

LDV-Profilsensortechnologie zur Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung in kleinen Axialspalten

LDV Profile Sensor Technology for Velocity Determination in Small Axial Gaps

C. Strauch¹, J. Peter¹, M. Dues², P. U. Thamsen¹

¹TU Berlin, FG Fluidsystemdynamik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Deutschland

²ILA R&D GmbH, Rudolf-Schulten-Straße 3, 52428 Jülich, Deutschland

Laser Doppler Velocimetry (LDV), LDV Profilsensor (LDV-PS), Herzpumpe, Spaltströmung
LDV Profile-Sensor (LDV-PS), Ventricular Assist Device, Gap Flow Topology

Zusammenfassung

Bei der Entwicklung von Herzunterstützungspumpen (VAD) hat sich die numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) als leistungsfähiges Werkzeug erwiesen, um Erkenntnisse über die Strömungstopologien in rotierenden Blutpumpen zu gewinnen. Informationen über Strömungstopologien und Scherspannungsverteilungen sind von enormer Bedeutung, da sowohl strömungsinduzierte Blutschädigung als auch die Aktivierung von Blutplättchen auf Scherraten zurückzuführen sind. Obwohl Methoden zur Verifizierung der numerischen Ergebnisse zur Verfügung stehen, sind experimentelle Validierung wünschenswert, da diese eine Verbesserung der aktuell verwendeten Blutschädigungsmodelle zulassen. Um eine experimentelle Validierung zu ermöglichen, müssen (i) die relevanten hydraulischen Charakteristika sowie die zu untersuchenden Strömungstopologien erhalten bleiben und (ii) eine berührungslose Messtechnik in der Lage sein, die in rotierenden Blutpumpen auftretenden Geschwindigkeitsverhältnisse darzustellen. In diesem Beitrag werden Lösungsvorschläge zu (i) referenziert und der Fokus auf (ii) gelegt, indem eine Methode zur Untersuchung von Strömungstopologien mit Hilfe der LDV-Profilsensor-Technologie vorgestellt wird. Dieser Beitrag dient als Machbarkeitsstudie und stellt eine Vorstufe zu tatsächlichen optischen Messungen in rotierenden Blutpumpen dar. Dazu werden ein Prüfstand mit erleichterter optischer Zugänglichkeit (im Vergleich zu Herzunterstützungspumpen) sowie die gewählten Betriebsbedingungen vorgestellt. Erhöhte Aufmerksamkeit wird der Auswertung der Messdaten durch die Wahl eines geeigneten Verfahrens gewidmet. Dazu werden gängige 2D-Histogramme zur LDV-Rohdatenauswertung mit der Methode der „Gaussian Kernel Density Estimation“ (Gaussian KDE) verglichen. Anschließend werden die vorverarbeiteten Rohdaten mit einem speziell entwickelten Algorithmus zur Validierung des Geschwindigkeitsprofils ausgewertet und die ermittelten Geschwindigkeiten diskutiert. Die hier vorgestellte Machbarkeitsstudie zeigt, dass die LDV-Profilsensor-Technologie in der Lage ist, Strömungstopologien innerhalb kleiner Spaltgeometrien, wie sie in Herzunterstützungspumpen auftreten, aufzulösen. Die LDV-Profilsensortechnologie ermöglicht die Strömungserfassung auch an schwer zugänglichen Stellen und unterstützt somit das ganzheitliche Verständnis der komplexen Strömungsvorgänge in rotierenden Maschinen kleiner Baugröße, welches insbesondere für die Entwicklung von blutschonenden Herzunterstützungspumpen benötigt wird.

Einleitung

Die Untersuchung von Strömungsprofilen zwischen rotierenden und stationären Scheiben ist seit Langem Teil der Forschung, da die Topologie der Strömung maßgeblich für den Reibungswiderstand und das Drehmoment der rotierenden Scheibe verantwortlich ist. In (Schultz-Grunow, 1935) aus dem Jahr 1935 sind die Ergebnisse der Experimente an einer Scheibe mit Außendurchmesser $D = 401.5 \text{ mm}$ (Radius $R = 200.75 \text{ mm}$) und einer Spaltbreite von $s = 4.0 \text{ mm}$ ($s/R = 0.0199$) dargestellt. Über die gemessenen Drehmomente werden durch Verwendung der Navier-Stokes-Gleichungen Rückschlüsse auf das zugrundeliegende Strömungsprofil zwischen stehender und bewegter Oberfläche gezogen. Zur besseren Berechenbarkeit der Differentialgleichungen sind Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen angewandt worden, wodurch das Ergebnis im Vergleich zur Realität verfälscht wird. 1960 weiteten Daily und Nece (Daily, 1960) die Experimente aus und untersuchten die Strömungstopologie mit einem modularen Versuchsaufbau zur Veränderung der Spaltbreite ($D = 498.5 \text{ mm}$, $s = 6.3 \text{ mm bis } 108.2 \text{ mm}$, $s/R = 0.0127 \text{ bis } 0.217$). Vier charakteristische Strömungs-Regime sind definiert worden (Regime I: Laminare Strömung und verbundene Grenzschichten, Regime II: Laminare Strömung und getrennte Grenzschichten, Regime III: Turbulente Strömung und verbundene Grenzschichten, Regime IV: Turbulente Strömung und getrennte Grenzschichten). Die Geschwindigkeiten wurden intrusiv mit einer 2-Loch-Kobrasonde vermessen.

Mit kleiner werdenden geometrischen Abmessungen der Scheibe und des Spaltes eignen sich intrusive Methoden nicht mehr zur Erfassung der Geschwindigkeiten, da das Messgerät einen zu großen Einfluss auf das Geschwindigkeitsprofil besitzt. Daher haben sich laser-optische Messmethoden wie Laser Doppler Velocimetry (LDV) und Particle Image Velocimetry (PIV) zur Untersuchung der Strömungstopologie durchgesetzt (z. B. (Lauder, 2009) (Haddadi, 2008)). Die LDV-Technologie stößt jedoch an ihre Grenzen, sobald die Länge des Messvolumens in gleicher Größenordnung wie der zu vermessende Spalt liegt. Das Geschwindigkeitsprofil mit dessen Geschwindigkeitsverteilung kann von einem Standard-LDV-System dann nicht aufgelöst werden.

In diesem Beitrag werden die Messergebnisse der neuartigen LDV-Profilsensor-Technologie vorgestellt, die eine hohe örtliche Auflösung ($10\mu\text{m}$) innerhalb des Messvolumens besitzt. Eine detaillierte Beschreibung des LDV-Profilsensors und seines Funktionsprinzips findet sich in (Czarkse, 2002). Zusammenfassend überschneiden sich die Messvolumina von zwei verschiedenen Wellenlängen ($\lambda = 532 \text{ nm}$ und $\lambda = 561 \text{ nm}$). Ein Messvolumen besitzt ein divergentes Streifenmuster, das andere ein konvergentes Streifenmuster. Das Verhältnis der beiden detektierten Dopplerfrequenzen wird zur Berechnung der Position der Partikel innerhalb des Messvolumens verwendet.

Am Beispiel eines Spaltes mit $s = 0.5 \text{ mm}$ wird die Möglichkeit der Vermessung der tangentialen Geschwindigkeitskomponente zwischen rotierender und stationärer Scheibe dargestellt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, das Messverfahren auf hydraulische Strömungsmaschinen (Kreispumpen) zu übertragen und Aussagen über die hydraulischen Verlustleistungen zu gewinnen. Die charakteristische Form des Spaltes zwischen Laufrad und Gehäuse einer Kreiselpumpe besitzt einen großen Einfluss auf die Verteilung hydraulischer Verluste, weshalb die Untersuchung der Strömungstopologien bereits Teil verschiedener Studien war (z. B. (Kosyna, 1992), (Florjancic, 1990), (Hamkins, 2000), (Lauer, 1997)).

Besonders in der Biomedizintechnik besteht Bedarf an weiteren Untersuchungen zu hydraulischen Verlusten. Herzunterstützungspumpen (VADs) kommen zum Einsatz, wenn das Herz eines Patienten keine ausreichende Pumpleistung erbringt, um den Körper eigenständig mit Nährstoffen zu versorgen. Bei rotierenden Blutpumpen werden die Geräte implantiert und arbeiten im Inneren des Körpers. Da der verfügbare Bauraum begrenzt ist, sind VADs sehr klein

auszuführen, was bei der Entwicklung der Pumpen zu besonderen technischen Herausforderungen führt. Die Verringerung und Vermeidung von strömungsinduzierter Blutschädigung sowie der fälschlichen Aktivierung von Blutplättchen ist von größter Bedeutung. Nach dem derzeitigen Stand der Technik sind die im Strömungsfeld vorhandenen Scherspannungen für die Schädigung der Blutbestandteile verantwortlich. Aufgrund der deutlich kleineren geometrischen Dimensionen von rotierenden Blutpumpen, im Vergleich zu industriell eingesetzten Strömungsmaschinen, verschiebt sich die Verteilung der hydraulischen Leistung und der hydraulischen Verluste sowie die Aufschlüsselung der hydraulischen Verluste selbst drastisch. Daher ist die Anwendung allgemeiner Konstruktionsrichtlinien für Turbomaschinen auf VADs nicht anwendbar. Folglich hat sich die numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) als das gebräuchlichste Werkzeug im Entwicklungsprozess von Blutpumpen erwiesen. Obwohl es verschiedene Methoden zur Verifizierung der numerischen Berechnungen gibt, stehen experimentelle Validierungen noch aus. Bislang wurden nur wenige Studien zur optischen Validierung von Strömungstopologien in rotierenden Blutpumpen durchgeführt (Schüle, 2016) (Schüle, 2017) (Thamsen, 2019). Dies ist auf die erschwerte optische Zugänglichkeit zurückzuführen, die durch die Designkonzepte von VADs verursacht wird, wie in Abbildung 1 dargestellt.

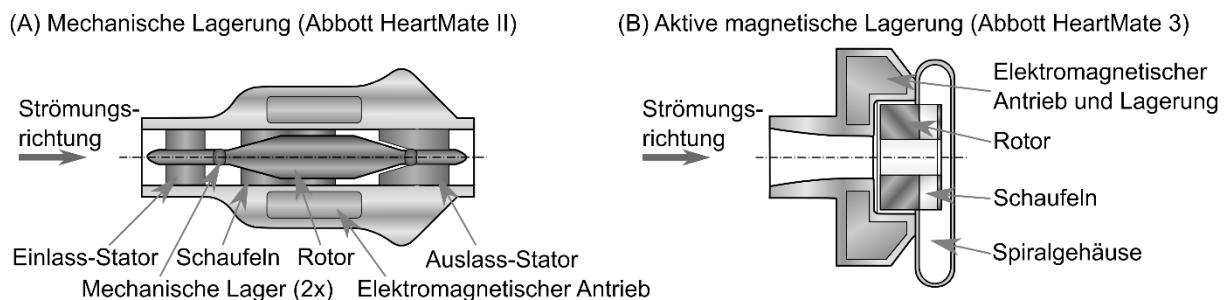


Abb. 1: Bauform und geometrischer Aufbau aktuell implantierter Herzunterstützungspumpen. Durch die Anordnung vom Laufrad und den zur Rotation sowie zur Lagerung benötigten elektromagnetischen Antriebseinheiten, ist die optische Zugänglichkeit nicht im benötigten Umfang zu realisieren.

Rotierende Blutpumpen sind in der Regel mechanisch aufgehängt oder magnetisch schwebend gelagert sowie elektromagnetisch angetrieben. Daher wird entweder die optische Zugänglichkeit durch Antriebsteile behindert oder die Funktionsfähigkeit der Pumpe beeinträchtigt, sofern diese Bauteile entfernt werden, um die optische Zugänglichkeit zu ermöglichen. Zuverlässige Aussagen über die hydraulische Leistung und die hydraulischen Verluste sind daher nicht möglich. Eine Methodik zur Durchführung detaillierter hydraulischer und mechanischer Messungen sowie zur Realisierung einer optischen Zugänglichkeit bei gleichzeitiger Erhaltung der relevanten hydraulischen Charakteristika wird in (Strauch, 2020) (Strauch, 2021) (Strauch, 2022) vorgestellt. Dies ermöglicht die Validierung von Strömungstopologien durch optische Messungen. Ziel dieser Arbeit ist es, die Tauglichkeit der LDV-Profilesensor-Technologie zur Auflösung von Geschwindigkeitsprofilen in kleinen Spalten als neue Methode zur Unterstützung der Entwicklung von rotierenden Blutpumpen zu überprüfen.

Material und Methoden

Dieser Abschnitt ist in vier Unterkapitel gegliedert. Zunächst wird ein Prüfstand vorgestellt, der im Vergleich zu Herzunterstützungspumpen eine verbesserte optische Zugänglichkeit aufweist. Anschließend werden die Betriebsparameter und die gewählten Einstellungen für die Messdatenaufnahme beschrieben. In den beiden abschließenden Kapiteln wird eine Methodik vorgestellt, wie die Geschwindigkeitsverteilung aus den gemessenen Rohdaten extrahiert und das Geschwindigkeitsprofil rekonstruiert wird.

Prüfstand

Aufgrund des komplexen geometrischen Aufbaus von Herzunterstützungspumpen (vgl. Abbildung 1), ist eine optische Zugänglichkeit bei diesen Pumpen im benötigten Umfang nicht zu realisieren. Für die Machbarkeitsstudie wird daher ein Prüfstand mit geeigneter optischer Zugänglichkeit entwickelt. In diesem wird eine Strömung erzeugt, die die zu erwartende Strömungsformen zwischen dem rotierenden Pumpenlaufrad und der stationären Gehäusewand vereinfacht nachahmt. Abbildung 2 (A) zeigt den konstruktiven Aufbau des Prüfstands. Im linken Bereich befindet sich die Messkammer mit einer rotierenden Glasscheibe $D = 50 \text{ mm}$ (UV-VIS Coated, 1λ Fused Silica), die die Oberfläche des rotierenden Laufrades simuliert und von einem Elektromotor in Rotation versetzt wird. Die optische Zugänglichkeit wird durch eine weitere stehende Glasscheibe $D = 100 \text{ mm}$ (MgF2 Coated, 1λ Fused Silica) realisiert. Zwischen der rotierenden und der stationären Scheibe wird über Distanzplättchen ein Spalt von $s = 0.5 \text{ mm}$ eingestellt (Abbildung 2 (B) und (C)). Die Position des LDV-Profilesensors wird so gewählt, dass die tangentialen, in Umfangsrichtung auftretenden Geschwindigkeitskomponenten erfasst werden.

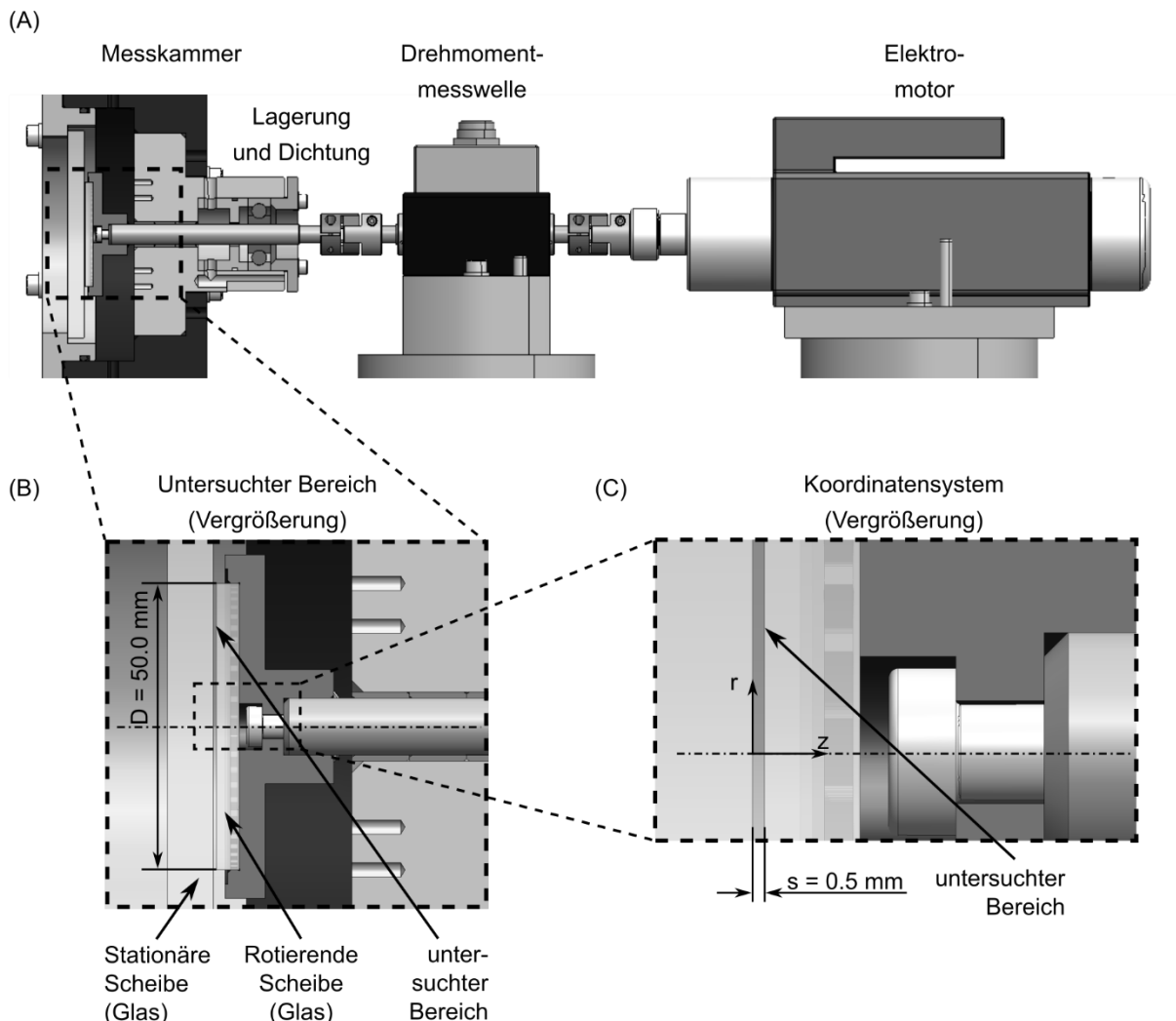


Abb. 2: Prüfstand (A), untersuchter Bereich (B), und Koordinatensystem (C)

Experimentelle Randbedingungen und Eingangsparameter

Die tangentialen Geschwindigkeitsprofile werden bei einem Spalt von $s = 0.5 \text{ mm}$ für einen Drehzahlbereich von $n = 500 \text{ min}^{-1}$ bis $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ mit einer Schrittweite von $\Delta n = 250 \text{ min}^{-1}$ auf einem Radius von $R = 20.0 \text{ mm}$ erfasst. Als Arbeitsmedium wird Wasser bei einer Temperatur von $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ verwendet, wobei zur Streuung des Lichts Seedingpartikel (Silver Coated Hollow Glass Spheres, $15 \text{ }\mu\text{m}$) verwendet werden. Die Parameter zur Messdatenaufnahme sind in Tabelle 1 und Abbildung 3 aufgelistet. Die Länge des Messvolumens beträgt bei einer Fokuslänge von $L_f = 160 \text{ mm}$ in Luft $L_{MV} = 0.5 \text{ mm}$ und wird durch die Brechung zwischen Luft-Glas und Glas-Wasser verlängert auf $L_{MV} = 0.67 \text{ mm}$. Das Messvolumen ist damit länger als die zu vermessende Spaltbreite $s = 0.5 \text{ mm}$ und verdeutlicht damit die Notwendigkeit des Einsatzes der LDV Profile Sensor Technology mit einer örtlichen Auflösung von $10 \text{ }\mu\text{m}$. Die in Tabelle 2 aufgezeigten axialen Messpositionen sowie die Relation des Messvolumens zur Spaltweite sind in Abbildung 3 (A) dargestellt. Die Intensität des Laserlichtes nimmt in der Mitte des Messvolumens ihr Maximum an, weshalb dort die meisten Partikeldektionen zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird das Intensitätsmaximum auf drei verschiedene axiale Positionen gesetzt, um eine genügend große Datenrate im gesamten Spaltbereich zu realisieren. Abbildung 3 (B) zeigt beispielhaft die aufgenommenen Rohdaten für $R = 20.0 \text{ mm}$ bei einer Drehzahl von $n = 3000 \text{ min}^{-1}$. Die Rohdaten lassen bereits Rückschlüsse auf die charakteristische Form der Geschwindigkeitsverteilung zu. Zur genaueren Ermittlung des Geschwindigkeitsverlaufes $v(z)$ sind die Rohdaten im Detail auszuwerten.

Axiale Position z [mm]	0.00	0.20	0.40
Anzahl Datenpunkte	25,000	50,000	50,000
max. Dauer Messdatenaufnahme [s]	4,000	2,400	2,400

Tabelle 1: Parameter zur Messdatenaufnahme

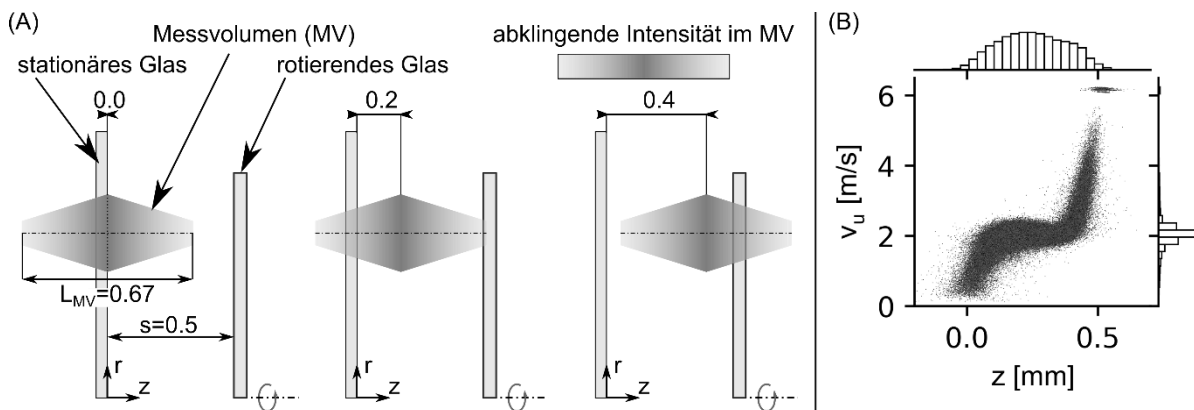


Abb.3: (A) Abmessungen des Messvolumens (MV) im Vergleich zur Spaltbreite s und den axialen Messpositionen. Die höchste Intensität des MV ist bei $z = 0.0 \text{ mm}$, $z = 0.2 \text{ mm}$ und $z = 0.4 \text{ mm}$ positioniert, um die Datenerfassungsrate zu erhöhen. (B) Gemessene Rohdaten für ein Geschwindigkeitsprofil am Radius $R = 20.0 \text{ mm}$ und bei Drehzahl $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ mit Datenverteilungen für z und v_u .

Auswertung der Messergebnisse

Wie in Abbildung 3 (B) illustriert, entsteht durch Turbulenzen in der Strömung ein breites Band an Datenpunkten, das entlang der z -Achse gehäufte Messwerte im Bereich von $(0.15 - 0.35) \text{ mm}$ und entlang der v_u -Achse im Bereich von $(1.7 - 2.4) \text{ m/s}$ aufweist. Um die Geschwindigkeiten hinsichtlich ihrer Häufigkeit entlang der z -Position zu charakterisieren, kommen häufig 2D-Histogramme zum Einsatz. Die jeweils am häufigsten auftretende Geschwindigkeit an einer z -Position wird dann zur Rekonstruktion des Geschwindigkeitsprofils verwendet. Abb. 4 verdeutlicht dabei den Einfluss der Diskretisierung auf das Endergebnis.

Bei einer niedrigen Anzahl an Klassen (Abb. 4 (A)) ist die Auflösung zu grob, um verlässliche Rückschlüsse auf den Geschwindigkeitsverlauf $v_u(z)$ zu ziehen. Mit steigender Anzahl an Klassen ist das Strömungsprofil verlässlicher abbildbar (Abb. 4 (B)), jedoch verschlechtert sich dieses Bild, wenn die Klassenanzahl zu hoch wird (Abb. 4 (C) und (D)).

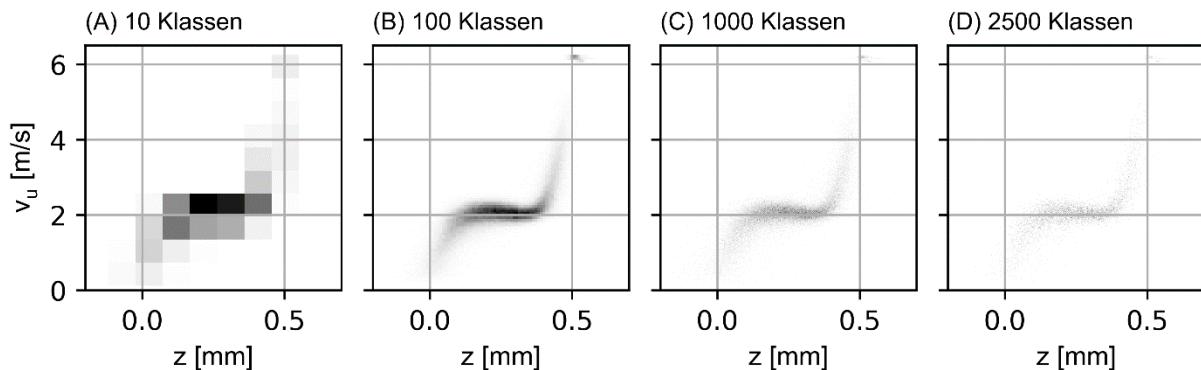


Abb. 4: Auswirkung der Anzahl der Klassen in 2D-Histogrammen auf die Zielgröße für (A) 10 Klassen, (B) 100 Klassen, (C) 1000 Klassen und (D) 2500 Klassen, jeweils in beiden Achsenrichtungen.

Um den Einfluss der Wahl der Klassenbreite auf das Endergebnis zu eliminieren, wird in dieser Studie statt des 2D-Histogramms die Methode der „Gaussian Kernel Density Estimation (Gaussian KDE)“ (The SciPy Community, 2022) angewandt. In Kürze erklärt, wird dabei jedem Datenpunkt ein Wirkungsbereich in Form einer zweidimensionalen Gauß-Verteilung zugeordnet, sodass benachbarte Datenpunkte beeinflusst werden. Statt einer Diskretisierung entsteht ein kontinuierliches Feld, sodass kein Einfluss einer Klassenbreite zu berücksichtigen ist. Die Gaussian KDE ist in Abb. 5 für den zweidimensionalen Fall visualisiert.

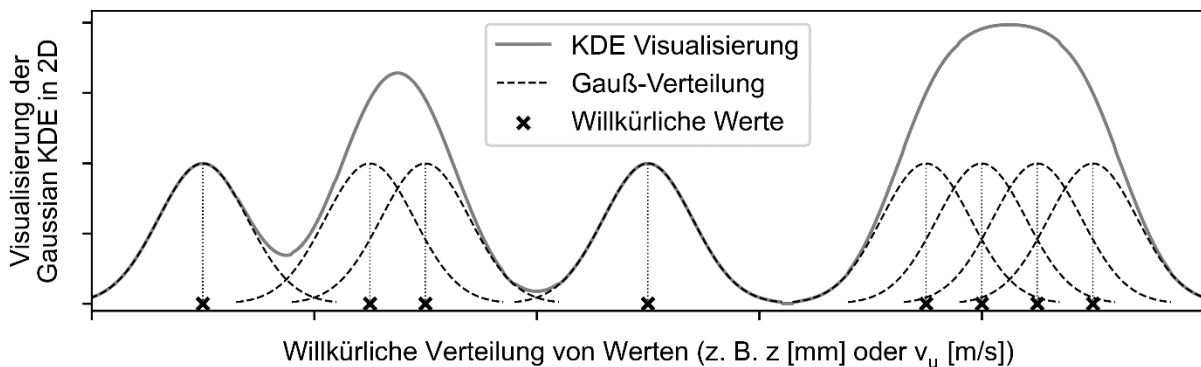


Abb. 5: Visualisierung der Gaussian Kernel Density Estimation (Gaussian KDE) für einen beliebig verteilten Datensatz. Jedem Datenpunkt wird eine Gauß-Verteilung zugewiesen, um benachbarte Datenpunkte zu beeinflussen und ein kontinuierliches Dichtefeld zu erzeugen.

Wird die Gaussian KDE auf die Rohdaten (Abb. 6 (A)) angewandt, so entsteht eine kontinuierliche Dichteverteilung der Messdaten, die das Strömungsprofil erkennen lässt (Abb. 6 (B)). Zur Ermittlung der gesuchten Geschwindigkeitsverteilung $v_u(z)$ werden die Punkte höchster Dichte (DP) entlang der z -Koordinate betrachtet (Abb. 6 (C)). Mit dem Verfahren der Gaussian KDE werden für jede z -Position dichteste Punkte ermittelt, auch wenn diese physikalisch nicht sinnvoll erscheinen. So kann mit hoher Sicherheit gesagt werden, dass Datenpunkte $z < -0.1$ und $z > 0.6$ definitiv nicht zum gesuchten Profil $v(z)$ gehören. Datenpunkte im Bereich von $z \approx 0.25$ sind hingegen aufgrund der hohen Datendichte mit Sicherheit Teil des Geschwindigkeits-

profils. Die Selektion verlässlicher DP, die in die Rekonstruktion des Strömungsprofils einfließen, muss statistisch untermauert werden. Ein Algorithmus zur Validierung statistisch verlässlicher Datenpunkte wird im folgenden Kapitel behandelt.

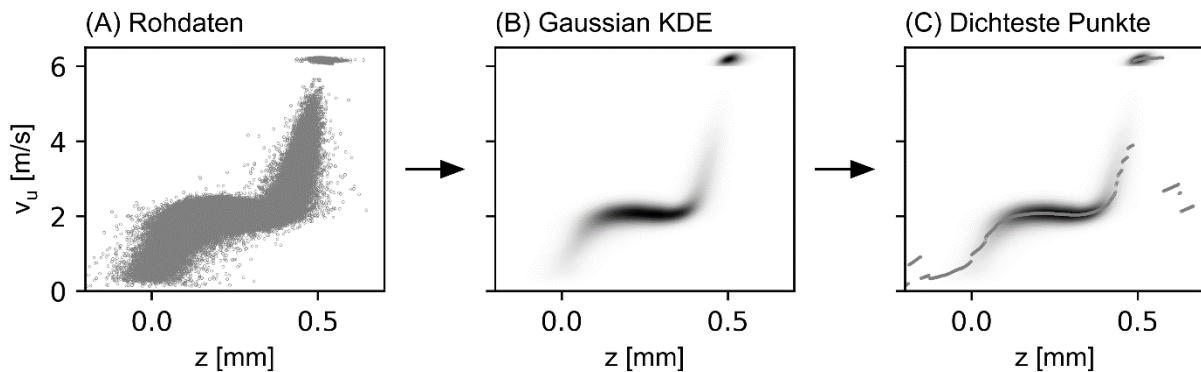


Abb. 6: (A) Rohdaten mit einer hohen Streuung, (B) Anwendung der Gaussian Kernel Density Estimation zur Entwicklung einer kontinuierlichen Dichteverteilung, (C) Visualisierung der Dichtesten Punkte (DP) entlang der z-Koordinate

Profil-Validierung-Algorithmus

Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit der die Dichtesten Punkte (DP) aus der Gaussian KDE statistisch überprüft werden und die Entscheidung erfolgt, ob ein untersuchter DP in die Rekonstruktion des Strömungsprofils einfließt. Dazu wird in einem ersten Schritt eine geforderte Genauigkeit hinsichtlich der Lokalisierung der Ortskoordinate z und der zugehörigen Geschwindigkeit v_u festgelegt. Sie wird im vorliegenden Fall auf $\Delta z = 4 \mu m$ sowie $\Delta v = 0.05 m/s$ festgelegt, vgl. Abb. 7 (A). Im nächsten Schritt wird statistisch überprüft, ob der betrachtete DP durch die umgebenden Messdaten mit einem Konfidenzlevel von 99% als valide eingestuft werden kann. Da die zu betrachtenden Messdaten von der Form des Strömungsprofils abhängen, sucht ein Algorithmus nach passenden Werten. Dazu werden in der normierten Darstellung der Rohdaten (Abb. 7 (B)) um den betrachteten DP Ellipsen geformt, die hinsichtlich der Hauptachsen und Neigung variiert werden, und so Datenpunkte statistisch auswerten. Die Normierung der Rohdaten ist notwendig, damit die Rotation der Ellipsen möglich ist und die Dimensionen der Ellipsen nicht verzerrt werden. Für die Datenpunkte in einer beliebigen Ellipse wird ein t-Test durchgeführt und auf Basis der enthaltenen Datenpunkte ein Konfidenzintervall (Konfidenzlevel 99%) berechnet. Ist das Konfidenzintervall kleiner oder gleich der zuvor definierten Grenzen ($\Delta z = 4 \mu m$, $\Delta v = 0.05 m/s$), wird der betrachtete DP als valide erklärt und fließt in die Rekonstruktion des Strömungsprofils ein. Liegt das durch den t-Test ermittelte Konfidenzintervall außerhalb der definierten Grenzen, so wird der Punkt verworfen und fließt nicht in die Rekonstruktion mit ein. Abb. 7 (C) zeigt beispielhaft validierte Datenmengen um den entsprechenden DP. Die Rekonstruktion des Strömungsprofils (Abb. 7 (D)) erfolgt durch eine Minimierung der Residuen (Least-Squares-Optimization).

Resultate und Diskussion

Für den untersuchten Radius $R = 20.0 mm$ und den Drehzahlbereich von $n = 500 min^{-1}$ bis $n = 3000 min^{-1}$ mit einer Schrittweite von $\Delta n = 250 min^{-1}$ wurden folglich elf tangentiale Geschwindigkeitsprofile ermittelt. Die aus den Rohdaten rekonstruierten Geschwindigkeitsverläufe sind in der Abbildung 8 im Vergleich zu den Rohdaten dargestellt. Beginnend bei einer Drehzahl von $n = 500 min^{-1}$ und einem nahezu linearen Geschwindigkeitsverlauf, ist die Entwicklung zu einer voll ausgeprägten Kernströmung bei $n = 3000 min^{-1}$ zu erkennen. Für $n = 3000 min^{-1}$ (Abbildung 8 (K)) rotiert das Fluid in einem Bereich von $\Delta z \approx 0.21 mm$ als Festkörper, beginnend bei $z \approx 0.17 mm$ und endend bei $z \approx 0.38 mm$, und belegt somit ca. 42 %

der gesamten Spaltbreite. In Abbildung 9 (B) ist die Ortskoordinate z auf die Spaltweite s und die tangentielle Geschwindigkeitskomponente v_u und die Umfangsgeschwindigkeit $u = 2\pi \cdot n$ normiert. Die ausgeprägten Kernströmungen weisen normalisierte Geschwindigkeiten v_u/u im Bereich von ≈ 0.4 bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ bis ≈ 0.3 bei $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ auf. Die ermittelten normierten Geschwindigkeiten für die Festkörperrotation sind etwas niedriger, als in der einschlägigen Literatur (z. B. (Pfleiderer/Petermann, 2004) (Gülich, 2014)) angegeben. Charakteristisch liegen die normierten Geschwindigkeiten v_u/u für Festkörperrotationen in einem Bereich von 0.4 bis 0.5. Die festgestellte Abweichung zu einem niedrigeren Quotienten v_u/u kann auf die drastisch geringere Wandrauheit von optischem Glas im Vergleich zu den üblicherweise in Turbomaschinen verwendeten Materialien (z. B. Edelstahl, Stahlguss, Messing, verschiedene Kunststoffe) zurückgeführt werden.

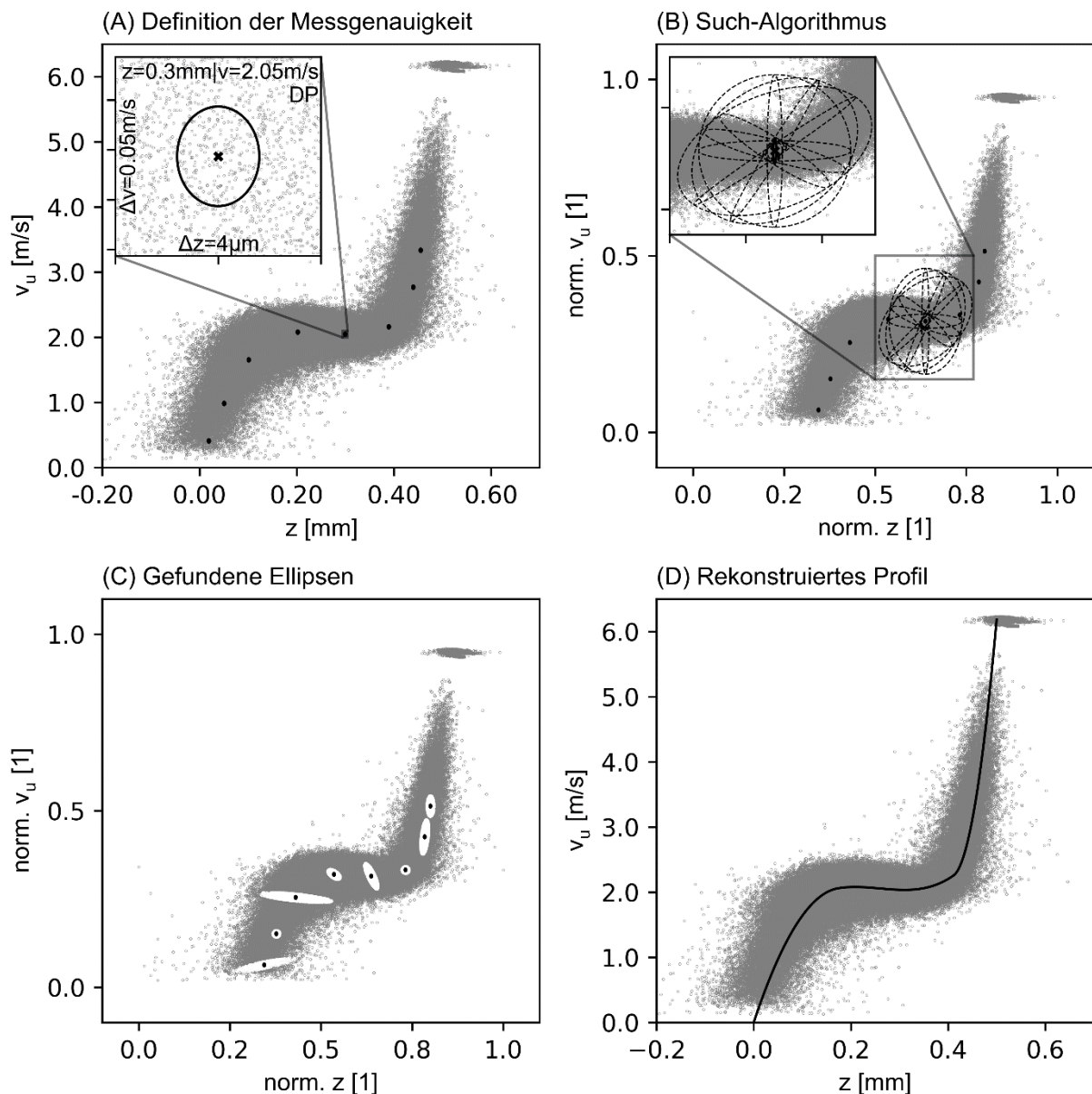


Abb. 7: (A) Definition und Visualisierung der geforderten Messgenauigkeit für einen Dichtesten Punkt (DP), (B) Elliptischer-Such-Algorithmus zur Detektion der statistisch relevanten Datenpunkte durch Variation der Ellipsen-Halbachsen und Drehwinkel, (C) Visualisierung der gefundenen Ellipsen, (D) Rekonstruiertes tangenciales Strömungsprofil durch Minimierung der Fehlerquadrate (Least-Squares-Optimization). Die dargestellten Datenpunkte sind zur besseren Visualisierung reduziert worden.

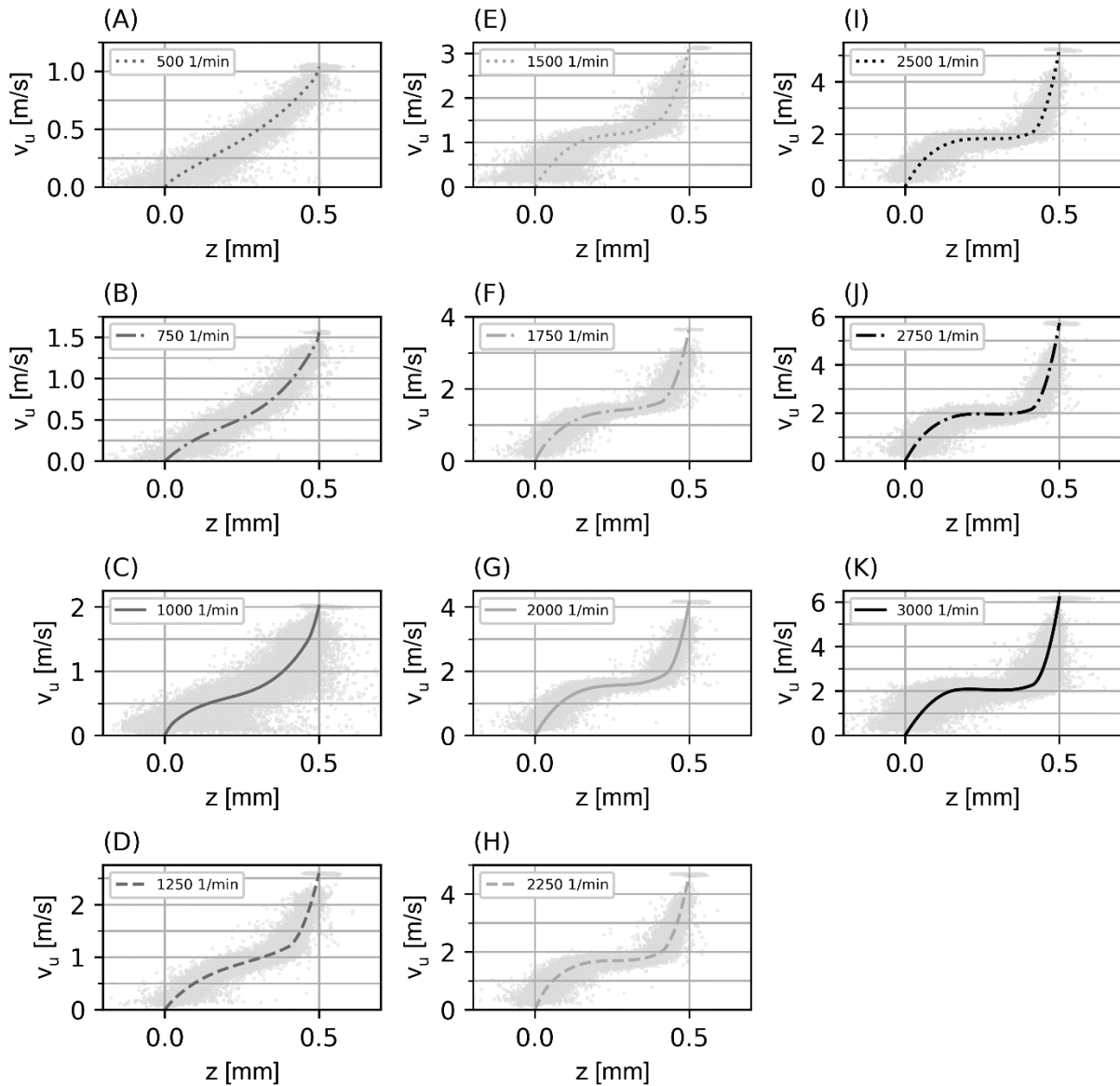


Abb. 8: Rekonstruierte Strömungsprofile für das Drehzahlband von 500 min^{-1} bis 3000 min^{-1} im Vergleich zu den gemessenen Rohdaten.

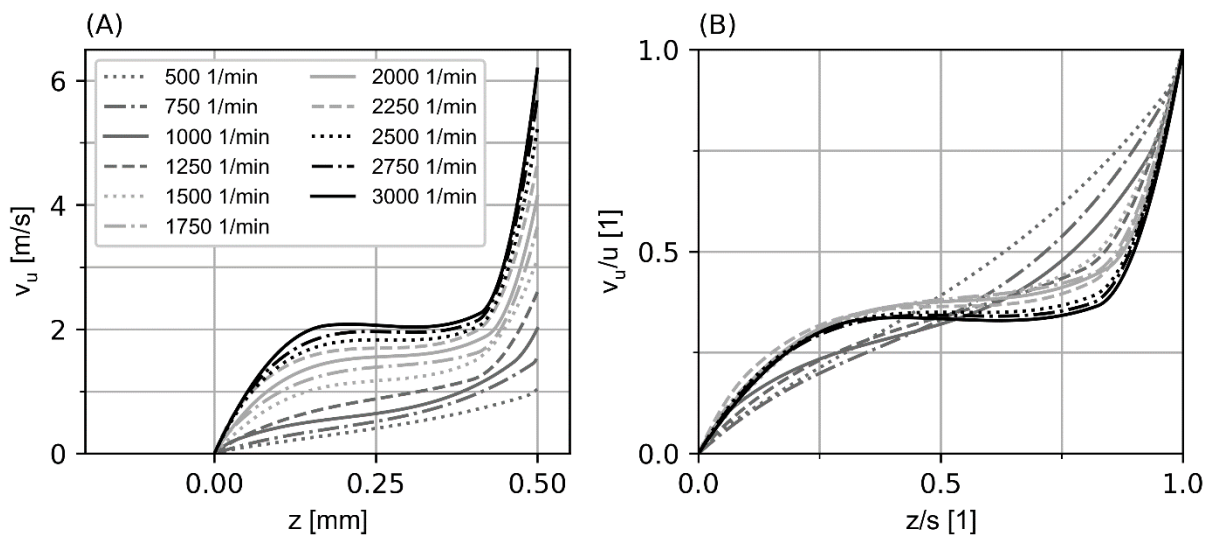


Abb. 9: (A) Rekonstruierte Strömungsprofile im gemeinsamen Vergleich, (B) Rekonstruierte Strömungsprofile in der normierten Darstellung.

Schlussfolgerung

Die LDV-Profilsensor-Technologie eignet sich zur örtlichen Auflösung von Strömungsprofilen in kleinen Spalten. In der vorgestellten Studie wurde hierfür exemplarisch die Spaltweite von $s = 0.5 \text{ mm}$ verwendet. Damit besitzt diese Technologie das Potenzial die für die Entwicklung von Herzunterstützungspumpen (VADs) benötigten Validierungen der Strömungstopologien im Inneren der Pumpe zu liefern. Die Auswertung der Messdaten mittels Gaussian Kernel Density Estimation sowie der entwickelte Profil-Validierung-Algorithmus dienen als geeignete Werkzeuge zur zuverlässigen Bestimmung von Geschwindigkeitsverteilungen.

Literatur

- Czarske, J., Büttner, L., Razik, T., & Müller, H. (2002). Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution. *Measurement Science and Technology*, 13(12), 1979-1989, <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03148-0>
- Daily, J. W., and Nece, R. E. (March 1, 1960). "Chamber Dimension Effects on Induced Flow and Frictional Resistance of Enclosed Rotating Disks." *ASME. J. Basic Eng.* March 1960; 82(1): 217–230. <https://doi.org/10.1115/1.3662532>
- Florjancic, S.: Annular seals of high energy centrifugal pumps: A new theory and full scale measurement of rotordynamic coefficients and hydraulic friction factors. Diss. ETH Zürich (1990)
- Gülich, J. F., *Kreiselpumpen, Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*, 4. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.
- Haddadi, S., Poncet, S., "Turbulence Modeling of Torsional Couette Flows", *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2008, Article ID 635138, 27 pages, 2008. <https://doi.org/10.1155/2008/635138>
- Hamkins, C.P.: The surface flow angle in rotating flow: Application to the centrifugal impeller side gap. Diss. TU Kaiserslautern, Shaker, Aachen (2000)
- Kosyna, G., Lünzmann, H.: Experimental investigations on the influence of leakage flow in centrifugal pumps with diagonal clearance gap. *ImechE Paper C439/010* (1992)
- Kriegseis, J., Mattern, P., Dues, M., Combined Planar PIV and LDV Profile-Sensor Measurements in a Rotor-Stator Disk Configuration, 18th International Symposium on the Application of Laser and Imaging Techniques to Fluid Mechanics LISBON PORTUGAL JULY 4 – 7, 2016
- Lauer, J., et al.: Tip clearance sensitivity of centrifugal pumps with semi-open impellers. *ASME Paper FEDSM97-3366* (1997)
- Lauder, B., Poncet, S., and Serre, E., Laminar, Transitional, and Turbulent Flows in Rotor-Stator Cavities, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42:229-248 (Volume publication date 1 January 2010), First published online as a Review in Advance on August 25, 2009, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145514>
- Pfleiderer, C., Petermann, H., *Strömungsmaschinen*, 7. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer, 2004.
- Schubert, F. (1988). Untersuchungen der Druck- und Geschwindigkeitsverteilung in Radseitenräumen radialer Strömungsmaschinen (Doctoral Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig).
- Schüle, C.Y., Thamsen, B., Blümel, B., Lommel, M., Karakaya, T., Paschereit, C.O., Affeld, K. and Kertzscher, U. (2016), Experimental and Numerical Investigation of an Axial Rotary Blood Pump. *Artificial Organs*, 40: E192-E202. <https://doi.org/10.1111/aor.12725>
- Schüle CY, Affeld K, Kossatz M, Paschereit CO, Kertzscher U. Turbulence Measurements in an Axial Rotary Blood Pump with Laser Doppler Velocimetry. *The International Journal of Artificial Organs*. 2017;40(3):109-117. doi:10.5301/ijao.5000571
- SciPy Documentation, The SciPy community, `scipy.stats.gaussian_kde`, 2022, https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html , Last Online Access 21.05.2022
- Schultz-Grunow, F. (1935), Der Reibungswiderstand rotierender Scheiben in Gehäusen. *Z. angew. Math. Mech.*, 15: 191-204. <https://doi.org/10.1002/zamm.19350150403>
- Strauch, C., Thamsen, P.U., Escher, A., & Granegger, M. "Experimental Hydraulic and Mechanical Characterisation of a Double-Flow Implantable Blood Pump." *Proceedings of the ASME 2020 Fluids*

Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2020 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2020 18th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Volume 2: Fluid Mechanics; Multiphase Flows. Virtual, Online. July 13–15, 2020. V002T03A016. ASME. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2020-20248>

Strauch, C., Experimentelle Untersuchung der hydraulischen Verlustleistung von Herzunterstützungspumpen, TU Berlin, Dissertation, ISBN 978-3-96729-142-1

Strauch, C., Peter, J., Thamsen, P.U., " Methodology for Experimental Investigation of Hydraulic and Mechanical Characteristics of Ventricular Assist Devices", Accepted for publication in Proceedings of the ASME 2022 Fluids Engineering Division Summer Meeting. August 3–5, 2022, Toronto, Ontario, Canada

Thamsen B, Gülan U, Wiegmann L, Loosli C, Schmid Daners M, Kurtcuoglu V, Holzner M, Meboldt M. Assessment of the Flow Field in the HeartMate 3 Using Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry and Comparison to Computational Fluid Dynamics. *ASAIO J.* 2020 Feb;66(2):173-182. doi: 10.1097/MAT.0000000000000987. PMID: 30883404.