \quad (1.6)$$

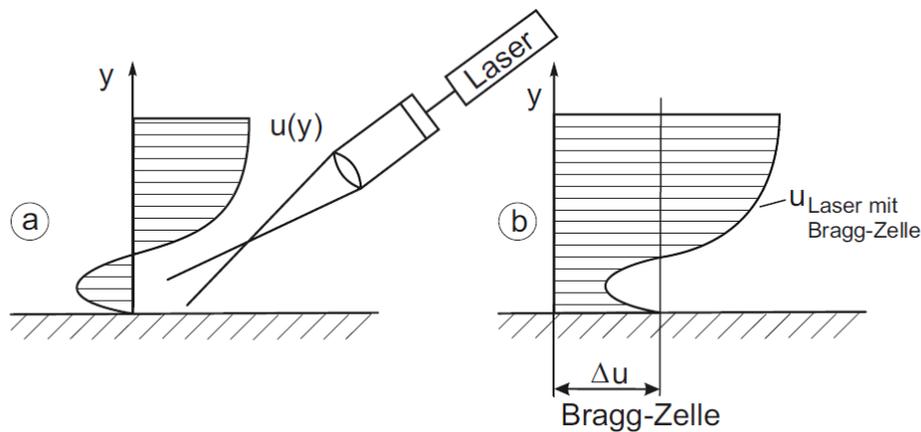


Abbildung 1.6: LDA-Messung in einer abgelösten Grenzschicht. a: Tatsächliches Geschwindigkeitsprofil und b: Messung mit Bragg-Zelle [13]

1.2.5 Mehrdimensionale Messung

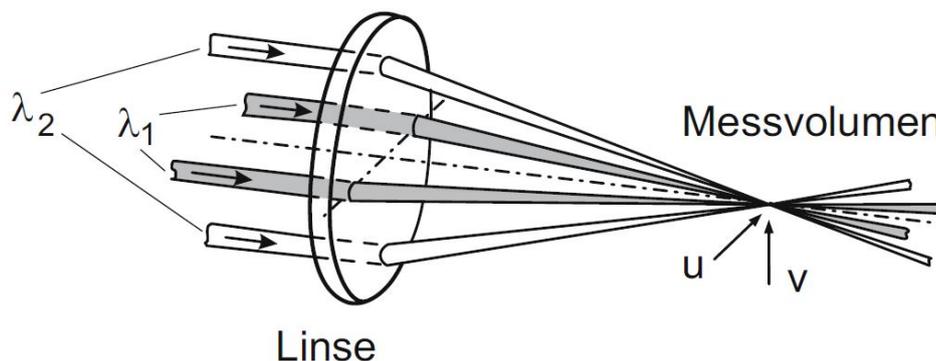


Abbildung 1.7: 2-Farben-LDA zur Messung von zwei Geschwindigkeitskomponenten [13]

Die Ausführung in den vorstehenden Abschnitten zur prinzipiellen Funktionsweise beschränkten sich nur auf eindimensionale Messungen. Generell kann mit einem LDA-System nur die Orthogonalkomponente, im Bezug auf das Messvolumen, der Geschwindigkeit gemessen werden. Für den Fall, dass mehrere Komponenten gemessen werden sollen, kann entweder die gesamte Optik gedreht und dadurch die zwei Komponenten sukzessive gemessen werden oder man verwendet eine zweite LDA-Komponente wie in Abbildung 1.7 dargestellt. Die zusätzliche Komponente benötigt einen Laser mit einer anderen Wellenlänge und folglich einer anderen Farbe. Dies ist nötig, um es der Empfangselektronik zu ermög-

lichen die Messsignale der Komponenten zu unterscheiden. Für den dreidimensionalen Fall werden drei LDA-Komponenten benötigt, die aber nicht in einem Gehäuse untergebracht werden können. Der Nachteil der Verwendung von mehreren LDA-Komponenten ist, dass jede Komponente eine eigene Auswertungs elektronik benötigt und daher der Aufwand sehr stark ansteigt. [13]

1.2.6 Verwendung von Seedings

Wie in den vorigen Abschnitten erwähnt funktioniert ein LDA-System nur, wenn Partikel das Messvolumen durchströmen und so Streulicht erzeugen. Solche Partikel werden auch als Seedings bezeichnet. Wenn innerhalb eines Fluid keine natürlichen Partikel vorhanden sind, die geeignet sind, den Laser zu reflektieren, müssen Seedings eingebracht werden, um Messsignale zu erhalten. An diese Seedings werden mehrere Anforderungen gestellt. Sie sollen

- der Strömung folgen können,
- gute Lichtstreuungseigenschaften besitzen,
- einfach einzubringen sein,
- nicht korrosiv und nicht abrasiv sein,
- chemisch inert und
- nicht verschmutzend sein.

Ob Seedings der Strömung folgen können und so brauchbare Messergebnisse liefern, hängt von mehreren Faktoren ab, wie z.B.

- Partikelform,
- Partikelgröße,
- Dichteunterschied zwischen Partikel und Fluid,

- Konzentration,
- Massenkräften und
- Viskositätskräften.

Die Wahl des richtigen Seedings ist ein Kompromiss zwischen der Stärke des Messsignals und der Fähigkeit, der Strömung zu folgen. Teilchen, die besser der Strömung folgen können, müssen entsprechend klein sein und haben dann aber schlechtere Reflexionseigenschaften, da sich diese im Normalfall mit abnehmender Größe verschlechtern.

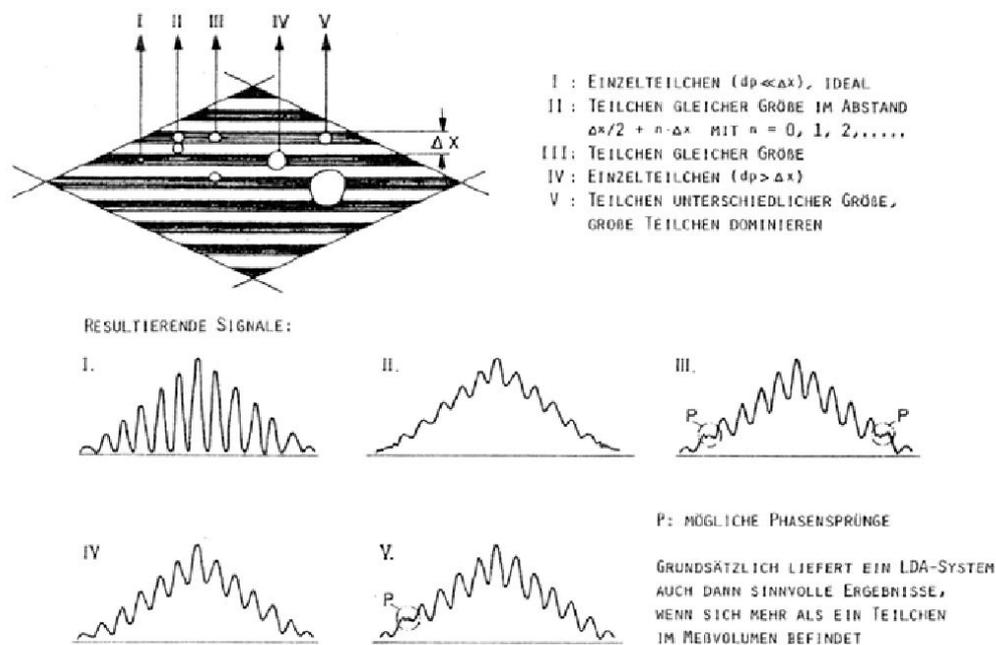


Abbildung 1.8: Einfluss von Seedings auf Messsignal [5]

In Abbildung 1.8 sind mehrere Messsignale in Abhängigkeit von Größe und Anzahl der Seedings dargestellt, die das Messvolumen durchströmen. Es ist festzuhalten, dass in der Realität mehrere Partikel gleichzeitig das Messvolumen durchqueren. Dies hat keinen nachweisbaren negativen Einfluss auf das Messsignal.[6] [5]

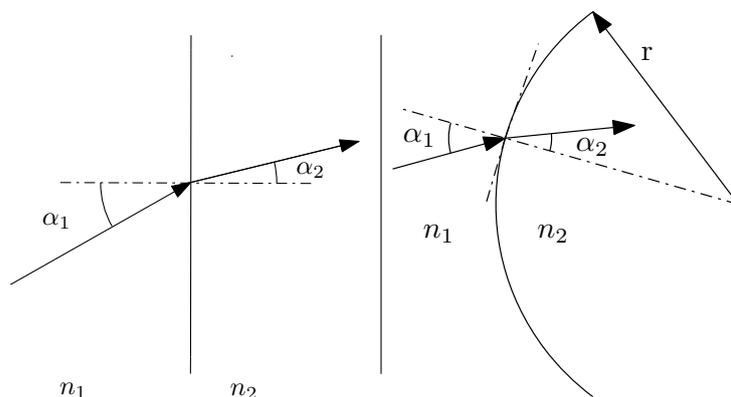
1.3 Einfluss der Geometrischen Optik auf LDA- Messungen

Um die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb eines Rohres zu messen, muss der Bereich, in dem gemessen werden soll, für die Laserstrahlen erreichbar sein. Deshalb ist es nötig, diesen Abschnitt transparent auszuführen. Die Lösung ein transparentes Rohr zu verwenden führt zu folgenden Problemen:

- Das Laserlicht muss mehrere Schichten mit verschiedenen Brechungsindizes passieren und wird daher gebrochen.
- Das Laserlicht einer LDA-Komponente erfährt eine andere Brechung als die zweite durch die Geometrie der transparenten Trennfläche, daher schneiden sich die Laserlichter der zwei LDA-Komponenten nicht an derselben Stelle.

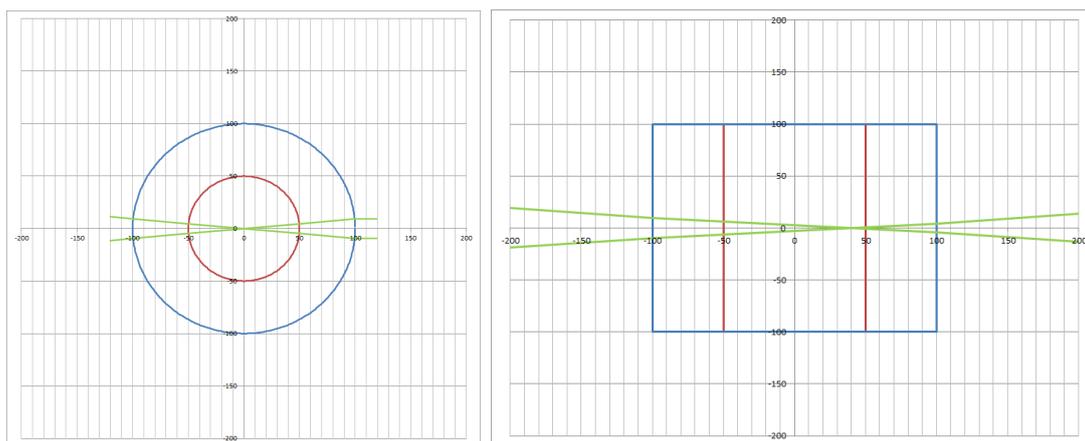
Diese Effekte beruhen auf der geometrischen Optik. Diese besagt, wenn ein Lichtstrahl die Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes durchquert, wird das Licht teilweise reflektiert und teilweise durchgelassen. Das nicht reflektiert Licht, wird laut dem Zusammenhang aus Gleichung 1.7 gebrochen. In Abbildung 1.9 (a) ist die Brechung eines Lichtstrahles nach Gleichung 1.7 dargestellt. Bei n handelt es sich um den Brechungsindex des jeweiligen Stoffes. Dieser Zusammenhang wurde experimentell ermittelt. Bei nichtebenen Grenzflächen werden die Winkel auf der Tangential-Ebene, wie in Abbildung 1.9 (b) dargestellt, aufgetragen. [6]

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 \tag{1.7}$$



(a) Brechung bei gerader Grenzfläche (b) Brechung bei runder Grenzfläche

Abbildung 1.9: Darstellung der Brechung nach den Gesetzen der Geometrischen Optik



(a) Brechung in Y-Richtung

(b) Brechung in X-Richtung

Abbildung 1.10: Einfluss der Geometrie des Messfensters auf die Brechung des Laserlichtes

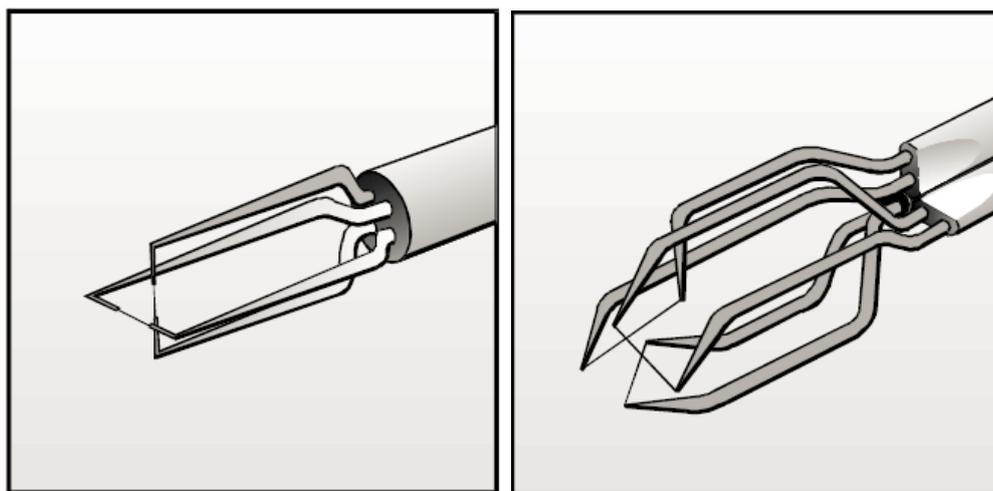
In Abbildung 1.10 wird die Brechung der jeweiligen Laserstrahlen einer LDA-Komponente beim Passieren eines Rohres dargestellt. Das Rohr hat einen Außendurchmesser von 200 mm, einen Innendurchmesser von 100 mm und ist aus Plexiglas gefertigt. Das Laserlicht passiert drei verschiedene Medien mit verschiedenen Brechungsindizes (Luft, Plexiglas, Wasser). In der Y-Richtung wird das Laserlicht noch zusätzlich durch die Krümmung des Rohres gebrochen. Im Zuge dieser Diplomarbeit werden Messfenstergeometrien entworfen, die dazu führen sollen, dass die Messvolumina beider LDA-Komponenten im selben Punkt liegen.

1.4 Weitere Geschwindigkeitsmessverfahren

An dieser Stelle werden andere Standardgeschwindigkeitsmessverfahren vorgestellt.

1.4.1 Hitzdrahtanemometrie

Die Hitzdrahtanemometrie ist ein klassisches Geschwindigkeitsmessverfahren und ermöglicht sowohl die Messung von zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten als auch von Schwankungsgeschwindigkeiten. Letzteres ermöglicht die Turbulenz einer Strömung zu messen. Im Gegensatz zu LDA-Messungen hat das Messsignal der Hitzdrahtanemometrie eine analoge Form.



(a) Zwei Drahtsonde

(b) Drei Drahtsonde

Abbildung 1.11: Darstellung von Hitzdrahtsonden

Das Funktionsprinzip der Hitzdrahtanemometrie besteht darin, einen dünnen Metalldraht mit Hilfe einer elektrischen Brückenschaltung auf eine Temperatur aufzuheizen, die deutlich über der Temperatur der zu messenden Strömung liegt und die dafür erforderliche elektrische Heizspannung als Maß für die Geschwindigkeit zu verwenden. Bei Änderung der Geschwindigkeit ändert sich der Wärmeübergang an die Umgebung, die Temperatur des Drahtes ändert sich und ein neues Gleichgewicht stellt sich ein. Die Annahme für dieses Verfahren ist, dass die elektrische Erwärmung gleich der Konvektion ist. Es ist möglich,

durch Verwendung von bis zu 3 Drähten die Geschwindigkeit in mehreren Dimensionen zu messen. Solche Sonden sind in den Abbildungen 1.11 dargestellt. Es gibt zwei verschiedene Messmethoden:

- Konstant-Temperatur-Anemometer (CTA)
- Konstant-Strom-Anemometer (CCA)

Diese unterscheiden sich in der Art der Messschaltung. Der Nachteil der Hitzdrahtanemometrie ist, dass es sich nicht um ein berührungsloses Messverfahren handelt weil die Sonde die zu messende Strömung verfälscht. [13] [9]

1.4.2 Particle-Image-Velocimetry

Die Particle-Image-Velocimetry (PIV) ist ein modernes optisches bildgebendes Messverfahren. Mit diesem Verfahren kann ein Strömungsfeld zum Messzeitpunkt in einer Ebene vollständig erfasst und analysiert werden.

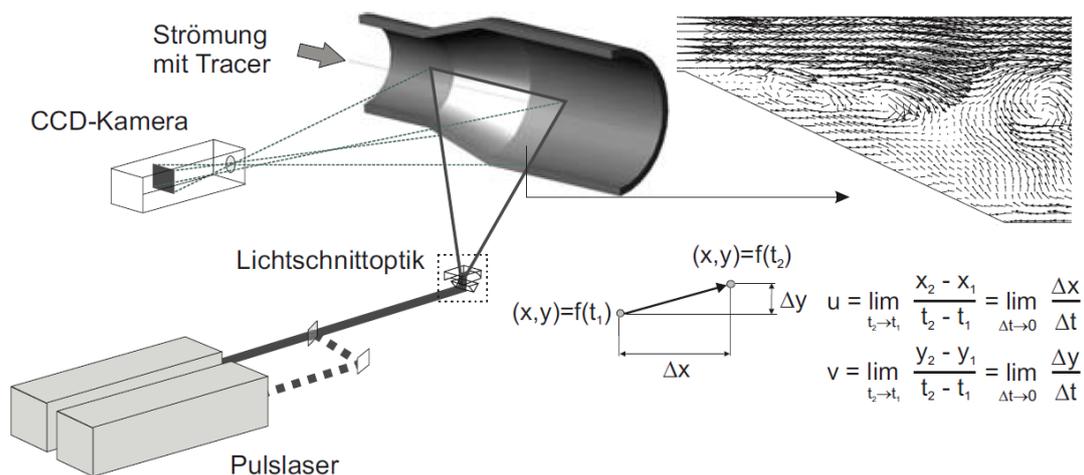


Abbildung 1.12: Komponenten und Grundprinzip der PIV [13]

Wie bei LDA-Messungen benötigt man Seedings in der zu messenden Strömung. Die Seedings werden mit einem Laser sichtbar gemacht, wobei die PIV das Streulicht seitwärts

zur Einstrahlrichtung der Lichtquelle ausnutzt. Wird der Laserstrahl auf eine Ebene aufgeweitet, können die Seedings auf dieser Ebene mit einer Kamera optisch abgebildet werden. Nach einer gewissen Zeit wird die gleiche Ebene noch einmal betrachtet. Beide Abbildungen können dann verglichen werden, um aus der Änderung der Position der Seedings und der Zeit zwischen den Aufnahmen die Geschwindigkeitsvektoren zu berechnen. Die PIV ist keine punktuelle Messung wie die LDA sondern bildet ein Vektorfeld ab. Der Nachteil des PIV-Verfahren ist, dass sich mittels PIV nicht der Tubulenzgrad bestimmen lässt. [13] [9]

1.5 Kreiselpumpen

Kreiselpumpen sind kontinuierlich arbeitende Strömungsmaschinen, die Flüssigkeiten fördern. Sie bringen dazu einen bestimmten Volumenstrom auf ein spezifiziertes Druckniveau. Dies geschieht, indem ein oder mehrere Laufräder die Antriebsenergie auf die Flüssigkeit übertragen und damit den Druck und die Geschwindigkeit der Flüssigkeit erhöhen. Je nach Bauart teilt man diese Strömungsmaschinen in Kategorien, die in Abbildung 1.13 dargestellt sind, ein.[8]

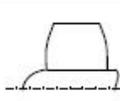
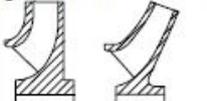
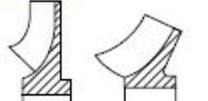
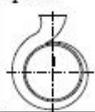
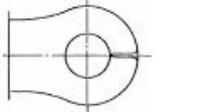
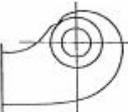
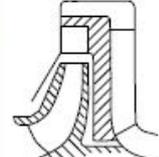
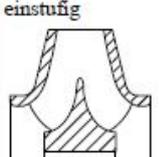
A Laufradform: Kennzeichen: Strömungsrichtung am Laufradaustritt				
B Laufradbauart	geschlossen 	halboffen 	offen 	
C Leitrad: Kennzeichen Strömungsrichtung am Leitradeintritt	radial 		halbaxial 	
D Gehäuseform	Einfachspirale 	Doppelspirale 	konzentrischer Ringraum 	Ringraum + Spirale 
E Einlaufgehäuse	Ringraum-Einlauf 	Symmetrischer Einlauf 	Asymmetrischer Einlauf 	
F Reihenschaltung: mehrstufige Pumpen			mehrstufige halbaxiale Pumpen siehe Abb. 2.13.	
G Parallelschaltung: doppelflutige Pumpen	einstufig 		mehrstufige doppelflutige Pumpen siehe Abb. 2.12.	

Abbildung 1.13: Einteilung von Kreiselpumpen [8]

1.5.1 Geschwindigkeitsdreiecke

Die Funktionsweise einer Kreiselpumpe ist mit Geschwindigkeitsdreiecken gut zu erklären. Deshalb folgt hier eine Einführung zu diesem Thema. In Strömungsmaschinen bezeichnet man Strömungen, die in erdfesten Koordinaten beschrieben werden als absolute Bewegungen und in rotorfesten Koordinaten beschriebene als relativ. Strömungen in relativen Koordinaten entsprechen Beobachtungen, die ein mitrotierender Beobachter machen würde. Zur Beschreibung der Strömungskinematik in Laufrädern benützt man üblicherweise Geschwindigkeitsdreiecke wie in Abbildung 1.14 dargestellt, die auf diesem System beruhen. Die drei

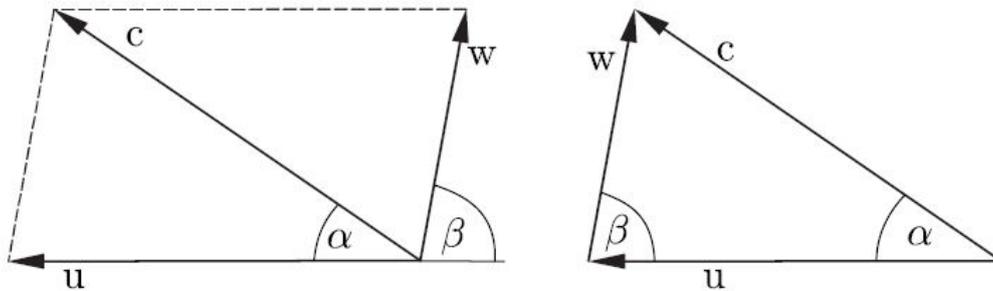


Abbildung 1.14: Darstellung eines Geschwindigkeitsdreiecks [4]

Komponenten der Geschwindigkeit werden durch folgende Vektoren beschrieben:

\vec{u} ... Umfangsgeschwindigkeit, Drehgeschwindigkeit des Laufrades und damit des Fluids
 $(\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r})$

\vec{w} ... Relativgeschwindigkeit, Geschwindigkeit des strömenden Fluid gegenüber dem sich drehenden Relativsystem, also dem drehenden Laufrad

\vec{c} ... Absolutgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit des Fluids bezogen auf das ruhende Inertialsystem, d.h. gegenüber der sich nicht bewegenden Umgebung

Die Absolutgeschwindigkeit \vec{c} ergibt sich durch Vektoraddition von \vec{u} und \vec{w} .

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}. \quad (1.8)$$

Als Beispiel werden die Geschwindigkeiten an einem radialen Laufrad in Abbildung 1.15 dargestellt. [4]

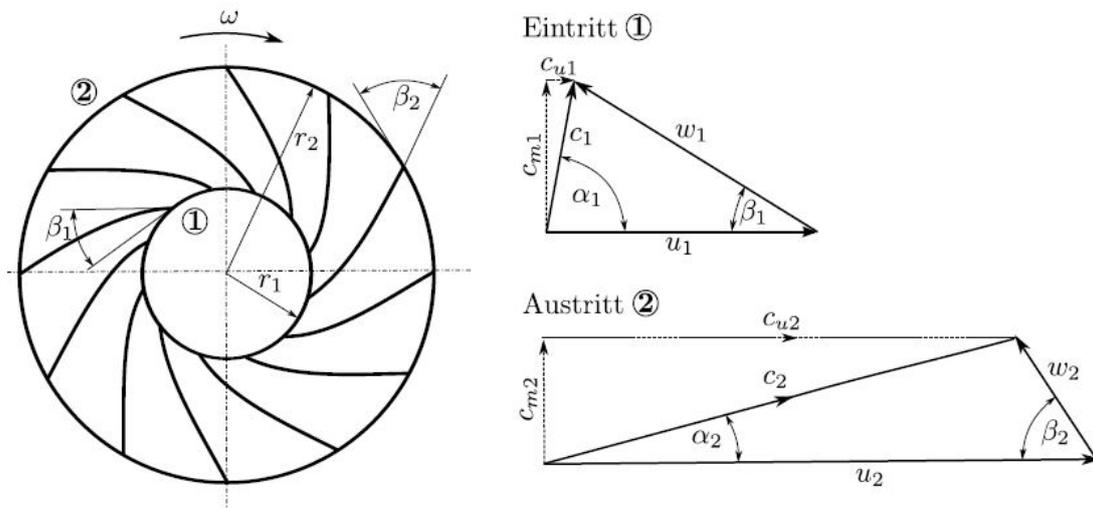


Abbildung 1.15: Geschwindigkeitsdreiecke am Radialenlaufrad Ein- und Austritt [4]

1.5.2 Funktionsweise

Um die Energieübertragung vom Laufrad auf das Fluid zu erfassen, wird die Impulsbilanz verwendet. Der Impulssatz erlaubt bei geeigneter Wahl des Kontrollvolumen eine globale Aussage, ohne dass Einzelheiten der Strömung innerhalb des Kontrollvolumens bekannt sein müssen. Die Absolutgeschwindigkeit wird wie in Abbildung 1.16 a) in Umfangs- und Meridianrichtung aufgeteilt.

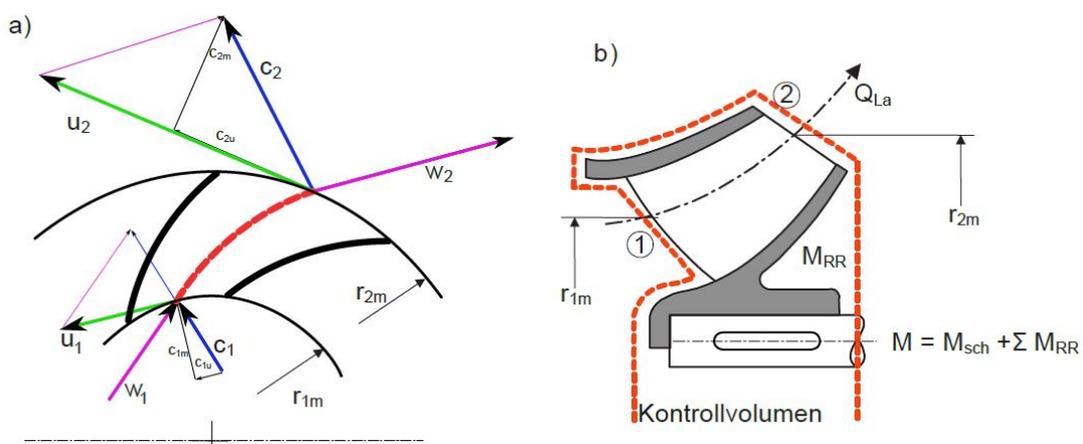


Abbildung 1.16: Impulsbilanz am Laufrad: Geschwindigkeit und Kontrollvolumen [4]

Wird das Kontrollvolumen wie in Abbildung 1.16 b) über das Laufrad gelegt, ergeben sich

folgende Größen am Laufrad:

- Durch die Bilanzfläche 1 tritt der Durchfluss Q mit dem Impulsmoment (Drall) $\rho Q r_1 c_{1u}$ in das Laufrad ein.
- Durch die Bilanzfläche 2 verlässt der Durchfluss Q mit dem Impulsmoment $\rho Q r_2 c_{2u}$ das Laufrad.
- Da das Kontrollvolumen die Welle schneidet, sind äußere Kräfte in Form von Momenten zu berücksichtigen.

Da die statischen Drücke und die radialen Geschwindigkeiten in den Flächen 1 und 2 keine Kräfte in Umfangsrichtung erzeugen, liefern sie keinen Beitrag zum Impulsmoment. Es sind daher nur die Geschwindigkeitskomponenten c_{1u} und c_{2u} zu beachten. Wird der Impulssatz nun aufgestellt, liefert er das auf die Laufschaufeln wirkende Impulsmoment, das der Eulerschen Turbinenhauptgleichung 1.9 entspricht.

$$M = \rho Q (r_{2m} c_{2u} - r_{1m} c_{1u}) \quad (1.9)$$

M ist das Moment, welches von der Welle aufzubringen ist, um die Strömung auf den Zustand laut 1.16 a) zu bringen. Gleichzeitig ist das aufgebrauchte Moment nach dem dritten Newtonschen Axiom das Moment, das auf das Fluid übertragen wird. Multipliziert man M nun mit ω , erhält man die Antriebsleistung P der Pumpe.

$$P = M \omega = \rho Q (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) \quad (1.10)$$

Die spezifische Förderarbeit, die auf den Massenstrom bezogen ist, ergibt sich, wenn man die Leistung durch Durchfluss und Dichte dividiert:

$$Y_{th\infty} = \frac{P}{\rho Q} = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u} \quad (1.11)$$

Aus der Gleichung für die Förderarbeit ist ersichtlich, dass diese am größten ist, wenn der Term $u_1 c_{1u}$ verschwindet. Dies ist der Fall wenn c_{1u} Null ist. Dies tritt ein, wenn die Zuströmung in Umfangsrichtung keine Drallkomponente aufweist. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich für eine Kreiselpumpe die Forderung nach einer drallfreien Zuströmung. Bei der Herleitung dieser Zusammenhänge wurden ideale Strömungen vorausgesetzt. In der Realität kommt es aber zu Verlusten, die zu einer geringeren spezifischen Förderarbeit führen.[4]

1.5.3 Aufbau

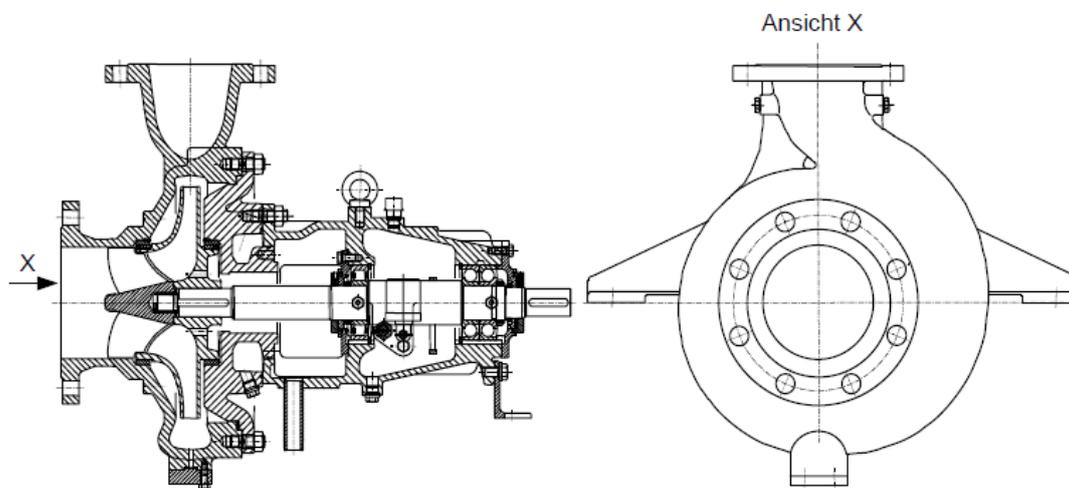


Abbildung 1.17: Schematische Darstellung einer einstufigen Spiralgehäusepumpe mit Lagerträger [8]

Eine Kreiselpumpe, wie in Abbildung 1.17 dargestellt, besteht im Wesentlichen aus einem Gehäuse, der Lagerung für die Pumpenwelle und einem Laufrad. Die Flüssigkeit strömt durch den Saugstutzen zum Laufrad. Das Laufrad, welches fliegend auf einer Welle montiert ist, die mit einer Kupplung mit dem Motor verbunden ist, überträgt die notwendige Energie auf die Flüssigkeit. Aus dem Laufrad strömt die Flüssigkeit in den Leitapparat, der die Aufgabe hat, die Flüssigkeit zu verzögern um so viel kinetische Energie wie möglich in statischen Druck umzuwandeln. Der Leitapparat in Abbildung 1.17 besteht aus einem Spiralgehäuse. Zwischen Laufrad und Gehäuse befindet sich ein schmaler Spalt. In diesem fließt ein Teil der Flüssigkeit vom Laufradaustritt zurück zum Laufradeintritt. Dieser Spalt erhöht die Verluste innerhalb der Pumpe.

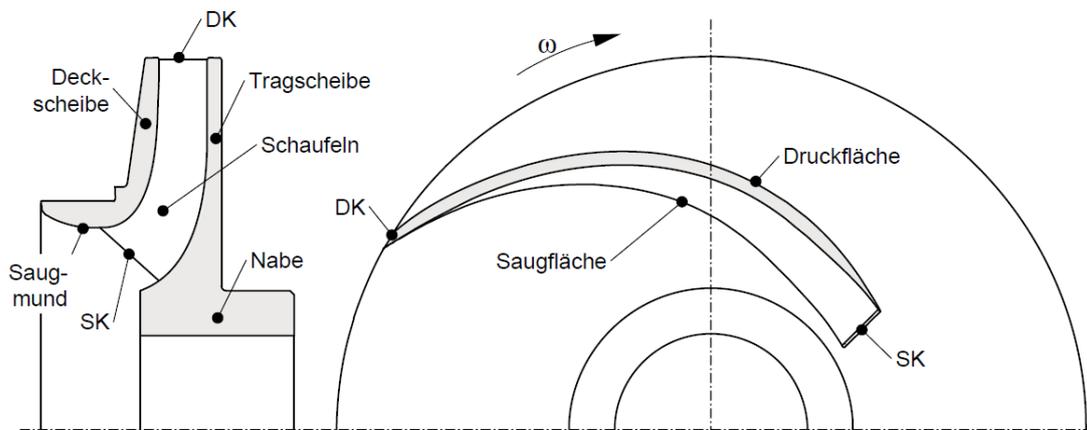


Abbildung 1.18: Meridianschnitt und Grundriss eines Laufrades [8]

Das Laufrad besteht in der Regel aus einer Tragscheibe und mindestens einer Laufschaufel, eine Deckscheibe, wie in Abbildung 1.18 dargestellt, ist nicht zwingend nötig. [8]

1.6 Turbulente Strömungen

Da die Strömung, die in dieser Diplomarbeit gemessen wird eine turbulente Strömung ist, folgt in diesem Abschnitt eine kurze Einführung zu diesem Thema.

1.6.1 Allgemeines

In Strömungen, in denen die Trägheitseffekte dominieren, kann das Geschwindigkeitsfeld auf extrem kleinen Längenskalen variieren. Solche Strömungen hängen in komplizierter Weise von Ort und Zeit ab und werden als turbulent bezeichnet. Fast jede Strömung in technischen Anlagen ist turbulent. In einer turbulenten Strömung bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen anders als bei laminaren Strömungen auch quer zur Hauptströmung und bewirken dabei einen regen Impulsaustausch und dadurch eine verhältnismäßig gleichmäßige Energieverteilung im ganzen Querschnitt, in Abbildung 1.19 ist der Vergleich einer laminaren und einer turbulenten Rohrströmung dargestellt. Das Verhältnis von Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften kann über die Reynoldszahl charakterisiert werden. Diese dimensionslose Kennzahl ist wie folgt definiert

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu}. \quad (1.12)$$

Bei ρ handelt es sich um die Dichte des Fluids, v die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids gegenüber dem Körper, d die charakteristische Länge des Körpers und η die dynamische Viskosität die sich auch als über ν die kinematische Viskosität anschreiben lässt, die in folgendem Verhältnis mit η steht

$$\eta = \nu \rho. \quad (1.13)$$

Mit der Reynoldszahl lassen sich Aussagen über die Art der Strömung tätigen. Steigt die Reynoldszahl über einen gewissen Wert, kann die kleinste Störung dazu führen, dass eine laminare Strömung in eine turbulente Strömung umschlägt. Bei Rohrströmungen wird dieser Wert mit $Re=2300$ angegeben. Die Reynoldszahl ist auch eine wichtige Größe in der Ähnlichkeitstheorie. [10] [4] [14]

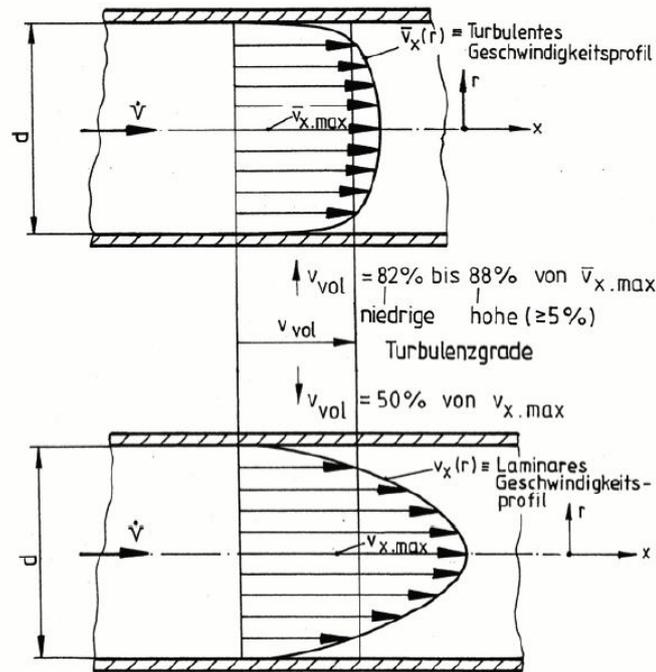


Abbildung 1.19: Vergleich einer turbulenter und einer laminarer Rohrströmung [14]

1.6.2 Turbulenzgrad

Der Turbulenzgrad ist das Maß für die Intensität der Turbulenz und ist über die folgende Formel definiert

$$T_U = \frac{1}{c_\infty} \sqrt{\frac{1}{3} (\bar{c}_x^2 + \bar{c}_y^2 + \bar{c}_z^2)}. \quad (1.14)$$

Dabei sind $\acute{c}_x, \acute{c}_y, \acute{c}_z$ die Komponenten der stochastischen turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit \acute{c} und $\bar{c}_x, \bar{c}_y, \bar{c}_z$ die zugehörigen Schwankungs-Mittelwerte, die gemäß Definition null sind. Dies ist so, weil sich negative und positive Werte aufheben. Dagegen sind die zeitlichen Mittelwerte der Quadrate der Schwankungsgeschwindigkeit \bar{c}_x^2, \bar{c}_y^2 und \bar{c}_z^2 praktisch immer ungleich null. c_∞ ist die ungestörte Strömungsgeschwindigkeit. Die turbulente Strömungsgeschwindigkeit hat demnach die Form

$$\vec{c} = \vec{\bar{c}} + \vec{\acute{c}}. \quad (1.15)$$

Bei üblichen turbulenten Strömungen hat der Turbulenzgrad Werte von ca. 0,1. [15]

Kapitel 2

Versuchsaufbau und Messtechnik

In diesem Kapitel wird der Um- und Aufbau des Prüfstandes sowie die verwendete Messtechnik erläutert.

2.1 Radialpumpenprüfstand

Der bestehende Radialpumpenprüfstand des Instituts für Energietechnik und Thermodynamik besteht aus einer einstufigen radialen Kreiselpumpe mit Spiralgehäuse der Firma Vogel, die in einem großen Kreislauf betrieben wird. An diesem sind im Zuge verschiedener Diplomarbeiten Umbauten durchgeführt worden, um ein breites Spektrum an Versuchen durchführen zu können.

2.1.1 Umbau des Radialpumpenprüfstandes

Da der bestehende Prüfstand in seiner ursprünglichen Form nicht für LDA-Messungen mit Seedings geeignet ist, wurden verschiedene Umbauten durchgeführt.

- Umbau des Prüfstandes auf einen geschlossenen kleineren Kreislauf, um den Prüfstand autark betreiben zu können und keine Seedings zu verlieren.
- Einbau eines Wärmetauschers, um die Reibungswärme der Drossel abzuführen.

- Einbau einer langen Zuleitung, um eine gerade Zuströmung zu ermöglichen und um auf dieser Seedings auf verschiedene Arten einzubringen .
- Einbau neuer Sensoren und Anzeigen für die neue Art des Betriebes.

Beim Umbau wurde besonderes Augenmerk darauf gerichtet, dass der Prüfstand im umgebauten Zustand in der Lage ist, alle Versuche, die zuvor an ihm durchgeführt werden konnten, weiterhin möglich sind. Dies beinhaltet Funktionen, die für diese Diplomarbeit nicht von Belang sind wie zum Beispiel die Möglichkeit, den Prüfstand zu evakuieren, um Kavitationsversuche zu ermöglichen, und folglich nicht behandelt werden.

2.2 Aufbau des Prüfstandes

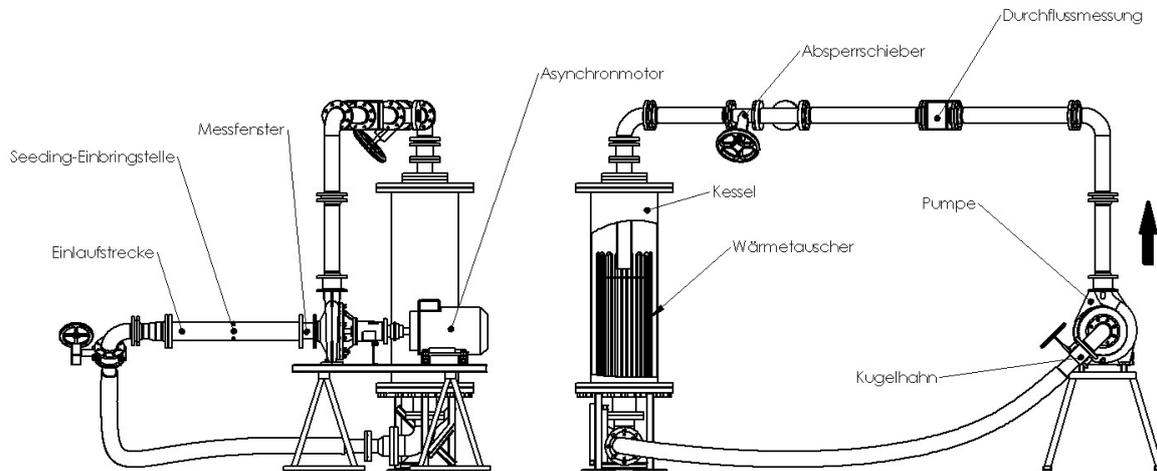


Abbildung 2.1: Vorder- und Seitenansicht des Prüfstandes

Der Prüfstand, dessen Aufbau in Abbildung 2.1 dargestellt ist, operiert in einem geschlossenen Kreislauf, der im gefüllten Zustand zirka 500 Liter Wasser fasst. Der Durchfluss wird über einen Absperrschieber an der Druckseite der Pumpe geregelt. Am Einlass der Pumpe können Rohrstücke aus Plexiglas eingebaut werden, um LDA-Messungen an der Saugseite der Pumpe zu ermöglichen. Der Aufbau des Prüfstandes wurde so ausgelegt, dass die Plexiglas-Einsätze leicht und ohne Verlust von viel Wasser und folglich Seedings auswechselbar sind. Die Seedings können auf verschiedene Arten in der Einlaufstrecke vor der Pumpe eingeblasen werden. Die Befüllung des Prüfstandes erfolgt über einen Schlauchanschluss an der Unterseite des Kessels. Ein zweiter Schlauchanschluss ist an der Druckseite der Pumpe vor dem Absperrschieber verbaut. Dieser dient dazu den Prüfstand spülen zu können, um vorhandene Seedings aus dem Kreislauf zu entfernen und so verschiedene Seedings testen zu können, ohne dass Restseedings das Ergebnis verfälschen. Um diese Spülung zu erreichen, wird der Absperrschieber, während die Pumpe in Betrieb ist geschlossen, der Kessel mit Frischwasser befüllt und durch den zweiten Anschluss entleert. Als Absperrorgan vor der Einlaufstrecke wurde ein Kugelhahn verbaut, da dieser im offenen Zustand die Strömung nicht beeinflusst und folglich die Messungen nicht verfälscht. Der Kugelhahn ermöglicht auch Umbauten und Wartungen an der Pumpe ohne den Kessel entleeren zu müssen.

Da der Prüfstand in einem geschlossenen Kreislauf arbeitet und daher die eingebrachte Leistung großteils in Reibungswärme umgewandelt wird, wurde ein Wärmetauscher eingebaut. Dieser wird gesondert im Abschnitt 2.2.1 betrachtet. Der Kessel verfügt über ein Steigrohr, um den Füllstand anzuzeigen und einen Luftanschluss mit Sperrventil, der zur Regelung des Systemdrucks des Prüfstandes dient.

Das Herzstück des neuen Prüfstandes ist eine horizontale einstufige Radial-Kreiselpumpe mit Spiralgehäuse der Firma Vogel, deren Daten in Tabelle 2.1 dargestellt sind. Die Pumpe wird von einem Asynchronmotor angetrieben und ist mit einer Zahnkupplung mit dem Motor verbunden. Die Drehzahl der Pumpe lässt sich mit dem Frequenzumrichter des Asynchronmotors stufenlos regeln.

Hersteller	Vogel
Typ	einstufige Radial-Kreiselpumpe mit Spiralgehäuse
Bezeichnung	L100-315
Volumenstrom	$0,040 \text{ m}^3/\text{s}$
Förderhöhe	26 m
Drehzahl	1450 min^{-1}
Max. Leistung	22 kW
Laufkraddurchmesser	296 mm
Schaufelanzahl	6

Tabelle 2.1: Daten der Pumpe

2.2.1 Beschreibung des Wärmetauschers

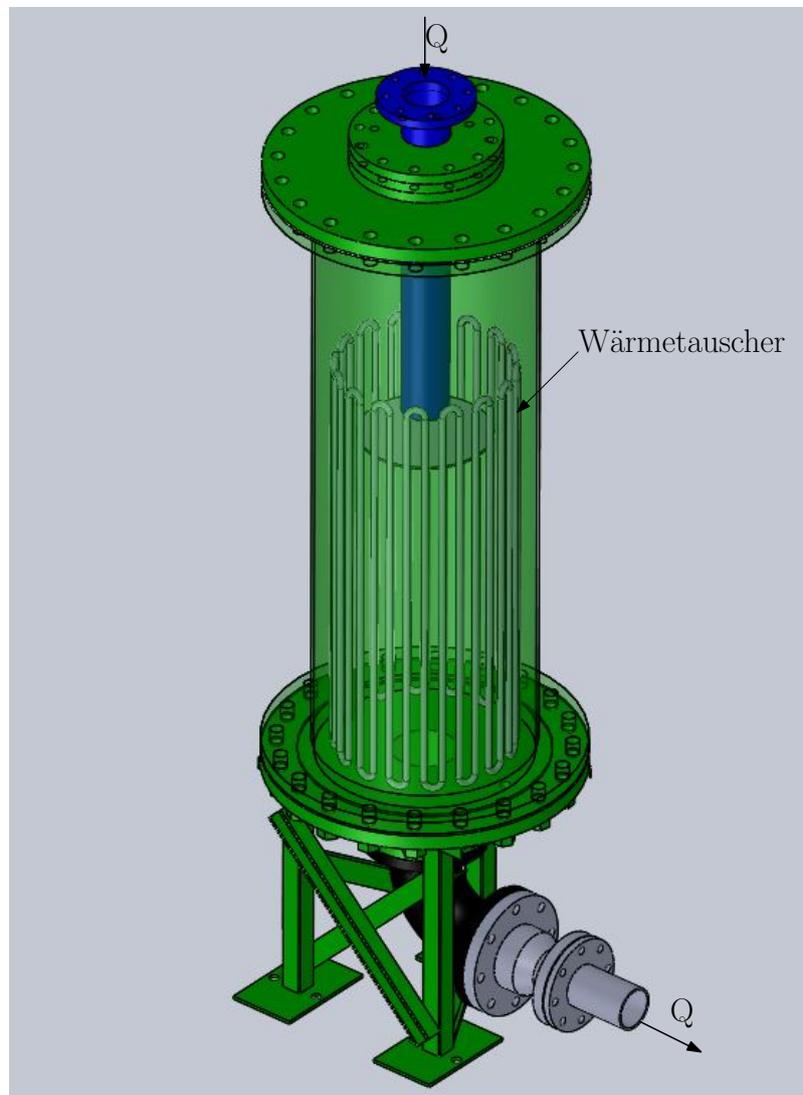


Abbildung 2.2: 3D-CAD Zeichnung des Prüfstandkessels mit Wärmetauscher

Der Wärmetauscher, der im Kessel verbaut ist, besteht aus handelsüblichen Kupferrohren die miteinander verlötet sind. Augenmerk lag bei der Konstruktion auf einer hohen Robustheit und einer hohen Oxidationsbeständigkeit, um eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Er wurde selbst in der Werkstatt des Labors gefertigt, da es so möglich war, den Wärmetauscher optimal an die Anforderungen und den gegebenen Platz im Prüfstand anzupassen.

Die Auslegung erfolgte nach den Methoden aus [11] und [2]. Die maximale Kühlleistung

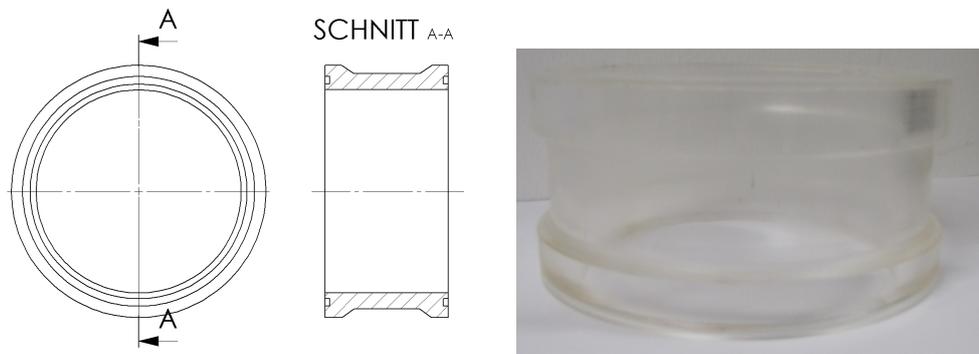
des Wärmetauschers entspricht jener Leistung, welche die Pumpe bei maximaler Leistung an das Wasser abgibt. Die Kühlleistung wird mittels Veränderungen des Durchflusses des Kühlmittels durch den Wärmetauscher geregelt. Die Regelung erfolgt händisch, kann aber nachträglich auf eine automatische Regelung umgebaut werden. Die Regelung ermöglicht es, den Prüfstand in verschiedenen Betriebspunkten bei konstanter Wassertemperatur zu betreiben. Die Daten des Wärmetauschers werden in Tabelle 2.2 dargestellt.

Bauweise	Rohrwärmetauscher
Außendurchmesser	15mm
Innendurchmesser	13mm
Gesamtlänge	32m
Maximale Kühlleistung	18,7kW
Material	Kupfer
Regelung	Händisch

Tabelle 2.2: Daten des Wärmetauschers

2.3 Messfenstergeometrien

Für den Prüfstand wurden mehrere Messfenster entworfen und gefertigt. Ziel war es, bessere Messergebnisse mittels LDA-Messungen zu erhalten. Für die Konstruktion wurde auf vorhandenes Wissen aus vorgehenden Versuchen zurückgegriffen. Die Messfenster wurden aus Kostengründen und, um sie selbst herstellen zu können aus mehreren Plexiglas-Platten (ISO 7823-1 PMMA) mittels eines viskosen Einkomponentenpolymerisationsklebstoff (ACRIFEX 1R 0192) zusammengeklebt. Dies hat bei vorgehenden Versionen gut funktioniert und ermöglicht die Vorgänge innerhalb des Rohres zu beobachten. Es wurden folgende Geometrien gefertigt:

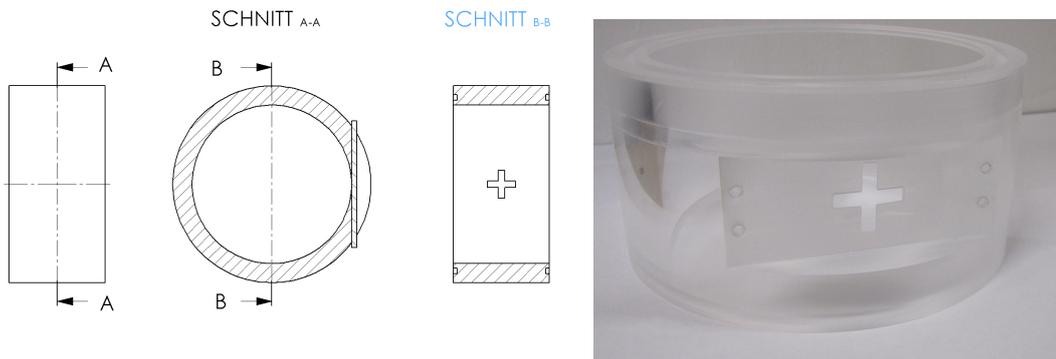


(a) Schematische Darstellung von Geometrie 1

(b) Fotografie von Geometrie 1

Abbildung 2.3: Darstellung der Messfenstergeometrie 1

Geometrie 1, die in Abbildung 2.3 dargestellt ist, wurde aus einem bestehenden Fenster, welches keine guten Ergebnisse in vorgehenden Messungen geliefert hat, gefertigt. Die Wandstärke wurde auf $9,9\text{ mm}$ verringert, mit dem Ziel, bessere Ergebnisse zu erzielen.

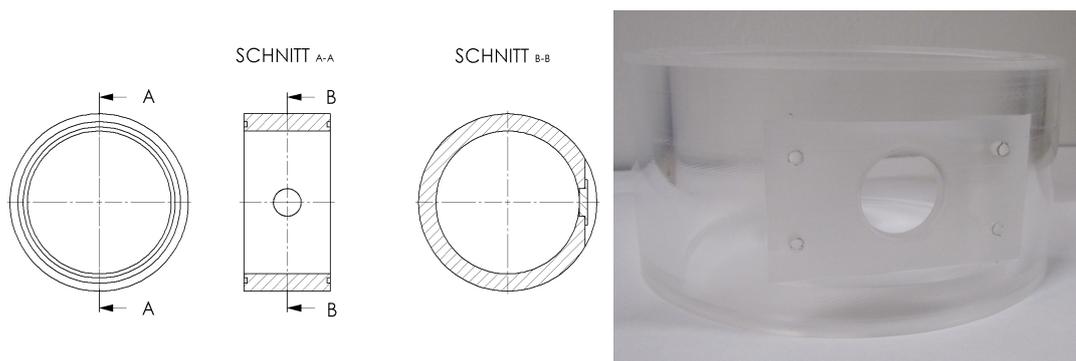


(a) Schematische Darstellung von Geometrie 2

(b) Fotografie von Geometrie 2

Abbildung 2.4: Darstellung der Messfenstergeometrie 2

Geometrie 2, die in Abbildung 2.4 dargestellt ist, wurde mit dem Ziel gefertigt, dass die Laserstrahlen auf jeweils einer Ebene in das Plexiglas eindringen bzw. wieder austreten und sich so beide Strahlenpaare an einer Stelle überschneiden. Gleichzeitig wurde versucht, so wenig Einfluss wie möglich auf die Strömung im Inneren zu nehmen. Deshalb wurde eine kreuzförmige Nut in das Rohr gefertigt, welche mittels einer Plexiglasplatte abgedeckt wird. So ist es möglich die Platte zu wechseln, ohne das Rohr ausbauen zu müssen. Es wurden mehrere Abdeckplatten mit verschiedenen Dicken gefertigt, um den Einfluss der Dicke des Sichtfensters untersuchen zu können. Die Dicken der Platten betragen 7,8; 9,9 und 15 mm.



(a) Schematische Darstellung von Geometrie 3

(b) Fotografie von Geometrie 3

Abbildung 2.5: Darstellung der Messfenstergeometrie 3

Geometrie 3, die in Abbildung 2.5 dargestellt ist, wurde mit der gleichen Absicht wie Geometrie 2 konzipiert. Es wurde aber eine andere konstruktive Lösung gewählt, um zu unter-

suchen, welche sich für zukünftige Messungen besser eignet. Bei dieser Geometrie wurde ein Loch gebohrt und dieses mittels eines Stopfens verschlossen. Die Wandstärke des Stopfens beträgt 15,5 mm.

2.4 Messtechnik

Der Radialpumpenprüfstand ist mit folgenden Sensoren bestückt:

- 2 Drucksensoren
- 1 Durchflusssensor
- 1 Kraftaufnehmer
- 1 Temperatursensor

Die Messsignale werden mittels eines Signalverstärkers verstärkt, danach an einen Analog-Digital-Wandler gesendet, der die umgewandelten Signale mittels Netzkabel an einen Computer zur Auswertung sendet. Die Sensoren werden verwendet, um einen Betriebspunkt einzustellen und konstant zu halten. Dies ist nötig, da die Geschwindigkeitsmessungen in einem stationären System durchgeführt werden sollen. Für diesen Zweck wurde ein Labview-Programm implementiert, das die nötigen Messwerte auswertet und darstellt.

2.4.1 Durchflussmessung und Förderhöhe

Der Durchfluss Q des Prüfstandes wird mittels eines magnetisch-induktiven Durchflusssensors der Firma Endress + Hauser vom Typ Promag 33 F gemessen. Dieser befindet sich auf der Druckseite der Pumpe. Mit dem Durchfluss und dem Rohrquerschnitt kann unter Verwendung des Massenerhaltungssatzes bei einem inkompressiblem Fluid die mittlere Strömungsgeschwindigkeit an jedem Punkt berechnet werden. Die Förderhöhe H der Pumpe wird mittels zweier piezoresistiver Drucksensoren, jeweils an der Druck und Saugseite angebracht, und der Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt. Die Drucksensoren sind jeweils

an eine Ringleitung angeschlossen, um den Druck zu mitteln. Mittels dieser zweier Werte und den Strömungsgeschwindigkeiten an Pumpeneingang und Pumpenausgang wird die Förderhöhe mit der Gleichung 2.1 berechnet.

$$H = \frac{\Delta p_{tot}}{\rho g} = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2g} + (z_d - z_s) \quad (2.1)$$

Mittels der Förderhöhe und dem Durchfluss kann die hydraulische Leistung der Pumpe mittels der Gleichung 2.2 berechnet werden.

$$P_{hydraulisch} = \rho g H Q \quad (2.2)$$

2.4.2 Temperaturmessung

Die Messung der Temperatur des Wasser innerhalb des Prüfstandes erfolgt mittels einer Pt100-Temperatursonde der Genauigkeitsklasse B, die im Krümmer unterhalb des Kessels angebracht ist.

2.4.3 Wirkungsgradmessung

Der Motor, der die Pumpe antreibt ist auf einer sogenannten Pendelaufhängung befestigt. Dies bedeutet, dass der Motor auf zwei Radiallagern montiert ist und sich verdrehen kann. Durch diese Aufhängung ist es möglich, das Reaktionsmoment zu messen, das gleich dem Motormoment ist. Dazu wird die Reaktionskraft an einer Stelle mit festem Abstand L zur Drehachse gemessen. Dies wird in Abbildung 2.6 dargestellt. Mit dem Wert der Reaktionskraft und des Abstandes lässt sich mit Gleichung 2.4 das Moment des Motors, das auf die Antriebswelle der Pumpe wirkt, bestimmen.

$$F_{reaktion} = m_{LC} g \quad (2.3)$$

$$M_M = F_{reaktion} L \quad (2.4)$$

Mit der Drehzahl des Motors, die man als Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2n\pi$ anschreiben kann, lässt sich die mechanische Leistung des Motors berechnen.

$$P_{mech} = M_M \omega \quad (2.5)$$

Die Berechnung des Wirkungsgrades η erfolgt mit den Gleichungen 2.2 und 2.5, die in Gleichung 2.6 eingesetzt werden.

$$\eta = \frac{P_{hydraulisch}}{P_{mech}} \quad (2.6)$$

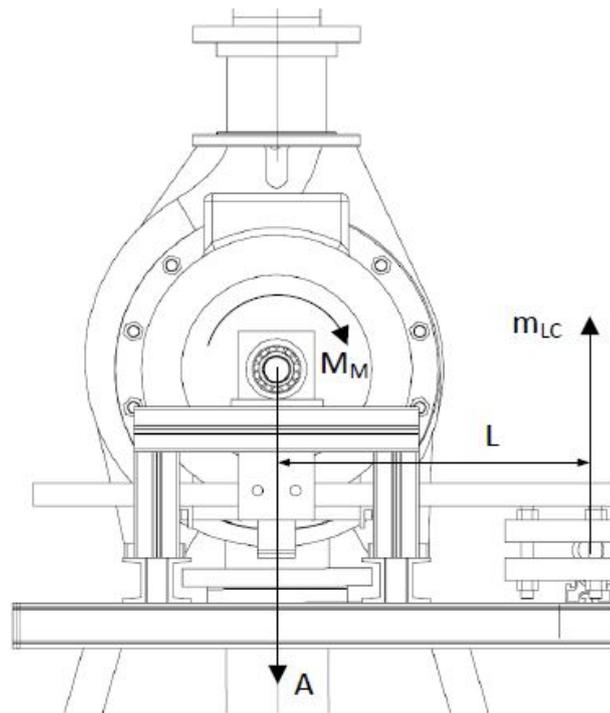


Abbildung 2.6: Darstellung der Pendellagerung des Motors [12]

2.4.4 Betriebspunkt der Pumpe

Als Betriebspunkt wurden die Werte aus Tabelle 2.3 gewählt. Dieser Betriebspunkt befindet sich im Überlastbereich der Pumpe. Dies ist nötig um eine Drallkomponente in der Strömung zu erzeugen und sie so messen zu können. Der Wert der Drehzahl wurde so gewählt, dass der Prüfstand möglichst frei von Vibrationen bleibt. Der Durchfluss wurde so gewählt, dass sich eine hohe mittlere Durchflussgeschwindigkeit c_m einstellt, um bei den Messwerten größere Unterschiede zu erhalten. Die Temperatur des Wasser wird in einem Bereich von 10 bis 30°C gehalten. Dieser Betriebspunkt wird für alle folgenden Messungen eingestellt.

Betriebspunkt	
Volumenstrom	40 l/s
Drehzahl	1000 min^{-1}
Förderhöhe	7.38 m

Tabelle 2.3: Bertriebspunkt der Pumpe

2.5 Verwendetes LDA-System

Bei dem LDA-System, das für die Messungen verwendet wird handelt es sich um ein 2-Komponenten-System der Firma TSI. Dieses ist in einem Gehäuse untergebracht. Es besteht aus folgenden Komponenten.

- PowerSight Laser Velocimeter und Controller Module (TR-SS-2D),
- PDM Photodetector Module (PDM1000-2SS) und
- FSA Processor (FSA3500-2).

Betrieben wird das System mit dem Softwarepaket FlowSizer64, mit dem auch die Transversierung angesteuert wird. Die genauen Daten des LDA-Systems sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.[3]

LDA-Parameter	Channel 1	Channel 2
Wellenlänge	561 <i>nm</i>	532 <i>nm</i>
Farbe	Gelb	Grün
Strahlabstand	50 <i>mm</i>	50 <i>mm</i>
Strahldurchmesser	2,1 <i>mm</i>	2,1 <i>mm</i>
Brennweite	362,2 <i>mm</i>	362,2 <i>mm</i>
fringe Spacing	4,0780 μm	3,8672 μm
Anzahl fringes	30	30
Länge Kontrollvolumen	1,7950 <i>mm</i>	1,7023 <i>mm</i>

Tabelle 2.4: Beschreibung des LDA-Systems [3]

2.5.1 Einstellungen des LDA-Systems

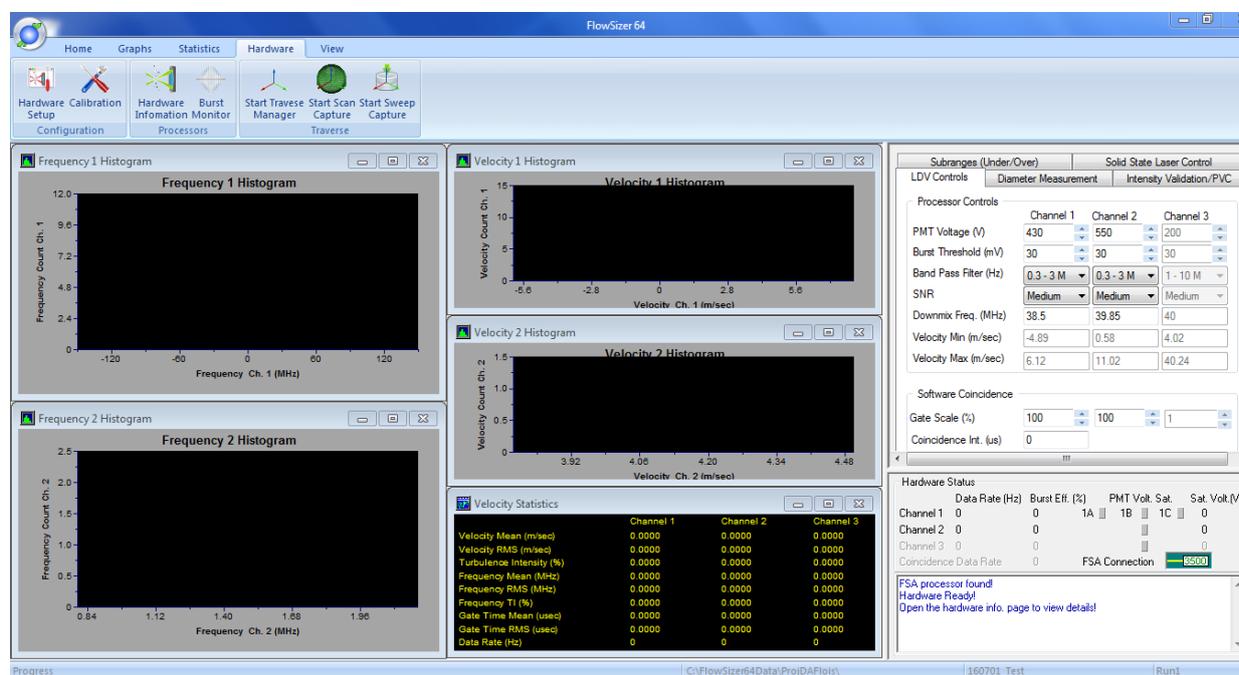


Abbildung 2.7: Benutzeroberfläche der FlowSizer 64 Software

Das Programm FlowSizer 64 ermöglicht es, mehrere Parameter einzustellen, um bessere Messergebnisse zu erhalten. Im Betriebshandbuch wird erklärt, dass folgende Einstellungen, die in dem Fenster LDV Controls zusammengefasst sind, großen Einfluss auf die Messergebnisse haben:

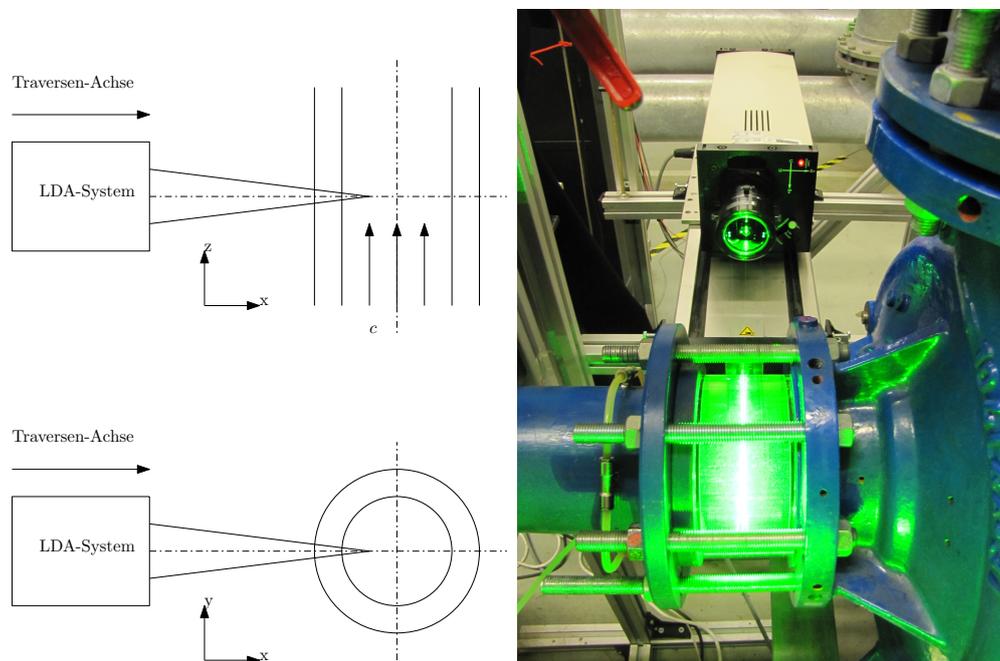
- **PMT Voltage:** Diese Einstellung stellt die Spannung ein, die an der photomultiplier tube (Deutsch: Photomultiplier) des Channels angelegt wird. Eine Erhöhung dieser Spannung führt zu mehr Messsignalen, da auch kleinere Partikel die das Messvolumen passieren detektiert werden, gleichzeitig werden auch alle Störsignale verstärkt.
- **Burst Threshold:** Der Burst Treshold gibt vor wie wie hoch die Spannung eines Signals sein muss, um für die Auswertung zulässig zu sein. Bei der Einstellung dieses Wertes ist auf die Größe der Partikel zu achten, da große Partikel zu höheren Signalspannungen führen.
- **Band Pass Filter:** Der Band Pass Filter regelt welche Signalfrequenzen zur Auswertung

verwendet werden. Diese Einstellung kann man, wenn man Messsignale bekommt relativ einfach einstellen, in dem man diese so einstellt bis keine Signale abgeschnitten werden.

- SNR (signal-to-noise-ratio): Die Einstellung des SNR regelt, welche Bursts, je nach Qualität, für die Auswertung verwendet werden. Wenn die Einstellung High gewählt ist werden nur Bursts mit einer hohen Qualität verwendet, was zu einer höheren Genauigkeit der Messung führt. Dies reduziert aber die Datenrate, die als zulässige Bursts pro Sekunde angegeben ist.
- Downmix Frequenz: Mittels diesem Parameter kann die Frequenz von 40 MHz, die die Bragg-Zelle zur Doppler-Frequenz addiert, abgezogen werden. Dies funktioniert wie ein Offset und ist nur für die Auswertung der Signale von Belang. Ein Wert von 40 MHz führt dazu, dass keine Rückströmungen gemessen werden können. Der Wert, der für die Downmix Frequenz eingestellt wird gibt folglich an, wie groß der Maximalwert der gemessenen Rückströmung sein kann.

Die Benutzeroberfläche auf der diese Parameter eingestellt werden, ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Diese Parameter wurden für die jeweiligen Messungen angepasst, um gute Messergebnisse zu erzielen.[3]

2.6 Travesierung des LDA-System



(a) Schematische Darstellung der Laserausrichtung
(b) Fotografie der Laserausrichtung

Abbildung 2.8: Travesierung des LDA-Systems

Die LDA-Messungen werden alle auf einer Linie, die orthogonal auf die Strömungsrichtung liegt und sich auf der horizontalen Mittelebene der Messgeometrie befindet, durchgeführt. Um dies zu erreichen, ist das LDA-System auf einer einachsigen Travesierung montiert. Die vertikale und horizontale Positionierung der Travesierung ist manuell über Gewindestangen möglich. Die Travesierung ist auf einer Halterung aus Aluminiumprofilstangen befestigt, die mehrere Einstellmöglichkeiten hat und fest mit dem Boden verbunden ist. Bei der Montage wurde auf eine hohe Steifigkeit geachtet, um dafür zu sorgen, dass es zu keinen Verschiebungen während der Messvorgänge kommt. Der Fahrweg der Travesierung wird mittels eines Excel-Programmes bestimmt, das mittels dem Zusammenhang aus Gleichung 1.7 die Position des Messvolumens berechnet. Der Aufbau ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

2.7 Verwendete Seedings

Bei den Messversuchen werden folgende Seedings verwendet:

- Polyamide seeding particles (PSP) der Firma Dantec mit der Bezeichnung PSP-50 und PSP-5. PSP Seedings werden mittels eines Polymerisations-Prozesses erzeugt und haben keine exakt sphärische Form. Diese Art von Seedings wird von Herstellern für Messungen in Wasser empfohlen.
- Hohle Glaskugeln aus Borosilikatglas mit sphärischer Form (HGS) und glatter Oberfläche der Firma Dantec.
- Luftbläschen, sie eignen sich als billige Alternative, haben aber einige Nachteile. Ihre Fähigkeit der Strömung zu folgen ist aufgrund ihrer geringen Dichte nicht gut und sie neigen dazu, sich zu größeren Blasen zusammenzuschließen die der Strömung noch schlechter folgen können.
- Glattes Weizenmehl W480. Dieses wird in einer Veröffentlichung [16] als Seeding für LDA-Messungen verwendet. Daher wird untersucht, ob es sich für Messungen in Rohrleitungen eignet.

In dieser Diplomarbeit wird die Konzentration der Seedings in parts per million (ppm) angegeben. Bei ppm handelt es sich um eine massenbezogene Konzentration wobei ein 1 Prozentanteil 10000 ppm entspricht. In Abbildung 2.9 ist zur Veranschaulichung eine Fotografie von Wasser mit einem Seeding Gehalt von 7 ppm dargestellt. Die Daten der verwendeten Seedings sind im Anhang A.4 dargestellt und eine Gegenüberstellung der Eigenschaften ist in Tabelle 2.5 zusammengefasst.

Seeding	Eigenschaften	Strömungsfolgevermögen	Kosten
PSP-50	abgerundete Form, gute Reflexionseigenschaften	+	-
PSP-5	abgerundete Form, gute Reflexionseigenschaften	++	-
Glaskugeln	sphärische Form, gute Reflexionseigenschaften	++	~
Luftblasen	runde Form, einfach in Strömung einzubringen	--	+
Mehl	Biologisch abbaubar	-	++

Tabelle 2.5: Vergleich der Eigenschaften der verwendeten Seedings



Abbildung 2.9: Wasser mit einer Konzentration von 7 ppm Glaskugeln

2.8 Einbringung der Seedings

Die Seedings werden auf verschiedenen Arten in die Einlaufstrecke vor der Pumpe eingeblasen. Ziel ist es, die Seedings beim ersten Durchgang durch die Einlaufstrecke so einzubringen, dass sie das Messvolumen passieren und zu Messsignalen führen. Hierzu wurden an zwei Stellen in der Zuleitung jeweils 4 Bohrungen zum Einblasen der Seedings gefertigt. Die Entfernung der beiden Einblasstellen beträgt 100 und 530 mm. Die Anzahl der verwendeten Bohrungen kann an jeder Stelle eingestellt werden. Es wurde zusätzlich eine Sonde gefertigt, die durch zwei der Bohrungen schräg eingebaut werden kann. Diese Sonde hat zwei Bohrungen mit einem Durchmesser von 1 mm, die jeweils 5 mm aus der Mitte der Sonde gefertigt sind, um Seedings einzublasen. So ist es möglich, Seedings besser in die Mitte der Strömung einzublasen. Die Bohrungen der Sonde sind entgegen der Durchflussrichtung angeordnet, um eine bessere Verteilung zu erreichen. Die Anordnung der Bohrungen und der Sonde sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

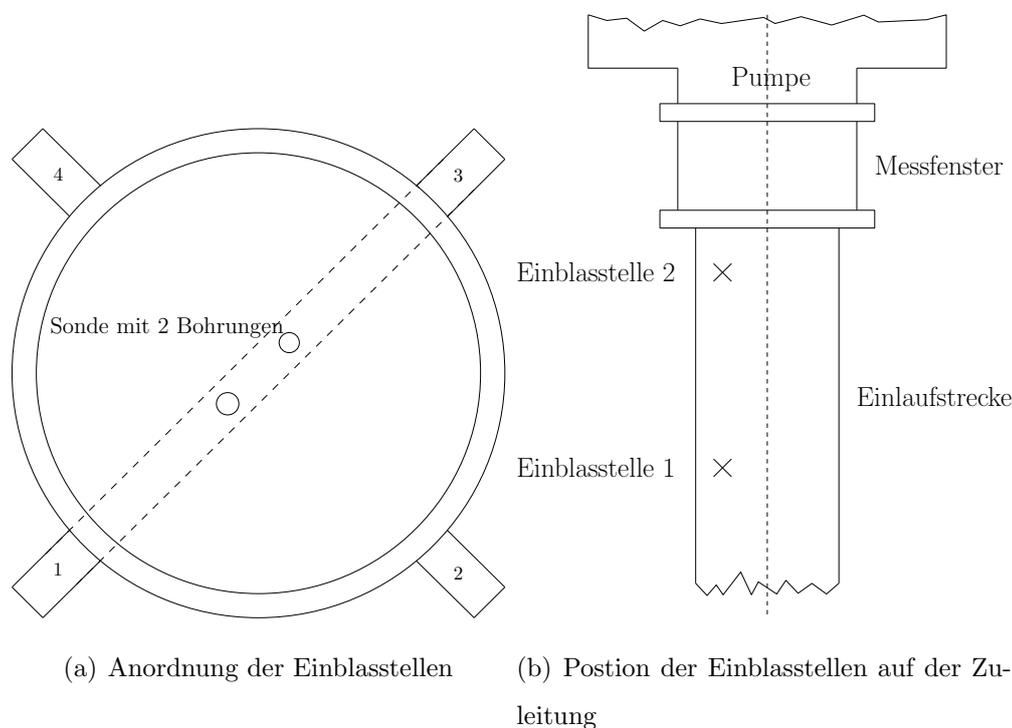


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der verschiedenen Einblasarten der Seedings

Die Einblasung durch die Einblastellen wird auf folgende zwei Arten durchgeführt:

- Die Luftbläschen werden mittels eines Kompressors, eines Druckregelventils und eines Drosselventils eingeblasen. Um die Luftmenge, die eingeblasen wird bestimmen zu können, wird ein präzises Drosselventil mit einer Kennlinie verwendet und der Differenzdruck mittels des Druckregelventils eingestellt. Die Kennlinie des Ventils ist im Anhang in (Abbildung A) dargestellt. Diese muss umgerechnet werden, da die Kennlinie auf einen anderen Druckunterschied bezogen ist. Das Einstellrad zur Drosselkennlinie ist im Anhang in Abbildung A.3 dargestellt.
- Die anderen Seedings werden in einen Speicherbehälter mit einem Volumen von 16 mm^3 in bereits in Wasser gelöster Form eingefüllt und von dort mittels Wasser, das mit einem Schlauch von der Druckseite der Pumpe entnommen wird, eingeblasen. Um ein gutes Wasser-Seeding-Gemisch zu erhalten, wird Alkohol zugegeben der dafür sorgt, dass sich die Seedings besser in Wasser verteilen.

Kapitel 3

Messergebnisse und Interpretation

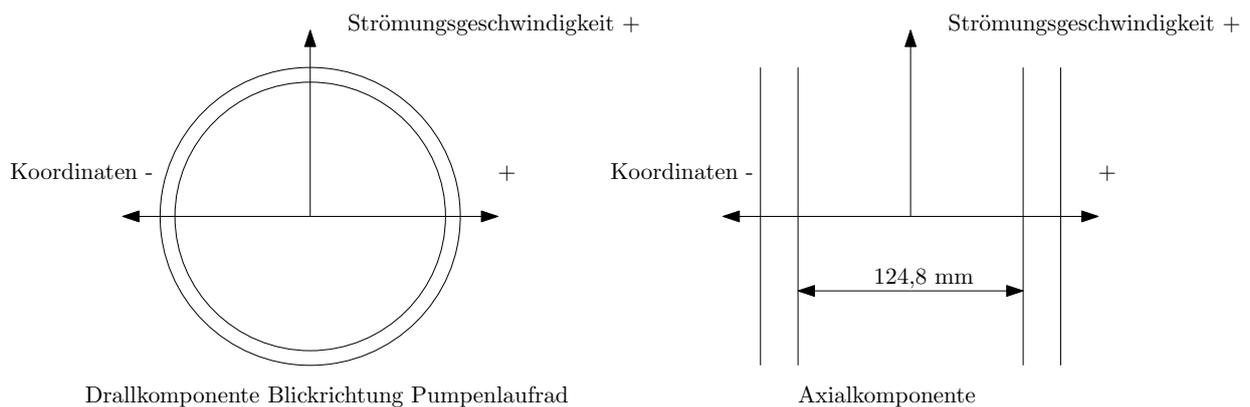


Abbildung 3.1: Darstellung des Koordinatensystems für die Messergebnis-Darstellung

Dieses Kapitel widmet sich den Messergebnissen der LDA-Messungen und der Interpretation dieser. Die Einstellungen und die verwendete Messfenstergeometrie für die Messungen werden in einer Tabelle am Anfang des jeweiligen Abschnitts zusammengefasst. Bei den Ergebnissen von Channel 1 handelt es sich um die Drallkomponente, bei Channel 2 um die Axialkomponente der Strömung. Bei der Datenrate handelt es sich um die Anzahl der zulässigen Messsignale während der Dauer der Messzeit. Es werden bei allen Versuchen die gleichen Messpunkte verwendet, um die Ergebnisse an der gleichen Stelle vergleichen zu können. Da es anfänglich Probleme aufgrund von Algen-Bildung und Kalkablagerungen gegeben hat, wird bei den Versuchen stets frisches Wasser verwendet und mit diesem eine Vergleichsmessung durchgeführt, um ungewollte Einflüsse auf die Versuche auszuschließen.

Die Koordinatensysteme, in denen die Messergebnisse dargestellt werden, sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

3.1 Untersuchung des Einflusses der Messfenstergeometrie auf Messergebnisse

Um den Einfluss der Messgeometrie auf die Messsignale zu untersuchen, werden die verschiedenen Geometrien verglichen. Es werden jeweils im gleichen Betriebspunkt und bei einem Seeding-Gehalt von 7 ppm Messung mit den zu vergleichenden Geometrien durchgeführt.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (V)	430	550
Burst Treshold (mV)	30	30
Band Pass Filter (MHz)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (MHz)	38.5	39.5
Messzeit(s)	120	
Seeding	PSP-50 7 ppm	

Tabelle 3.1: LDA-Einstellungen für Vergleichsmessung der Geometrien

3.1.1 Messergebnisse bei Variation der Messfenstergeometrien

Um die Messfenstergeometrien effektiv zu vergleichen, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und die Datenraten der tangentialen und axialen Komponente der einzelnen Messungen in jeweils einem Diagramm dargestellt.

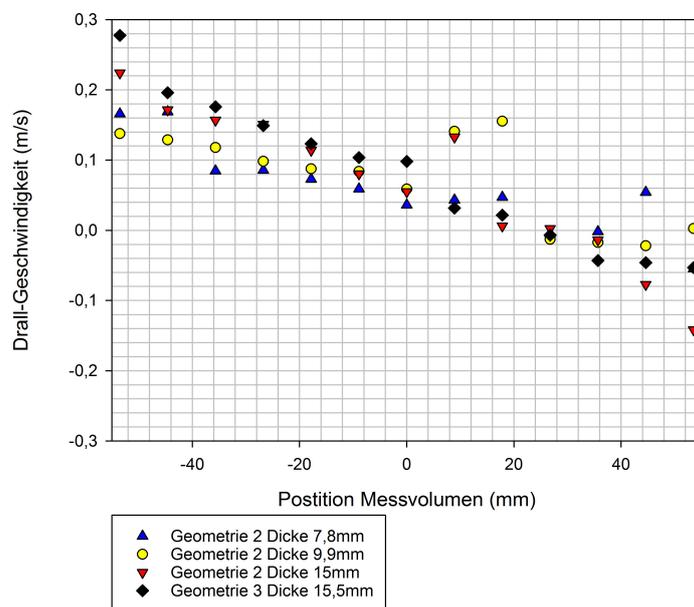


Abbildung 3.2: Verlauf der Drallkomponente der Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Messfenstergeometrien

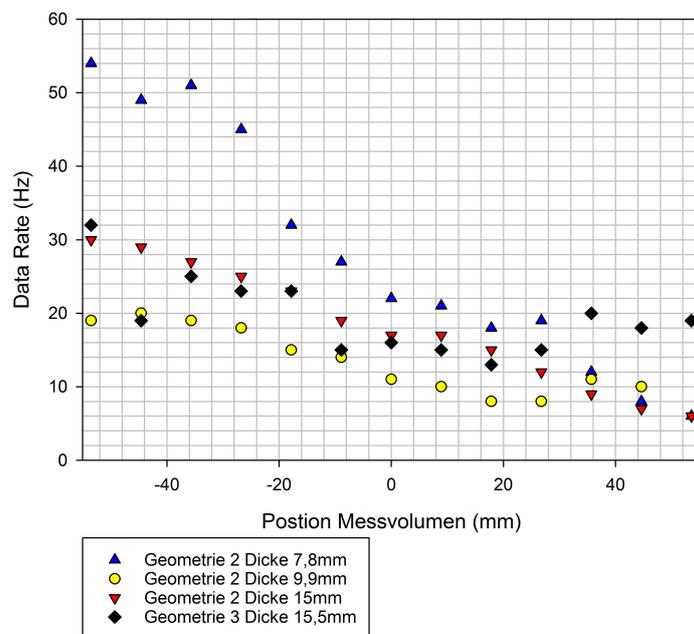


Abbildung 3.3: Verlauf der Drall-Datenrate bei Variation der Messfenstergeometrien

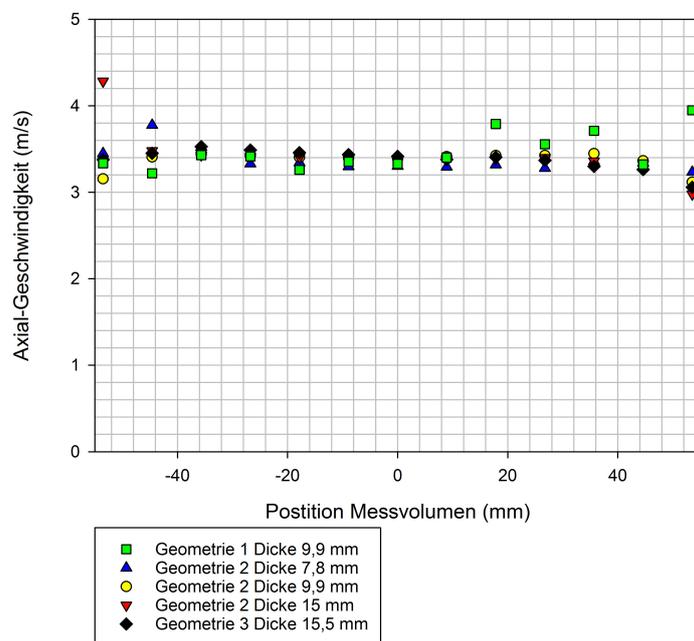


Abbildung 3.4: Verlauf der axialen Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Messfenstergeometrien

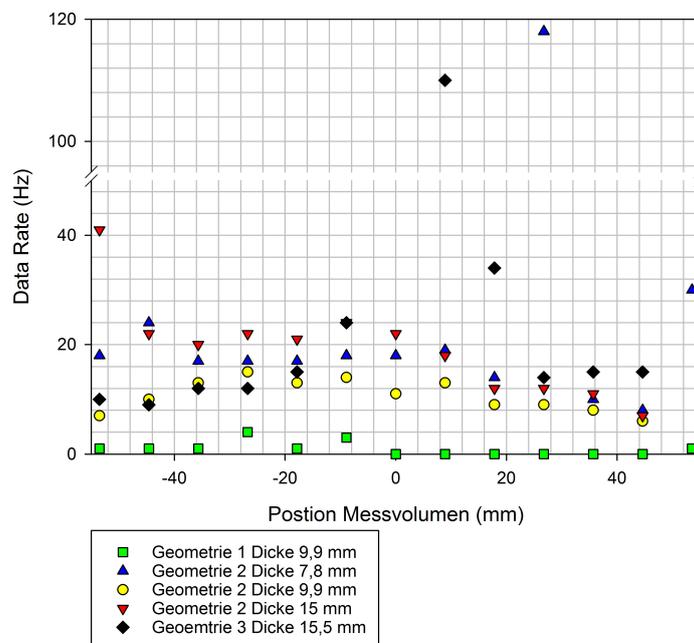


Abbildung 3.5: Verlauf der Axial-Datenrate bei Variation der Messfenstergeometrien

3.1.2 Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Messfenstergeometrien

Bei Vergleich der Messungen zeigt sich, dass mit zunehmender Dicke der Messfenstergeometrien die Datenrate nicht zwingend abnimmt, wie der Vergleich der Platten mit 15 und 9,9 mm bei Geometrie 2 zeigt. Dennoch liefert die Platte mit der geringsten Dicke die besten Datenraten. Geometrie 1 liefert die schlechtesten Ergebnisse. Die Datenrate der Drallkomponente ist so gering das mit ihr keine Zufriedenstellende Messergebnisse gemessen werden können. Daher ist sie in den Diagrammen nicht abgebildet. Den größeren Einfluss auf die Datenrate hat die Oberflächenbeschaffenheit der Messfenstergeometrien, da bereits kleine Kratzer zur Streuung des Laserlichtes führen und so die Messdaten verfälschen. Nahe an den Wänden der Messfenstergeometrie ist es nicht möglich die Strömungsgeschwindigkeit zu messen, da es hier zu starken Reflexionen kommt. Es ist auch zu beobachten, dass die Datenrate abnimmt, umso näher man der gegenüberliegenden Wand des Messfensters kommt. Die Ursache hierfür ist, dass das Streulicht mehr Wasser passieren muss, um zum Detektor zu gelangen und dadurch abgeschwächt wird.

Als im Gebrauch am praktikabelsten hat sich Geometrie 2 herausgestellt. Durch ihren Aufbau können Einsatzplatten leicht gefertigt werden, die gleichzeitig eine sehr gute Oberflächenbeschaffenheit haben, weil die auf Plexiglasplatten aufgebrachte Schutzfolie erst kurz vor Einbau abgezogen wird. Die konzentrische Zentrierung aller Messfenstergeometrien erwies sich beim Einbau als aufwendig, da an keine konstruktive Zentrier-Hilfe gedacht worden ist. Es zeigte sich während den Versuchen, dass sich Plexiglas durch seine geringe Härte leicht zerkratzen lässt, deshalb wäre eine höhere Härte wünschenswert. Die Abnahme der Datenrate durch Kratzer konnte nicht durch Polieren des Plexiglasses, mit spezieller Politur, komplett rückgängig gemacht werden.

Bei den Messungen kam es zu Anomalien bei der Datenrate der Axial-Komponente. Bereiche in denen die Datenrate bei jeder Messung an einer Stelle deutlich stieg. Dies kann aber nicht durch Reflexionen hervorgerufen worden sein, da in den Messpunkten, die betroffen sind, der Wert der axialen Strömungsgeschwindigkeit gemessen wird. Dies trat immer wieder bei verschiedenen Messfenstergeometrien auf. Da an diesen Stellen die Datenrate sehr hoch ist,

ist dieser Effekt über den ganzen Querschnitt wünschenswert. Bis jetzt konnte nicht geklärt werden, wie es dazu kommt und dieses Phänomen bedarf weiterer Untersuchung.

An dieser Stelle wird die Plausibilität der Messwerte behandelt. Die Werte der tangential- und axialen Strömungsgeschwindigkeit scheinen plausibel zu sein, da sie den zu erwartenden Werten entsprechen. So entspricht der Verlauf der axialen Strömungsgeschwindigkeit dem einer typischen turbulenten Rohrströmung und die gemessenen Werte der mittleren Durchflussgeschwindigkeit $3,27 \text{ m/s}$, die sich aus dem gegebenen Durchfluss und dem Rohrquerschnitt ergibt. Der Verlauf der Umfangs Strömungsgeschwindigkeit entspricht der Drehrichtung einer Radialpumpe, die im Überlastbereich betrieben wird. Dass der Wert der Tangential-Strömung nicht genau in der Mitte des Rohres Null ist, kann damit begründet werden, dass ein Rohrkrümmer sich zu knapp an der Messstelle befindet und dieser Effekt schon bei früheren Messungen an dieser Pumpe zu beobachten war. Da alle folgenden Messungen ähnliche Ergebnisse liefern, wird dieses Thema nicht mehr behandelt.

3.2 Untersuchung von eingeblasener Luft als Seeding

Um die Eignung von Luftblasen als Seeding zu untersuchen, ist es nötig mehrere Messungen durchzuführen. Es wird der Einfluss der Menge und der Art, mit der die Luft eingeblasen wird, auf die Messergebnisse untersucht.

3.2.1 Untersuchung des Einflusses der Luftmenge

Es wird untersucht, ob die eingeblasene Luftmenge einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Dies ist durch den Aufbau des Prüfstandes möglich, da die Luftmenge gut zu dosieren ist. Die Luftmenge wird, ausgehend von der kleinsten einstellbaren Luftmenge in kleinen Schritten erhöht und die Ergebnisse dieser Messungen werden anschließend verglichen.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (V)	430	550
Burst Treshold (mV)	30	30
Band Pass Filter (MHz)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (MHz)	38.5	39.5
Messzeit (s)	60	
Messfenstergeometrie	2 mit 7.8 mm Platte	
Seeding	Luftblasen	
Einblasart	Sonde	

Tabelle 3.2: LDA-Einstellungen für Variation der eingeblasenen Luftmenge

Messergebnisse bei Variation der Luftmenge

Um die verschiedenen Luftmengen effektiv zu vergleichen, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und die Datenraten der tangentialen und axialen Komponenten in Diagrammen dargestellt. In der Legende der Diagramme ist die jeweilige Luftmenge und ihr Volumenanteil an der Strömung eingetragen.

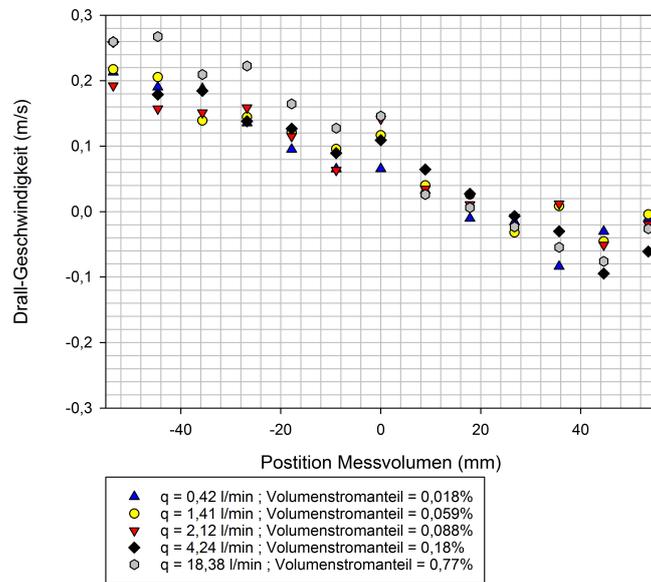


Abbildung 3.6: Verlauf der Drallkomponente der Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Luftmenge

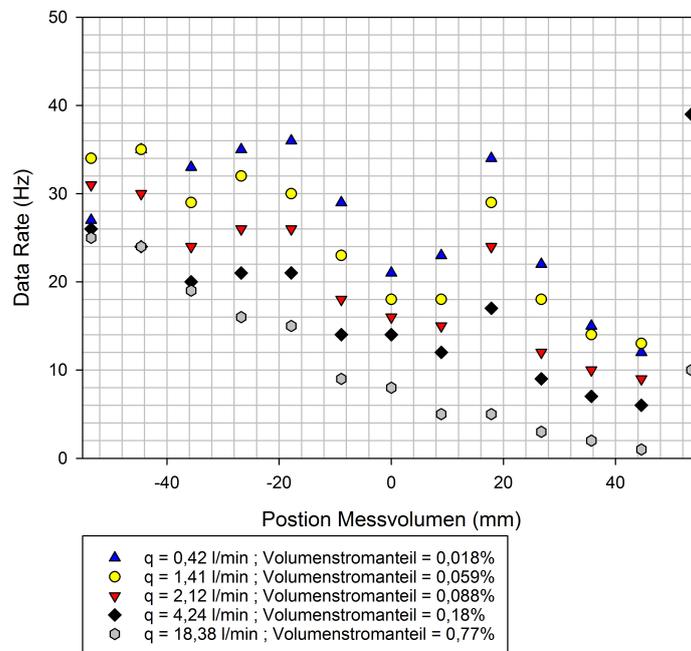


Abbildung 3.7: Verlauf der Drall-Datenrate bei Variation der Luftmenge

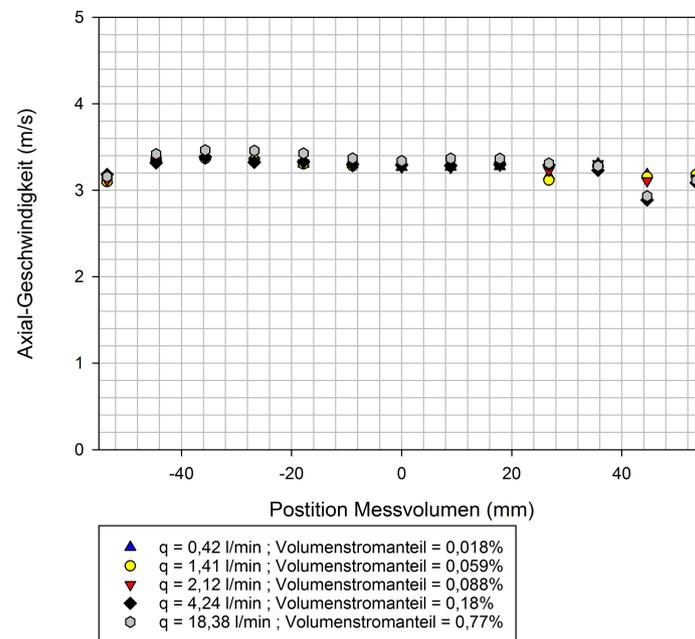


Abbildung 3.8: Verlauf der axialen Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Luftmenge

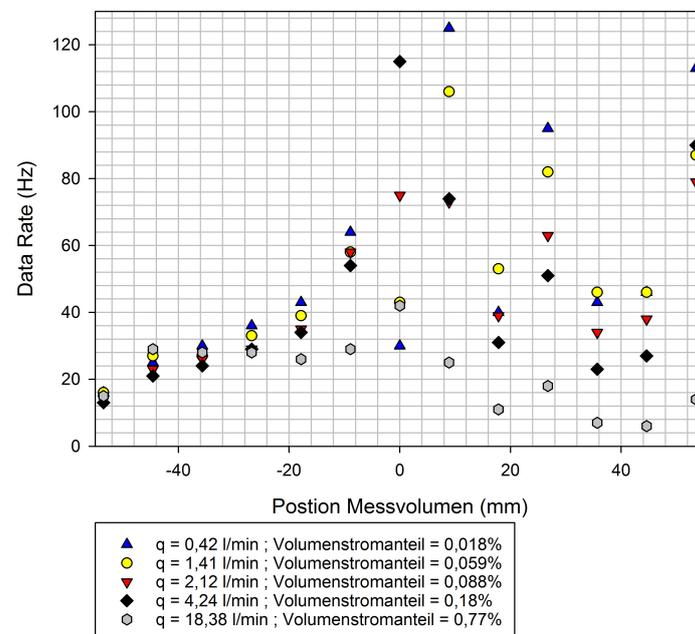


Abbildung 3.9: Verlauf der Axial-Datenrate bei Variation der Luftmenge

Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Luftmenge

Es zeigt sich, dass sich bei geringen eingeblasenen Luftmengen die höchsten Datenraten bei Messungen der Drallkomponente erzielen lassen. Diese nimmt mit Erhöhung der Einblasmenge ab. Der Verlauf der Datenrate der Axial-Komponente ist im vorderen Bereich nahezu gleich, nimmt aber im hinteren Bereich mit Zunahme der Luftmenge ebenfalls ab. Die Messergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten sind bei allen bis auf die größte Luftmenge ähnlich und liefern mit Seedings vergleichbare Messergebnisse.

Bei Beobachtungen mit dem freien Auge zeigte sich, dass bei Erhöhung der Luftmenge sowohl die Anzahl als auch die Größe der Blasen zunimmt. Durch ihre geringe Dichte steigen diese Blasen auf. Dies führt dazu, dass sich bei größeren Luftblasen der Wert der Drallkomponente nach oben verschiebt, wodurch das Messergebnis verfälscht wird. Dieser Effekt lässt sich, ausgehend von der kleinsten Luftmenge, bei allen Messungen mit größerer Luftmenge beobachten. Die größte eingeblasene Luftmenge wurde absichtlich deutlich zu hoch gewählt, um Messdaten zu erhalten, die eindeutig verfälscht sind und diese mit anderen Daten vergleichen zu können. Die Messzeit bei diesen Messungen wurde mit 60 Sekunden kürzer gewählt, da sich der Luftgehalt im System durch das Einblasen stetig erhöht. Ursache hierfür ist, dass die Luft im Kessel nicht komplett abgeschieden wird. Im hinteren Bereich des Messfensters kommt es bei Einblasung von großen Luftmengen zu starker Streuung des Laserlichtes. Dies lässt gut beobachten, da sich Reflexionen, die in alle Richtungen strahlen und sich stark bewegen, bilden.

3.2.2 Untersuchung des Einflusses der Einblasart

Um die Messergebnisse von Luftblasen, die auf verschiedenen Arten eingebracht werden, zu untersuchen, werden zwei Einbringarten verglichen, die sich als die am besten geeigneten herausstellten: Das Einblasen mittels der Sonde sowie mittels zwei Bohrungen (1 und 2) an der Unterseite des Rohres an der Einblasstelle 1. Die eingeblasene Luftmenge beträgt 0,42 l/min was einem Volumenanteil von 0,018% entspricht.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (V)	430	550
Burst Treshold (mV)	30	30
Band Pass Filter (MHz)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (MHz)	38.5	39.5
Messzeit (s)	60	
Messfenstergeometrie	2 mit 7.8 mm Platte	
Seeding	Luftblasen	

Tabelle 3.3: LDA-Einstellungen für Variation der Einblasart

Messergebnisse bei Variation der Einblasart

Um die Einblasarten effektiv zu vergleichen, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und die Datenraten der tangentialen und axialen Komponente der einzelnen Messungen in jeweils einem Diagrammen dargestellt.

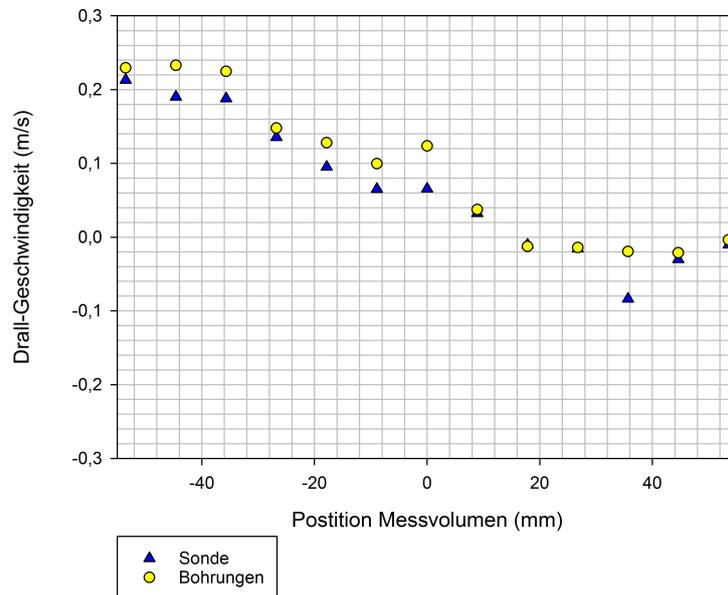


Abbildung 3.10: Verlauf der Drallkomponente Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Einblasart

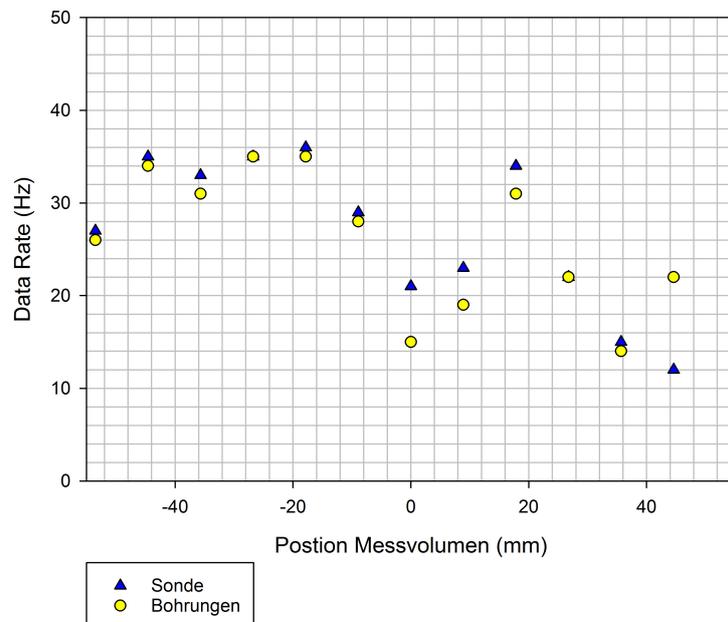


Abbildung 3.11: Verlauf der Drall-Datenrate bei Variation der Einblasart

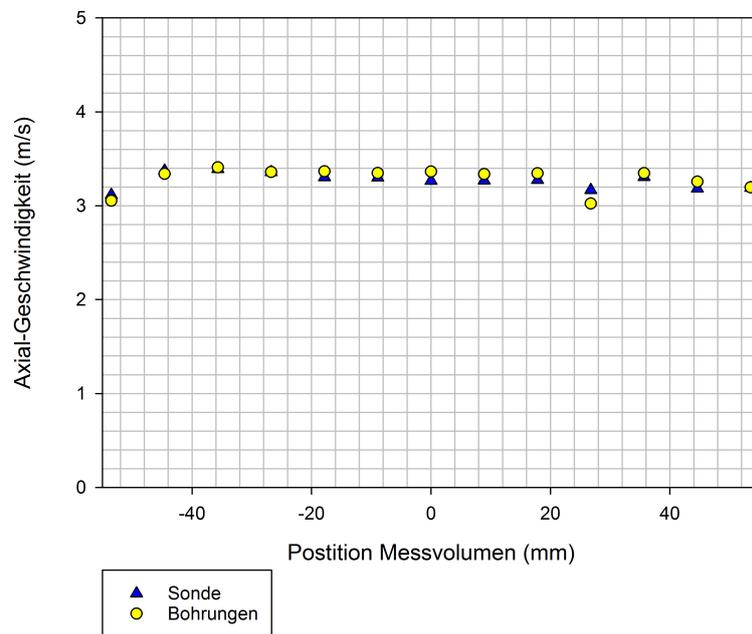


Abbildung 3.12: Verlauf der axialen Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Einblasart

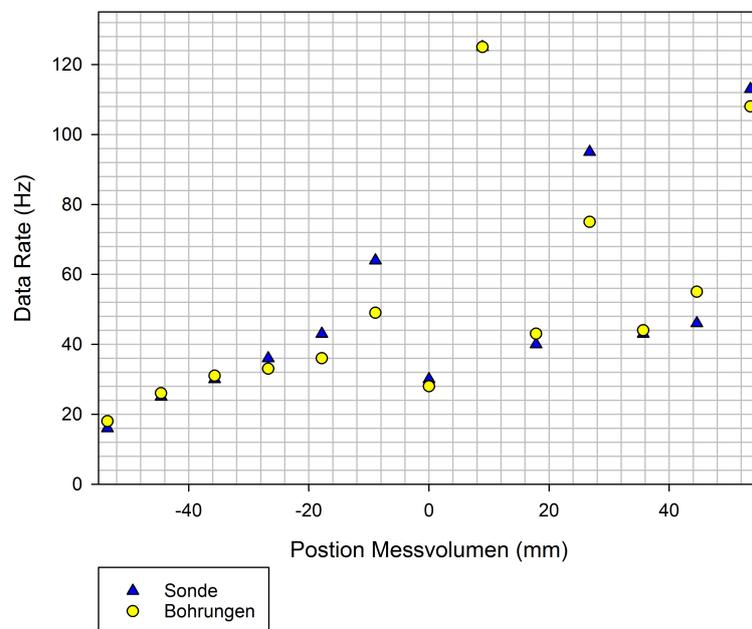


Abbildung 3.13: Verlauf der Axial-Datenrate bei Variation der Einblasart

Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Einblasart

Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die verglichenen Einblasarten zu keinen großen Unterschieden in den Messergebnissen führen. Viel mehr zeigt sich, dass die Einblasung mittels Sonde nicht nötig ist, da die Einblasung mittels der Bohrungen zu ähnlichen Ergebnissen führt. Der Vorteil der Bohrungen ist, dass diese im Gegensatz zur Sonde theoretisch weniger Einfluss auf die Strömung haben.

Zuvor wurden weitere Einblasarten erprobt, die sich aber alle als nicht ideal herausstellten. Zum Beispiel hat die Einblasstelle 2, die näher am Messfenster liegt, schlechtere Ergebnisse geliefert und wurde daher nicht weiter verwendet. In vorgehenden Versuchen hat sich auch gezeigt, dass durch das Aufsteigen der Luftblasen die zwei oberen Bohrungen (3 und 4) keine bis wenig Blasen erzeugen, die das Kontrollvolumen passieren. Daher wurden diese nicht genauer untersucht. Weiters wurden die Bohrungen an der Unterseite (1 und 2) von 6 auf 1 *mm* durch Einsätze verkleinert, weil sich zeigte, dass kleine Bohrungen wesentlich bessere Ergebnisse als große liefern, da sie kleinere Luftblasen erzeugen, die sich besser verteilen. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen wurden genutzt, um die in Abschnitt 3.2.2 erklärten finalen Einblasarten zu entwickeln.

3.3 Untersuchung des Einflusses der Seedings auf Messergebnisse

Um die Eigenschaften der verschiedenen Seeding-Arten zu untersuchen, wird ein Vergleich der Messdaten, die mittels Verwendung verschiedener Seedings erzeugt werden, durchgeführt. Hierzu werden im gleichen Betriebspunkt und unter Verwendung der gleichen Messgeometrie Messungen mit den jeweiligen Seedings durchgeführt. Bei der Verwendung von Seedings in Pulverform wird jeweils die gleiche Menge von 7 ppm dem System zugegeben. Die Menge wird so gewählt, weil dieser Gehalt in einer Veröffentlichung [7] angegeben wird, um gute Ergebnisse zu erhalten und es kein Vorwissen zur idealen Konzentration von Seedings gibt. Bei der Messung mit Luftblasen wird mittels der Sonde eingeblasen. Die eingeblasene Luftmenge beträgt 0,35 l/s, was einem Volumenanteil von 0,04 Prozent entspricht.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (<i>V</i>)	430	550
Burst Treshold (<i>mV</i>)	30	30
Band Pass Filter (<i>MHz</i>)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (<i>MHz</i>)	38.5	39.5
Messzeit (<i>s</i>)	120	
Messfenstergeometrie	2 mit 7,8 mm Dicke	

Tabelle 3.4: LDA-Einstellungen für Vergleichsmessung der Seedings

3.3.1 Messergebnisse bei Variation der Seedings

Um die Seedings effektiv zu vergleichen, werden die Strömungsgeschwindigkeiten und die Datenraten der tangentialen und axialen Komponente der einzelnen Messungen in jeweils einem Diagrammen dargestellt. Es ist zu beachten, dass der Wert 0 Hz bei den Ergebnissen der Datenrate nicht 0 Hz, sondern einen Wert zwischen 1 und 0 bedeutet.

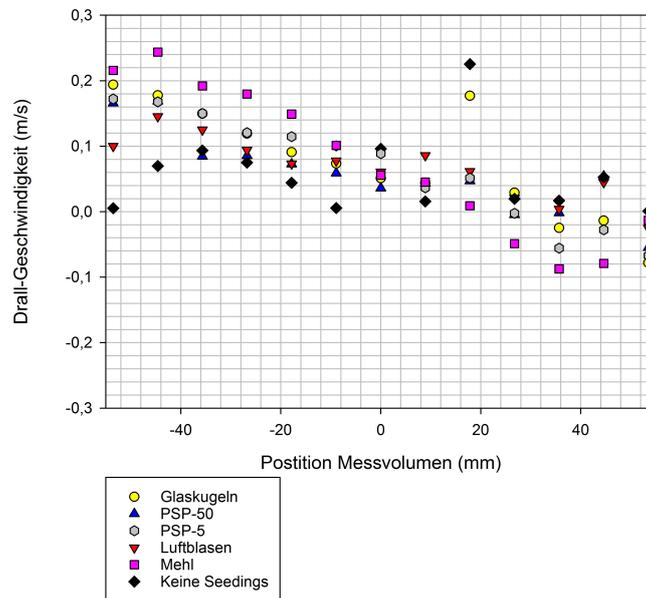


Abbildung 3.14: Verlauf der Drallkomponente der Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Seedings

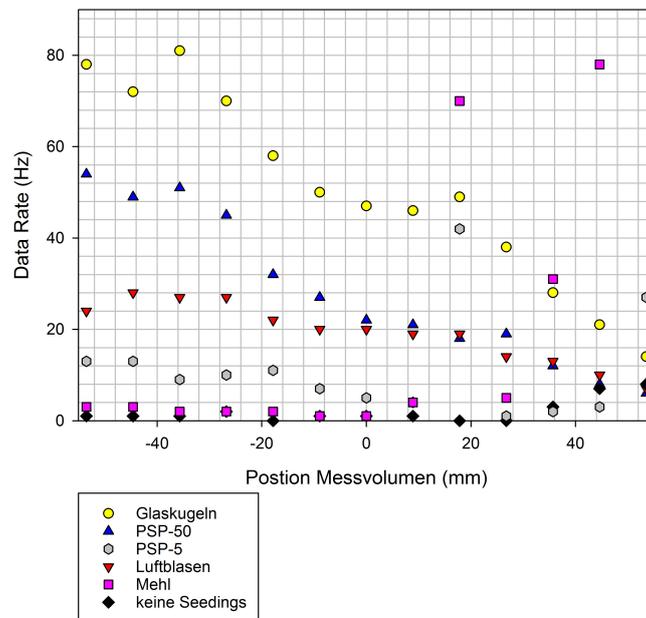


Abbildung 3.15: Verlauf der Drall-Datenrate bei Variation der Seedings

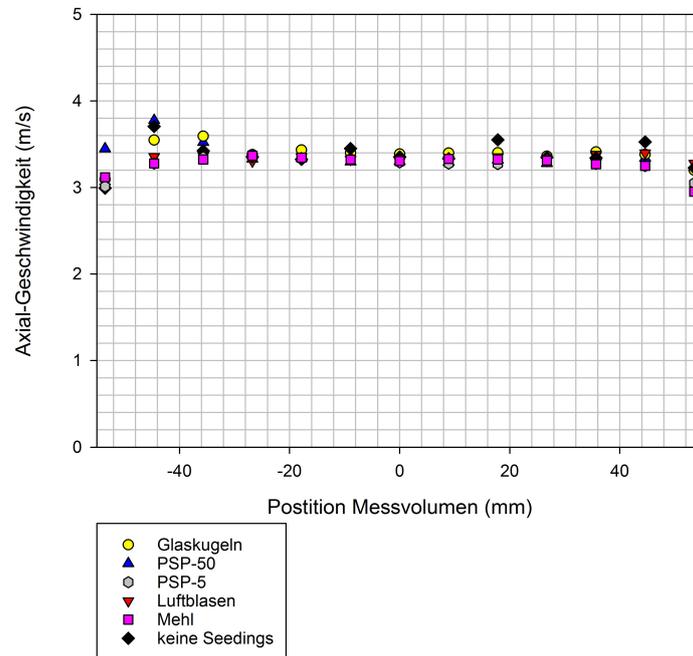


Abbildung 3.16: Verlauf der axialen Strömungsgeschwindigkeit bei Variation der Seedings

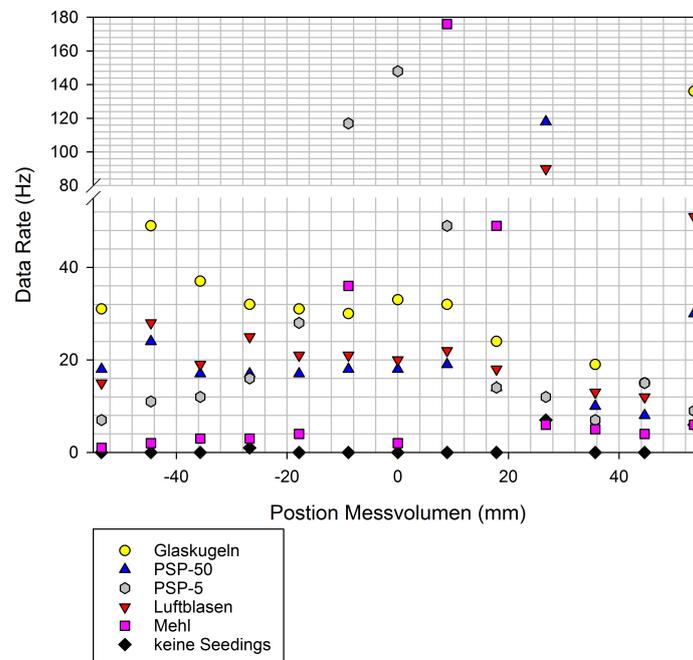


Abbildung 3.17: Verlauf der Axial-Datenrate bei Variation der Seedings

3.3.2 Interpretation der Messergebnisse bei Variation der Seedings

Die höchste Datenrate liefern Glaskugeln gefolgt von PSP-50 Seedings. Die höhere Datenrate der Glaskugeln kann daher rühren, dass aufgrund ihrer geringeren Größe mehr Seedings im System sind, da ppm eine massenbezogene Größe ist. Dagegen spricht, dass die PSP-5 Seedings weit schlechtere Ergebnisse bei ähnlicher Größe liefern. Da der Brechungsindex nahezu gleich zwischen den Seedings ist, kann die höhere Datenrate an der glatten Oberfläche der Glaskugeln liegen. Die Verwendung von Mehl führt zu einer kleinen Erhöhung der Datenrate, bringt aber mehrere Probleme mit sich. Mehl kann sich an dem Messfenster anlegen und so die Messergebnisse bei nachfolgenden Messungen verschlechtern und durch die geringe Dichte kann es der Strömung nicht so gut folgen. Es wird daher abgeraten in kleinen geschlossenen Systemen Mehl als Seeding zu verwenden.

Von der Kostenseite her betrachtet sind Luftblasen der billigste Weg, um die Datenrate von Messungen zu erhöhen. Sie haben allerdings diverse Nachteile, die schon im Abschnitt 2.7 behandelt wurden. Bei den Standard-Seedings sind Glaskugeln PSP Seedings vorzuziehen, da sie um den Faktor 2 kostengünstiger sind.

Während der Versuche zeigte sich, dass es für die Messung der Axial-Komponente nicht nötig ist, Seedings zu verwenden, da auch ohne Seedings nahezu die gleichen Messwerte gemessen wurden. Dies ist aber bei der stark turbulenten Drall-Komponente der Strömung nicht praktikabel, da in einer angemessenen Messzeit zu wenig Werte detektiert werden, um den richtigen Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit zu erhalten.

3.4 Untersuchung der möglichen Verwendung von Seedings in großen Kreisläufen

Im Hydrodynamischen Labor des Instituts arbeiten viele Prüfstände in sehr großen Kreisläufen (bis zu $30m^3$), es ist daher nicht wirtschaftlich in diese eine ausreichend große Menge Seedings einzubringen. Darum werden mehrere Versuche durchgeführt mit dem Ziel, Seedings einzubringen, dass sie im ganzen Querschnitt des Rohres verteilt werden und sofort nach der Einblasung das Kontrollvolumen passieren. Auf diese Art ist es möglich, mittels einer geringen Menge Seedings in großen Systemen Strömungsgeschwindigkeitsmessungen mit hohen Datenraten durchzuführen. Um das zu erreichen, wird in einem Mischbehälter ein Seeding-Wasser-Gemisch vorbereitet und dann laut der in Abschnitt 2.8 beschriebenen Methode mittels der Sonde eingebracht. Der Versuch ist erfolgreich, wenn sich eine Wolke an Seedings unmittelbar nach dem Einbringen in Form einer erhöhten Anzahl Counts detektieren lässt. Das eingebrachte Seeding-Wasser-Gemisch hat eine Konzentration von 12000 ppm. Wenn man eine gleichmäßige Vermischung mit der Strömung zur Pumpe annimmt, hat die Strömung während das Seeding-Wasser-Gemisch eingeblasen wird eine Konzentration von zirka 1 ppm an der Messstelle.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (V)	430	550
Burst Treshold (mV)	30	30
Band Pass Filter (MHz)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (MHz)	38.5	39.5
Messzeit (s)	60	
Messfenstergeometrie	2 mit 7,8 mm Dicke	
Seeding	Glaskugeln	
Einblasart	Sonde	

Tabelle 3.5: LDA-Einstellungen für Seeding-Einblasversuche

3.4.1 Messergebnisse bei Seeding einblasung

In den folgenden Diagrammen sind die Geschwindigkeiten, die sich aus der Frequenz der einzelnen Counts zum Zeitpunkt ihrer Detektion ergeben, aufgetragen. Als Count wird jedes zulässige Messsignal, das durch Passieren des Messvolumen erzeugt wird, bezeichnet. Die Ergebnisse mit und ohne Seeding-Einblasung werden an derselben Stelle verglichen. Es wird ein Messpunkt nach dem anderen von den negativen Koordinaten ausgehend gemessen. Durch diese Vorgehensweise steigt der Seeding-Gehalt des Systems laufend an. Das Einblasen der Seedings wurde zirka 5 Sekunden nach Start der Messung gestartet. Die Einblasdauer bis der Großteil der Seedings den Speicherbehälter verlassen hat beträgt nach Beobachtung 5 Sekunden. In der Legende der Diagramme ist die Anzahl der Counts die während der Messzeit detektiert, werden aufgetragen. In den folgenden Diagrammen wird eine Auswahl der Messergebnisse des Versuchs präsentiert.

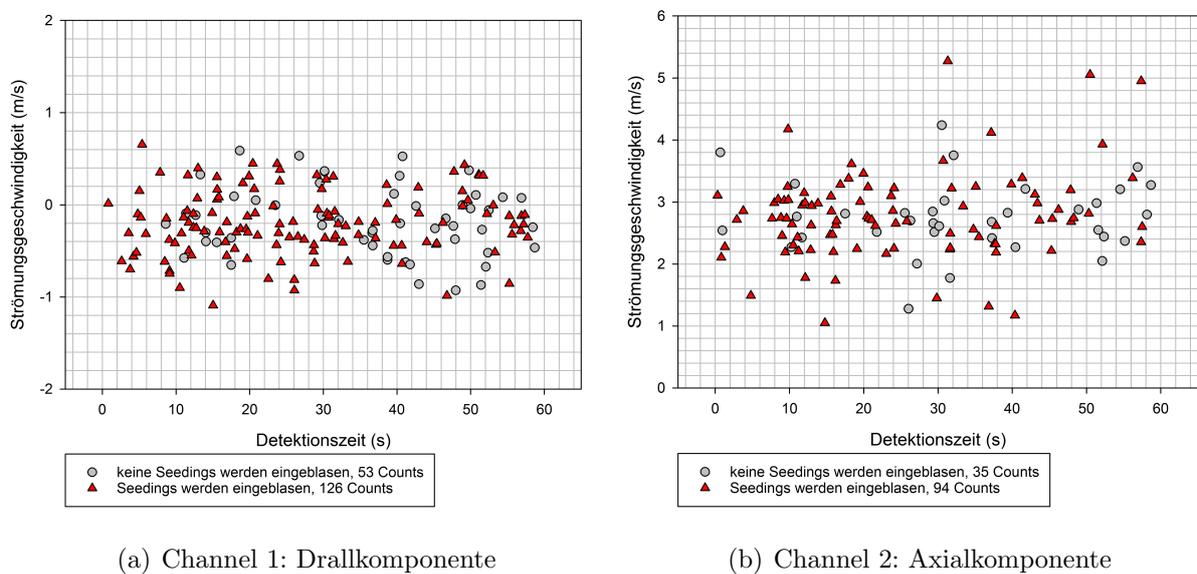
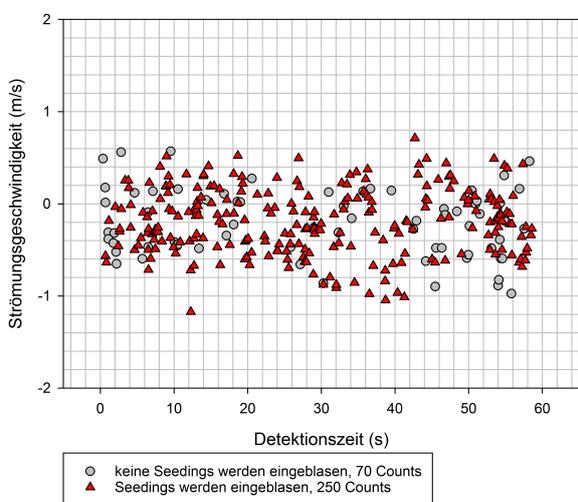
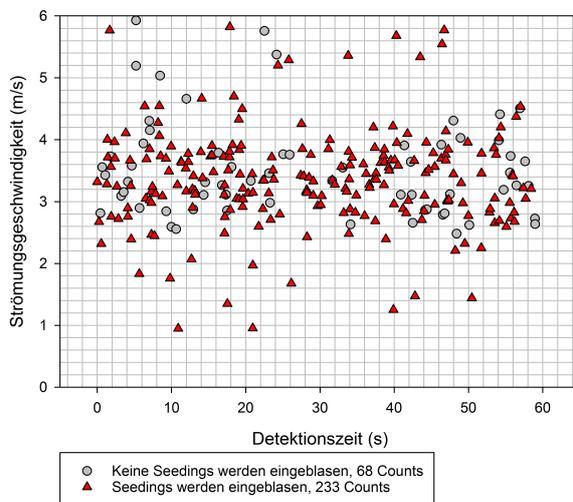


Abbildung 3.18: Counts der Strömungsgeschwindigkeit an der Position $-53,52 \text{ mm}$

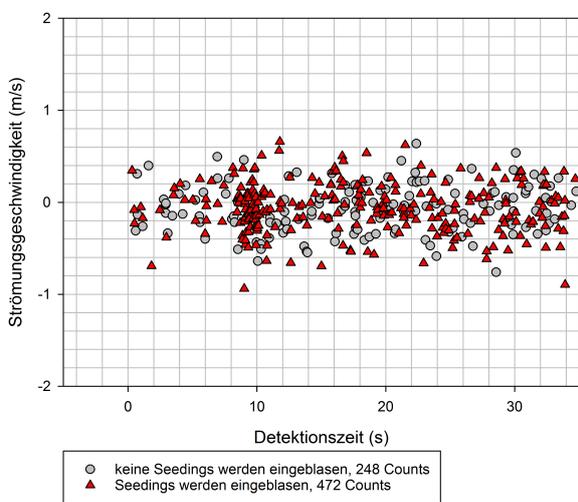


(a) Channel 1: Drallkomponente

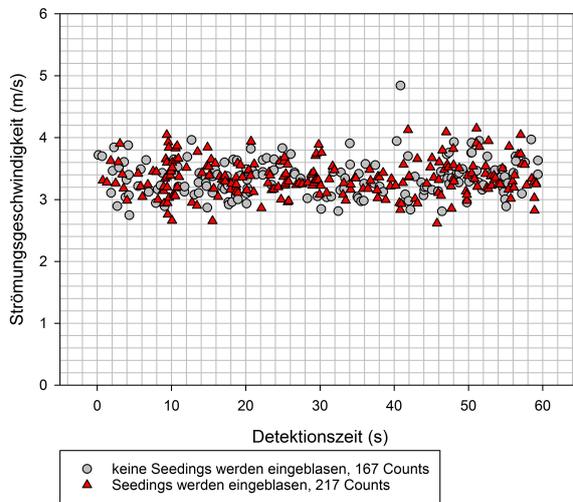


(b) Channel 2: Axialkomponente

Abbildung 3.19: Counts der Strömungsgeschwindigkeit an der Position $-44,60 \text{ mm}$



(a) Channel 1: Drallkomponente



(b) Channel 2: Axialkomponente

Abbildung 3.20: Counts der Strömungsgeschwindigkeit an der Position $-8,92 \text{ mm}$

3.4.2 Interpretation der Messergebnisse bei Seeding einblasung

Es ist zu beobachten, dass das Einblasen der Seedings sofort zu einer Erhöhung der detektierten Messsignale führt. Im Zeitraum der ersten 10 Sekunden ist eine Wolke, die eindeutig

durch das Einblasen des Seeding-Wasser-Gemisches entsteht, zu sehen. Mit dieser Art der Seeding-Einblasung sollte es daher möglich sein, in offenen Kreisläufen bei Verwendung einer geringen Menge an Seedings die Anzahl der Counts deutlich zu erhöhen.

Wie vorher beschrieben, nimmt mit jeder Einblasung von Seedings der Gehalt dieser im System zu. Es ist theoretisch möglich, dass Seedings, nachdem sie eingeblasen wurden nach etwa 10 Sekunden das Messvolumen wieder passieren, da sie nach dieser Zeit das ganze System durchströmt haben können. Aus diesem Grund eignet sich der Prüfstand in dieser Bauweise nur bedingt für diese Versuche und es lässt sich daher keine zweifelsfreie Aussage über die Effektivität dieses Verfahrens tätigen.

3.5 Berechnung des Turbulenzgrades der Strömung

Da sich mit den Messfenstergeometrien 2 und 3 die Strahlenpaare in einer Stelle überschneiden, ist es nun möglich den Turbulenzgrad zu berechnen. Mit den Messdaten und den im Abschnitt 1.6.2 beschriebenen Formeln kann der Verlauf des Turbulenzgrades über den Querschnitt berechnet werden. In Abbildung 3.21 sind die Ergebnisse für den Standard-Betriebspunkt exemplarisch abgebildet. Der Turbulenzgrad ist eine wichtige Randbedingung für CFD-Modelle und kann nun für jeden Betriebspunkt der Radialpumpe bestimmt werden. Diese Ergebnisse können in Zukunft für die Validierung von CFD-Berechnungen am Institut für Thermodynamik und Energietechnik genutzt werden.

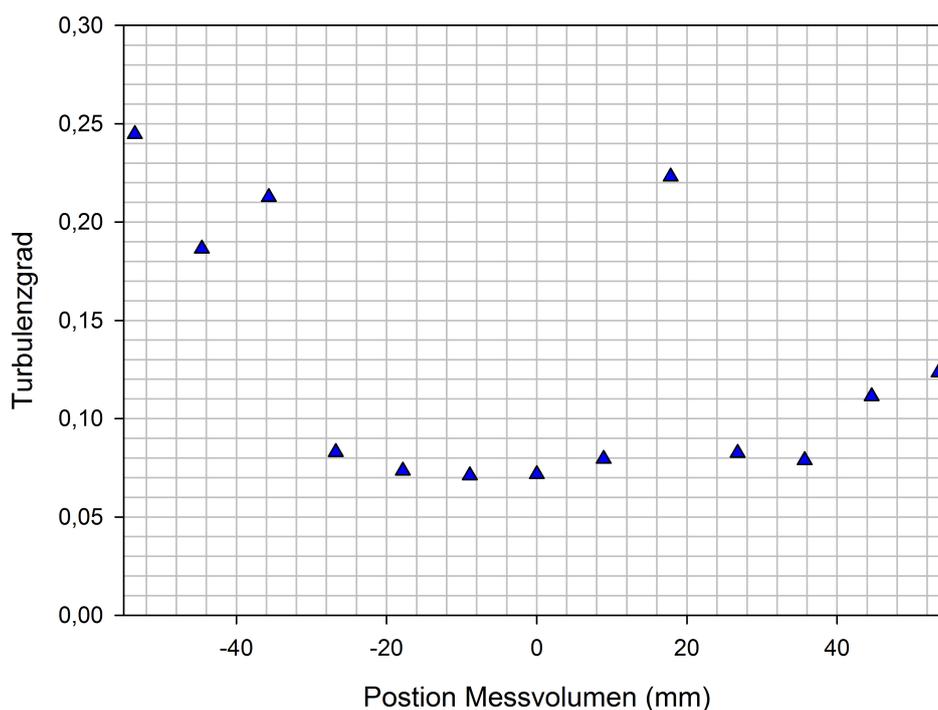


Abbildung 3.21: Verlauf des Turbulenzgrades der gemessenen Strömung

3.6 Untersuchung von weiteren Einflüssen auf die Messergebnisse

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf das Messsignal zu untersuchen, für die keine Erfahrungswerte bestehen, werden mehrere Experimente durchgeführt und die Ergebnisse in diesem Abschnitt präsentiert und diskutiert.

3.6.1 Variation der LDA-Einstellung

Das verwendete LDA-System wurde vor den Versuchen von einem Techniker der Herstellerfirma kalibriert und eingestellt. Diese Standardeinstellungen erwiesen sich als ausreichend gut für fast alle durchgeführten Messungen. Bei der Verwendung der PSP-5 Seedings wurde eine niedrige Datenrate der Drallkomponente beobachtet. Da vermutet wurde, dass dies mit der geringen Größe der Partikel und den daraus folgenden kleinen Messsignalen zusammenhängt, wurde die PMT Voltage und folglich der Burst Treshold erhöht. Alle anderen Einstellungen wurden beibehalten. In der Abbildung 3.23 ist der Verlauf der Datenrate der Drallkomponente mit den Standard- und den angepassten Einstellungen dargestellt.

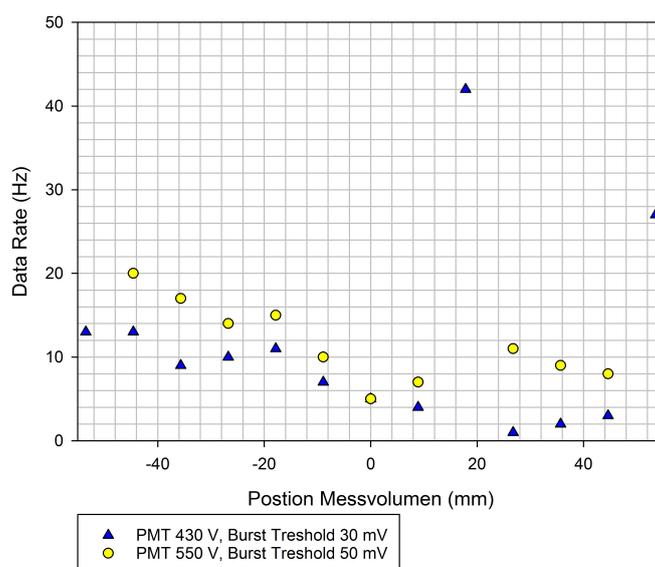


Abbildung 3.22: Verlauf Datenrate der Drallkomponente

Es zeigt sich, dass die Datenrate deutlich zugenommen hat und dass sich diese Vermutung als richtig herausgestellt hat. Die Datenrate ist, im Vergleich zu anderen Seedings, immer noch geringer.

Der Einfluss der PMT Voltage auf die Datenrate wurde auch im Allgemeinen untersucht. Im Betriebshandbuch des LDA-Systems wird angegeben, dass eine Einstellung von 350 bis 600 V PMT Voltage bei den meisten Messungen gute Ergebnisse erzielen wird. Um dies für Anwendungen mit Wasser und Messfenster zu verifizieren, wurde ein Versuch durchgeführt. Die PMT Voltage wurde an der gleichen Stelle der Strömung in 50er-Schritten erhöht, die empfohlenen Grenzen aus dem Betriebshandbuch wurden dabei unter- und überschritten. Die dabei gemessenen Werte der Datenrate wurden anschließend verglichen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 3.23 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Datenrate von einem sehr niedrigen Wert aus linear zunimmt und nach Überschreiten des oberen Grenzwertes wieder abnimmt. Dies wird im Betriebshandbuch so beschrieben und diese Grenzen sollten daher bei zukünftigen Messungen eingehalten werden.

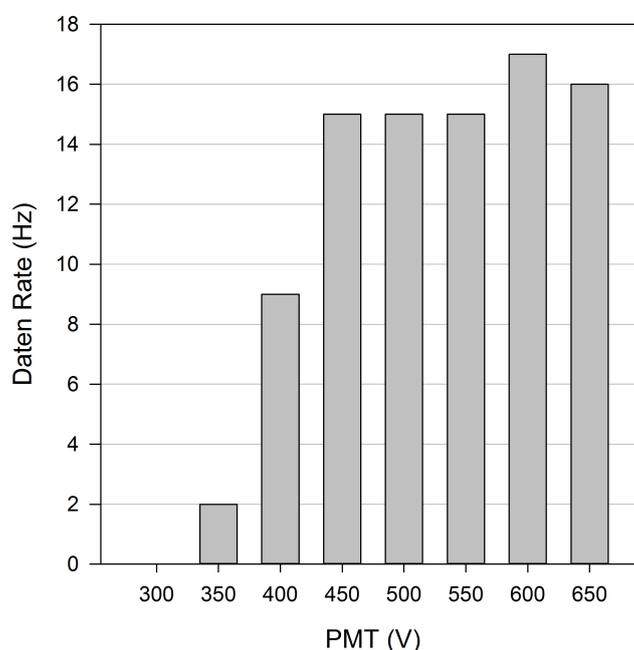


Abbildung 3.23: Verlauf Datenrate der Axialkomponente bei Variation der PMT Voltage

3.6.2 Einfluss der Größe der transparenten Messfläche

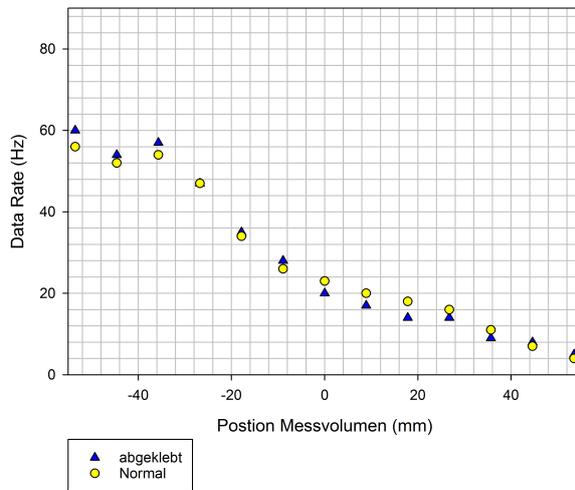
Um zu untersuchen, ob die Transparenz der gesamten Messfenstergeometrie Einfluss auf die Datenrate der Messungen hat, wird die Vorderseite der Messfenstergeometrie 2 bis auf die kreuzförmige Nut abgedeckt und die Messergebnisse werden mit den normalen Ergebnissen verglichen. Ziel ist es auch zu untersuchen, ob es möglich ist, die kreuzförmige Nut von Messfenstergeometrie 2 in ein nicht transparentes Material zu fräsen und nur mit einer transparenten Platte abzudecken.

Messeinstellungen	Channel 1	Channel 2
PMT Voltage (V)	430	550
Burst Treshold (mV)	30	30
Band Pass Filter (MHz)	0.3-3	0.3-3
SNR	Medium	Medium
Downmix Freq. (MHz)	38.5	39.5
Messzeit (s)	60	
Messfenstergeometrie	2 mit 7,8 mm Dicke	
Seeding	PSP-50 7 ppm	

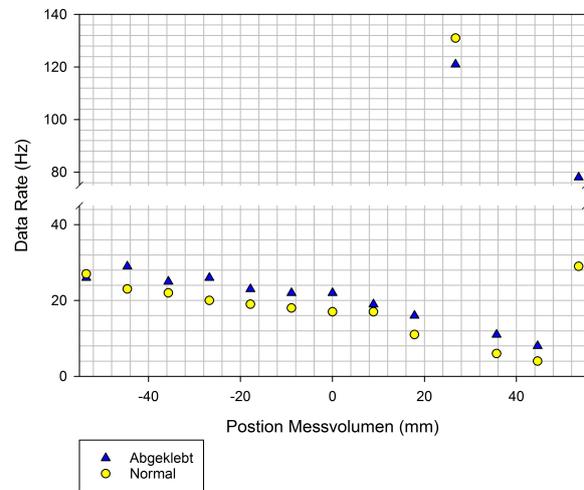
Tabelle 3.6: LDA-Einstellungen für Untersuchung des Einflusses der Größe der transparenten Messfläche

Messergebnisse

Um den Einfluss der Größe der transparenten Fläche zu untersuchen, werden die Datenraten der tangentialen und axialen Komponente mit und ohne Abdeckung verglichen und jeweils in einem Diagramm dargestellt.



(a) Channel 1: Drallkomponente



(b) Channel 2: Axialkomponente

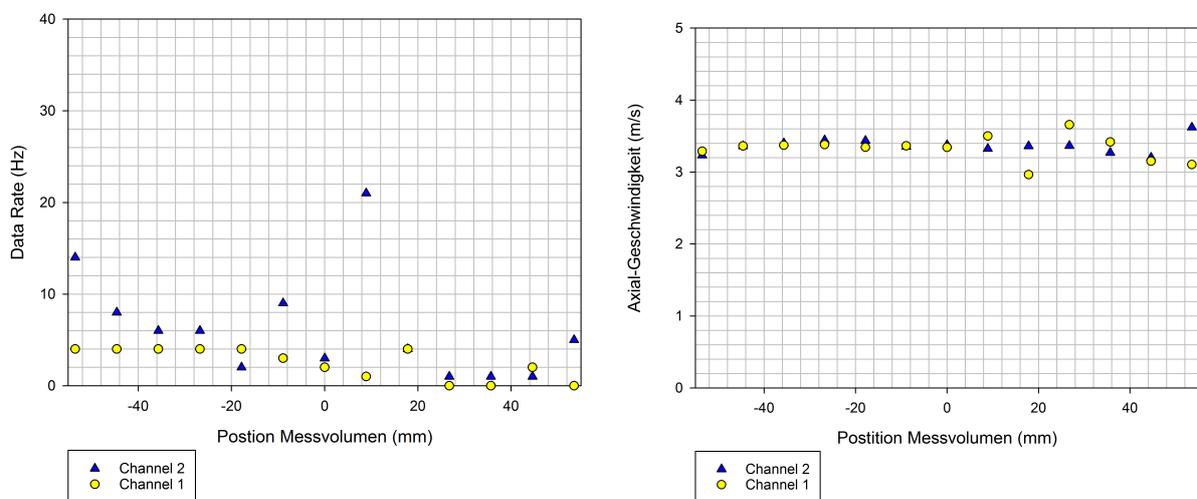
Abbildung 3.24: Verlauf der Datenrate bei Untersuchung des Einflusses der Größe der transparenten Messfläche

Interpretation

Es ist zu sehen, dass sich die Datenrate nicht signifikant geändert hat. Daher sollte es möglich sein, diese Art von Messfenster auch in nicht transparenten Rohren zu verwenden. Dies würde eine Erleichterung für zukünftige Messungen bedeuten, da keine Messfenstergeometrien gefertigt werden müssen, sondern nur die Platte transparent sein muss. Der Nachteil dieser Bauweise ist, dass es nicht möglich ist, die Vorgänge innerhalb des Rohres optisch zu beobachten.

3.6.3 Einfluss der Wellenlänge des Lasers auf Messergebnisse

Um zu untersuchen, ob die zwei LDA-Komponenten des verwendeten Messsystems unterschiedliche Messergebnisse liefern, wird der Laser um 90° gedreht. Somit wird eine Geschwindigkeitskomponente von zwei verschiedenen LDA-Komponenten gemessen. Die Einstellungen sind für beide Komponenten gleich um die identen Rahmenbedingungen zu liefern. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 3.25 dargestellt.



(a) Verlauf axialen Datenrate

(b) Verlauf Axialkomponente

Abbildung 3.25: Vergleich der Axial Datenrate und Axial Komponente bei Vertauschen der LDA-Komponente für die Messung

Es zeigt sich das Channel 2 eine bessere Datenrate hat als Channel 1. Trotz identer Einstellungen und gleicher Strömung. Die Ursache hierfür können die verschiedenen Wellenlängen der LDA-Komponenten Laser sein. Dies zu wissen, ist vorteilhaft für zukünftige Messungen, denn nun kann die LDA-Komponente mit der besseren Datenrate auf die Strömungskomponente, die einen höhere Turbulenz aufweist, gerichtet werden.

Kapitel 4

Fehlerbetrachtung der LDA-Messungen

An dieser Stelle kommt es zu einer Untersuchung der möglichen Fehler, zu denen es bei den LDA-Messungen in dieser Diplomarbeit gekommen sein könnte.

Folgende systematische Fehler könnten Einfluss auf die Messergebnisse haben:

- Ungenaue Ausrichtung der Laserstrahlen des LDA-Systems: Durch ungenaue Ausrichtung der Laserstrahlen werden nicht exakt die Drall- und Axialkomponenten der Strömung bezogen auf das Rohr gemessen.
- Seedings folgen der Strömung nicht exakt: Da sich Seedings nicht genau wie das zu messende Fluid verhalten, kann es, abhängig von der Qualität der verwendeten Seedings, zu einer Verfälschungen der Messergebnisse kommen.
- Reflexionen des Laserstrahls: Reflexionen können zu falschen Messwerten führen. Werden die Reflexionen nicht als solche erkannt, verfälschen die Messwerte, die durch diese Reflexion entstehen, das Messergebnis.

Der genaue Einfluss auf die Messergebnisse in Prozent kann nicht angegeben werden.

Der Einfluss der Messfehler auf die Mittelwert-Bildung kann durch Betrachtung des Histogrammes der Messwerte bewertet werden. Die angestrebte Verteilung der Messwerte

ist in Abbildung 4.1 exemplarisch dargestellt. Eine geringe Standardabweichung der Messergebnisse vom Mittelwert ist ein Richtwert für die Qualität des Messergebnisses. Umso schmaler das $\pm 2\sigma$ Streuintervall ist, desto genauer ist das Ergebnis. Hat das Histogramm der Messwerte eine solche Gauß-Verteilung, sollten die Messwerte korrekt sein und keine Reflexionen oder sonstigen Einflüsse das Messergebnis verfälschen.

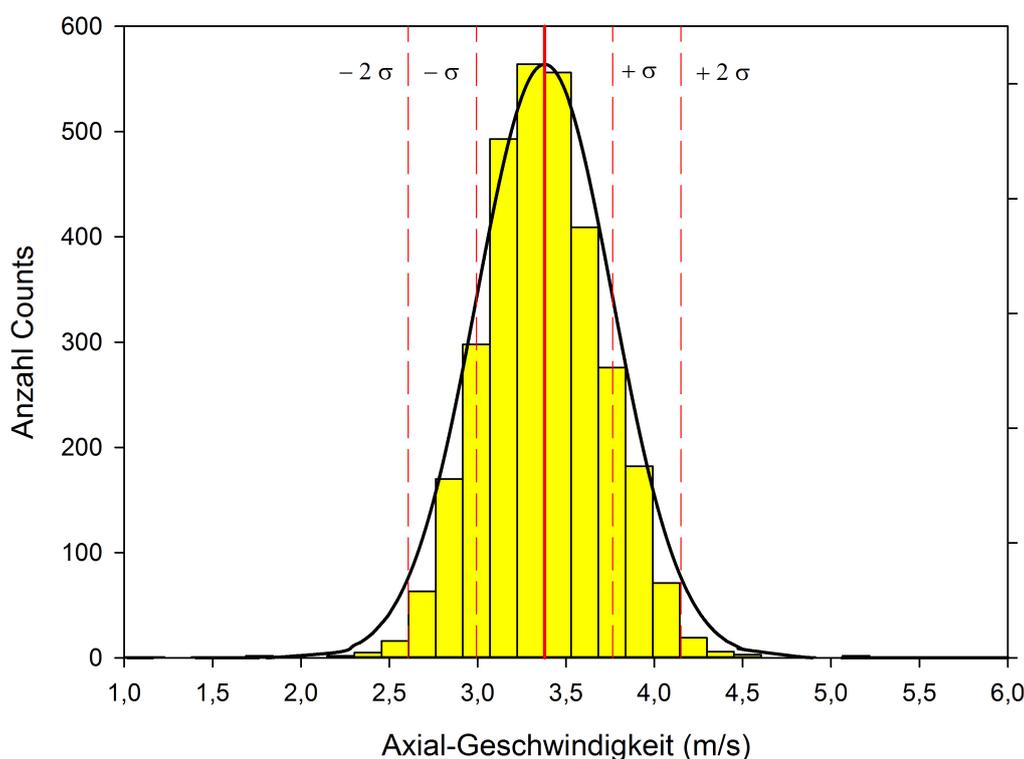


Abbildung 4.1: Angestrebte Verteilung der Messwerte bei LDA-Messungen

Die Anzahl der nötigen Messwerte um den richtigen Mittelwert zu erhalten hängt von der Art der gemessenen Strömung ab. Bei stark schwankenden Strömungen mit Rückströmung macht es wenig Sinn, einen Mittelwert zu bilden. Bei den Messungen der Strömung während dieser Diplomarbeit wurde beobachtet, dass die Axialkomponente der Strömung weniger Messwerte als die Drallkomponente benötigt, um einen stabilen Mittelwert zu bilden. Dies liegt daran, dass der Wert der Strömungsgeschwindigkeit der Axialkomponente weniger schwankt als der der Drallkomponente.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden Messungen durchgeführt, um Einflüsse auf LDA-Messungen zu untersuchen und um festzustellen, ob sich Seedings für Messungen in großen Kreisläufen eignen. Dafür wurde unter Verwendung mehrerer Messfenstergeometrien, Seedings und Einblasarten dieser die Geschwindigkeit einer gleichbleibenden im Mittel stationären turbulenten Rohrströmung gemessen. Die Ergebnisse der Messungen wurden miteinander verglichen und anschließend bewertet, um die besten Bedingungen und Einstellungen für zukünftige Messungen zu finden.

Der Vergleich dieser Messdaten zeigte, dass die Beschaffenheit der Oberfläche und die Dicke der Messfenstergeometrie einen entscheidenden Einfluss auf die Datenrate der Messung haben. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Verwendung verschiedener Seedings zu großen Differenzen zwischen den Datenraten der jeweiligen Messungen führt. Die Eignung von Seedings für Messungen in großen Kreisläufen wurde im Zuge dieser Diplomarbeit nachgewiesen. Mit dem gewonnenen Wissen, das im Zuge dieser Diplomarbeit erworben wurde, sollten zukünftige LDA-Messungen bessere Messergebnisse liefern. Es zeigte sich, dass bei diesem Versuchsaufbau Glaskugeln in Kombination mit Messfenstergeometrie 2 (Plattendicke $7,8\text{mm}$) die besten Messergebnisse erzielen.

Ausgehend von dieser Arbeit können weitere Untersuchungen mittels LDA durchgeführt und der Versuchsaufbau verbessert werden.

Der Geschwindigkeitsverlauf an der Druckseite der Pumpe könnte gemessen und das Verhalten der Seedings nach dem Passieren des Laufrades untersucht werden. Die Ursache der erhöhten Datenraten in bestimmten Bereichen sollte bestimmt werden sowie, ob sich härtere transparente Werkstoffe wie z.B. Borosilikatglas als Material für Messfenstergeometrien eignen.

Während den Versuchen wurden mehrere Möglichkeiten identifiziert den Versuchsaufbau zu verbessern. Die Messfenstergeometrien könnten überarbeitet werden, indem sie mit einer Zentrier-Hilfe und mit einer Markierung der Mitte versehen werden, um so den Einbau und die Ausrichtung des Lasers zu vereinfachen. Eine automatische Temperaturregelung des Systems wäre einfach zu realisieren und praktikabel, da diese zur Zeit manuell geregelt wird.

Literaturverzeichnis

- [1] *VOGEL - Spiralgehäusepumpen*. Pumpenfabrik ERNST VOGEL GmbH.
- [2] *VDI-Wärmeatlas-Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 10. Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [3] *Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA)/Laser Doppler Velocimeter(LDV)*. Manual TSI incorporated, 2014.
- [4] C. Bauer. *Hydraulische Maschinen und Anlagen I und II*. Vorlesungsskriptum TU Wien 302.677, 2014.
- [5] B.Ruck. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. AT-Fachverlag GmbH Stuttgart, 1990.
- [6] F. Durst, A. Melling, und J. H. Whitelaw. *Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie*. G.Braun Karlsruhe, 1987.
- [7] Y. Han, X. Zhang, S. Yang, N. Dharmasiri, und W. T. Honh. *Effects of concentration of partial seeding and data sample size in LDA measurements*. 36th IAHR World Congress, 2015.
- [8] J.F.Gülich. *Kreiselpumpen*. Springer Berlin, Heidelberg, 2010.
- [9] K. Käfer. *Hydraulische Meß-u. Versuchstechnik*. Foliensatz TU Wien 302.092, 2016.
- [10] H. C. Kuhlmann. *Strömungsmechanik*. Pearson Studium, 2007.
- [11] K. Langeheinecke. *Thermodynamik für Ingenieure*. Vieweg, 1993.
- [12] C. Lechner. *Cavitation Investigations on a Radial Pump in Turbine Mode*. 2015.

- [13] W. Nitsche und A. Brunn. *Strömungsmesstechnik, Band 2* ,. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2005.
- [14] H. E. Siekmann und P. U. Thamsen. *Strömungslehre für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [15] H. Sigloch. *Technische Fluidmechanik, 9.Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [16] E. Thornhill, D. Oldford, N. Bose, B. Veitch, und P. Liu. *Planing hull model tests for CFD validation*. 6th Canadian Marine Hydromechanics and Structures Conference, 2001.

Anhang A

Anhang

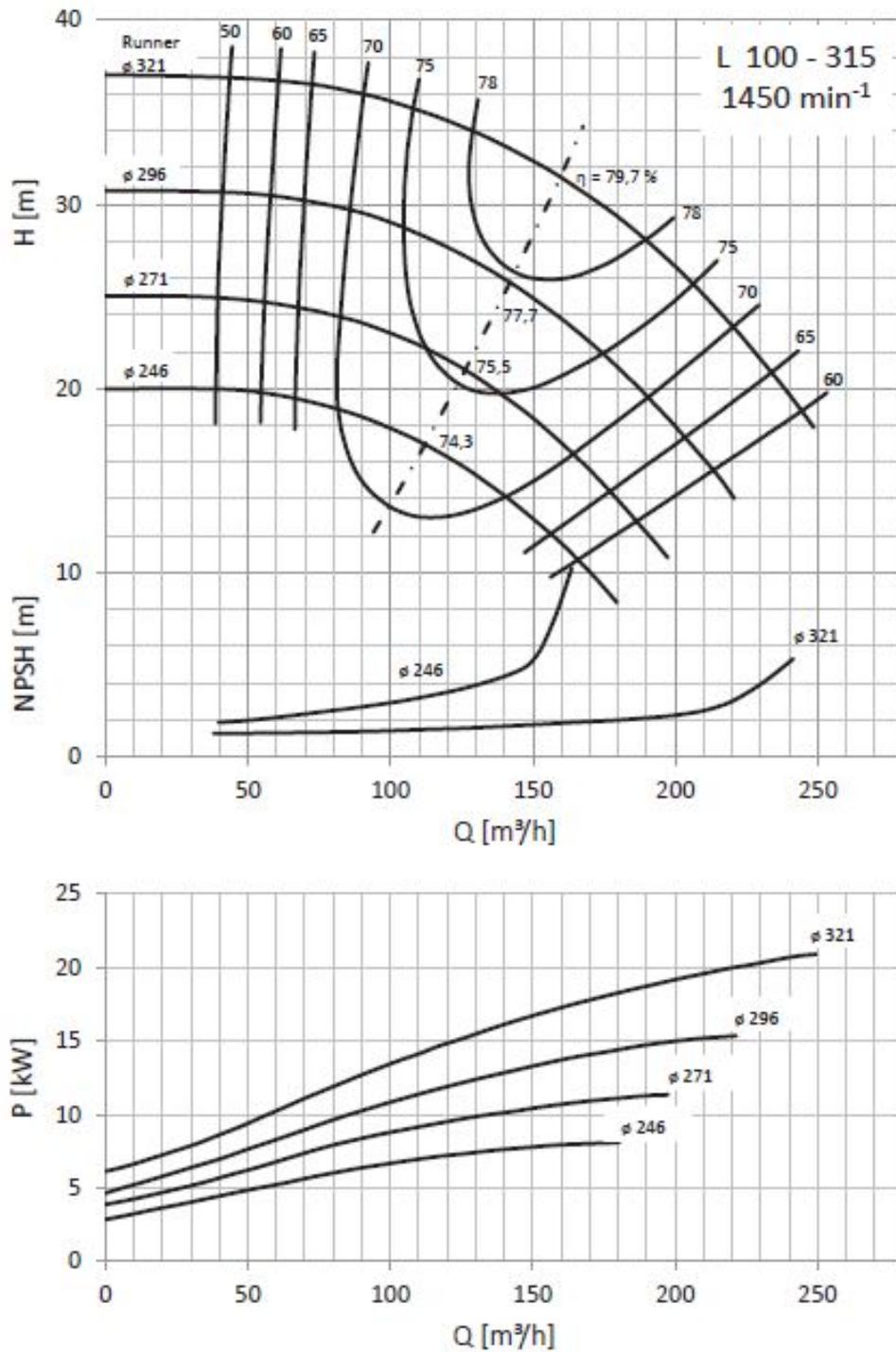


Abbildung A.1: Kennlinien der Radialpumpe [1]

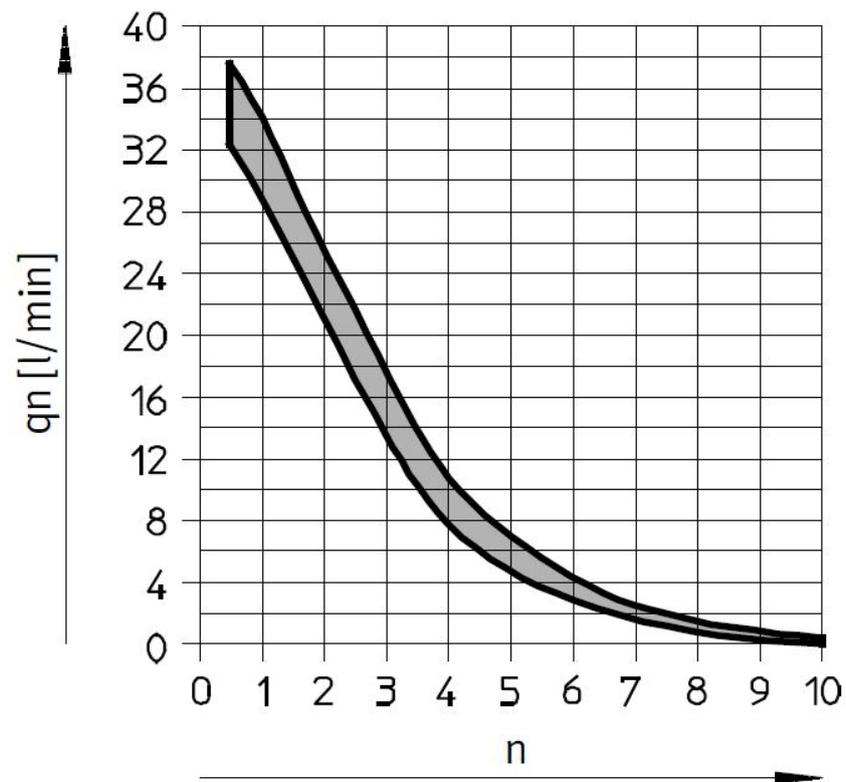


Abbildung A.2: Drosselventil-Kennlinie; 2 auf 1 bar Absolutdruck



Abbildung A.3: Darstellung des Drosselventils

	PSP Polyamide seeding particles	HGS Hollow glass spheres
Mean particle size (μm)	5, 20, 50	10
Size distribution	1 - 10 μm 5 - 35 μm 30 - 70 μm	2 - 20 μm
Particle shape	non-spherical but round	spherical
Density (g/cm ³)	1.03	1.1
Melting point (°C)	175	740
Refractive index	1.5	1.52
Material	Polyamide 12	Borosilicate glass

Abbildung A.4: Datenblatt der verwendeten Seedings