



Andreas Dengg, BSc

Analyse von PIV-Messdaten einer Modell-Pumpturbine

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg

Dipl.-Ing. Dr.techn. Mark Guggenberger

Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Graz, Februar 2019

Vorwort

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Masterarbeitsbetreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Mark Guggenberger sehr herzlich für die umfassende Unterstützung bedanken. Gleiches gilt für Herrn O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Jaberg, welcher es, als Leiter des Instituts für hydraulische Strömungsmaschinen an der TU Graz, mir ermöglichte, die vorliegende Arbeit an diesem Institut zu verfassen, mir aber auch die Chance gab, als studentischer Projektmitarbeiter tätig sein zu dürfen.

Ein großer Dank gilt weiter dem gesamten Team des Instituts und des Labors, besonders Herrn Dipl.-Ing. Stefan Leithner, Herrn Dipl.-Ing. Christian Bodner und Herrn Alfred Krisper, bei denen ich in meiner sechsmonatigen Zeit als studentischer Mitarbeiter immens viel gelernt habe und hochinteressante Tätigkeiten ausführen durfte. Besonders die Mitarbeit an einer thermodynamischen Wirkungsgradmessung in einem Tiroler Wasserkraftwerk ist hier zu nennen, bei der ich einzigartige und wertvolle Erfahrungen sammeln durfte.

Wahnsinnig großer Dank gilt meinen Freunden, die ich in Graz kennen lernen durfte, allen voran Elisabeth, Judith und Klemens. Es erübrigt sich die Erklärung, wie wichtig sie mir über die Jahre geworden sind.

Für meine Freundin Isabella kann ich nicht genug Dank aussprechen. Während der gesamten Zeitspanne, die die Masterarbeit in Anspruch nahm, hat sie mir viel Unterstützung und Geduld entgegengebracht. Dafür, und für immens viel mehr, ist Dank allein zu wenig.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, welche mich nicht nur während meiner Diplomarbeit, sondern auch über alle Jahre meines Studiums und meiner Ausbildung unterstützt und begleitet hat. Jenes Ausbildung, welche ohne ihre Unterstützung und ihren Einsatz nicht möglich gewesen wäre.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Analyse von Messdaten, die im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der TU Graz mit der Andritz AG im Zeitraum von 2014 bis 2016 an einem Pumpturbinen-Modell aufgezeichnet wurden.

Pumpturbinen sind hydraulische Strömungsmaschinen, die in Pumpspeicherkraftwerken zum Einsatz kommen, um entweder elektrischen Strom in potentielle Energie umzuwandeln (Pumpbetrieb), oder um besagte potentielle Energie als elektrische Energie im Stromnetz nutzbar zu machen (Turbinenbetrieb).

Entwicklungen im Betrieb von Pumpturbinen gehen weg von stationären Betriebspunkten hin zu regelbaren Maschinen, die große Betriebsbereiche abdecken müssen. Der Vorteil von Pumpturbinen, in kurzer Zeit (bis hin zu wenigen Minuten) den Betriebsmodus umzuschalten und durch Regelung Bedarfsspitzen im Stromnetz abzudecken, fordert von den auslegenden Ingenieuren ein umfangreiches Verständnis über die zu erwartenden Strömungszustände innerhalb einer solchen Maschine. Der große Betriebsbereich fordert im Pumpbetrieb neue Erkenntnisse über Strömungsphänomene wie beispielsweise der Kennlinieninstabilität. Solche Phänomene sind unerwünscht und verursachen Probleme im Betrieb. Numerische (CFD-) Tools zur Strömungsberechnung unterstützen den Auslegeprozess wesentlich, können bei Pumpturbinen aber rechenmodellabhängig Instabilitäten und Strömungsphänomene nicht immer korrekt abbilden.

Das durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) unterstützte Forschungsprojekt (FFG-Projekt Nummer 846059) hat sich mit einem Modellversuch zum Ziel gesetzt, Kriterien zu identifizieren, die zum Auftreten von Instabilitäten im Pumpbetrieb solcher Pumpturbinen führen. Sowohl experimentell als auch numerisch wurden Untersuchungen angestellt, um einer wissenschaftlichen Erklärung der Strömungsphänomene nachzugehen, damit etwaige Instabilitäten in Zukunft zuverlässig vorausgesagt werden können.

Bei der Messkampagne im Rahmen dieses Forschungsprojektes kamen unterschiedliche Herangehensweisen zum Einsatz, unter ihnen die Messmethode der Particle Image Velocimetry. Diese Strömungsmesstechnik nutzt in Messebenen aufgespanntes Laserlicht und winzige, dem Strömungsmedium beigemengte Partikel, um mit einer Kamera in zeitlichem Versatz Bilder aufzunehmen. Mit diesen sogenannten Doppelbildern können Aussagen über die Geschwindigkeitsverteilung des Mediums in der besagten Messebene getätigt werden. Eine umfangreiche Auswertung wurde zum Zeitpunkt des Projektes bereits durchgeführt und für weiterführende Forschungszwecke verwendet.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, mit den vorhandenen Doppelbildern eine Analyse zur Identifikation von Wirbeln durchzuführen. Wirbel und -strukturen werden bei Pumpturbinen mit Rezirkulationen und vor allem mit Instabilitäten verknüpft. Es wurde ein Matlab-Code verfasst, der es ermöglicht, Daten wie Position, Zirkulation und Größe von Wirbeln aus den

PIV-Daten zu berechnen und darzustellen. Von der großen Datenmenge, die von den Messungen zur Verfügung steht, wurde nur ein Teil ausgewählt. Aus den unterschiedlichen Datensätzen mit unterschiedlichen Laufrädern und Leitapparatstellungen wurde von den zwei vermessenen Laufrädern eines mit einer untersuchten Leitapparatstellung von 15° ausgewählt. Zusätzlich wurde pro Maschinenseite (Saug- bzw. Druckseite) eine von jeweils drei PIV-Messebenen ausgesucht und ausgewertet (Axial-Ebene auf der Saugseite vor dem Laufrad; Axial25-Ebene auf der Druckseite im Leitapparat). Die Ergebnisse werden auf anschauliche Art und Weise präsentiert und die Messpunkte untereinander mithilfe vorher erarbeiteter Information aus der Fachliteratur verglichen.

Abstract

The focus of this master thesis lies on the analysis of gathered data, which was accumulated in a research project of the Institute of Hydraulic Fluid Machinery at the TU Graz in a collaboration with Andritz AG. This data of a pump turbine model was recorded in the time period starting from 2014 until 2016.

Pump turbines are hydraulic continuous-flow machines, that are used in pump turbine power plants either to store electric energy in form of potential energy (pump mode) or to produce electric energy with the use of said potential energy (turbine mode).

Developments regarding the operation of pump turbines tend to adjustable machines, which cover a large range of operation, rather than have one stationary operating point. The capability of pump turbines of switching the operating mode within a small amount of time (in some cases within a few minutes) and serving as peak power supply in the power grid is a big advantage. For engineers tasked with designing those pump turbines, this requires extensive knowledge of the expected state of flow within the machine. Wide operating ranges in pump mode require new insights about flow phenomena, such as instability in the pump characteristics. Such undesired instabilities cause problems during ordinary operation. Numerical (CFD-)tools for computing fluid flow support the design process to a large extent, however, depending on the chosen numeric models and settings, instabilities and flow phenomena will not always be reproduced correctly.

The measuring campaign of this research project was comprised of a variety of approaches, which also contained the measuring method of Particle Image Velocimetry. This measuring technique uses laser light sheet measurement planes and tiny particles mixed in to the medium in order to capture pictures with a camera taken at small time steps apart. With the help of these pictures arranged in pairs, statements concerning the distribution of velocity can be made. An extensive evaluation at the time of the project was already conducted and was used in further research.

The goal of this master thesis is to make the taken paired pictures accessible to an analysis for the identification of vortices. Vortices and vortex structures in pump turbines are linked to recirculations and especially to instabilities. A Matlab program was written in order to compute and display data like position, circulation and the size of vortices, which is contained in the PIV-data. Only a fraction of the huge amount of data that is available for investigation was selected. Out of the different datasets for different runners and guide vane openings, only one of the two runners with one investigated guide vane opening was selected. Additionally, one of three PIV measuring planes per side of the machine (suction side and pressure side) were selected and investigated (Axial plane on the suction side, located in front of the runner; Axial25 plane on the pressure side, located within the guide vane apparatus) The results are presented in a comprehensible way and the measuring points are compared with each other with the help of accumulated information found in literature of the field.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis.....	xi
Abbildungsverzeichnis	xiv
Tabellenverzeichnis.....	xvii
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis	xviii
1 Einleitung	1
1.1 Forschungsprojekt am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen.....	1
1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Pumpturbinen.....	5
2.1.1 Definition, Einsatzgebiet und -zweck	5
2.1.2 Instabiles Verhalten.....	5
2.1.3 Teillastrezirkulation	6
2.1.4 Volllastinstabilität	7
2.2 Fachbegriffe und Kennzahlen für hydraulischer Strömungsmaschinen.....	8
2.2.1 Spezifische Drehzahl.....	8
2.2.2 Druckziffer, Durchflussziffer	9
2.3 Begriffe in der Strömungsmechanik.....	9
2.3.1 Reynoldszahl	9
2.3.2 Geschwindigkeitsfeld	10
2.3.3 Rotation eines Vektorfeldes, Wirbelstärke.....	10
2.3.4 Zirkulation.....	11
2.4 Wirbelsätze	12
2.4.1 Croccos Wirbelsatz	12
2.4.2 Helmholtzsche Wirbelsätze.....	13
2.4.3 Kelvinscher Wirbelsatz	16
2.5 Ausgewählte Methoden zur analytischen Bestimmung von Wirbeln	18
2.5.1 Geschwindigkeitsgradiententensor.....	18
2.5.2 Q-Kriterium	19
2.5.3 Swirling Strength.....	19

2.5.4	λ_2 -Kriterium	20
3	Strömungsmesstechnik: Particle Image Velocimetry	21
3.1	Grundlagen zu PIV	21
3.2	Messung und Equipment	22
3.2.1	Tracerpartikel, Folgevermögen und Lichtstreuung	22
3.2.2	Laser und Lichtschnitt	23
3.2.3	Bildaufnahme und Kalibration	25
3.2.4	Ausgewählte Aufnahmeparameter	26
3.3	Auswertung	27
3.3.1	Aufbereitung der Doppelbilder	27
3.3.2	Interrogation und Kreuzkorrelation	28
3.3.3	Validierungsverfahren	32
3.3.4	Geschwindigkeitsfeld	33
3.3.5	Out-of-Plane-Motion	34
4	Messkampagne der Modell-Pumpturbine	35
4.1	Hydraulik einer Francis-Pumpturbine	35
4.2	Struktur der vorhandenen PIV-Messdaten	36
4.2.1	Betriebspunkte	36
4.2.2	Messebenen und Rotor-Stator-Positionen	37
4.2.3	Festgelegte PIV-Parameter	38
4.2.4	Koordinatensysteme	39
5	Untersuchung von Wirbelstrukturen in Matlab	41
5.1	Einführung	41
5.2	Rohdaten	41
5.3	Ablauf	42
5.4	Vorgabeparameter	42
5.4.1	Betrachtungsfeldgröße	43
5.4.2	Verhältnisparameter α	43
5.4.3	Wirbeltyp	45
5.4.4	Maskierung	45
5.5	Berechnete Größen	46
5.5.1	Position	46
5.5.2	Größe	47
5.5.3	Zirkulation	48

5.6	Berechnungsdurchgänge.....	48
6	Ergebnisse und Diskussion.....	49
6.1	Axiale Messebene auf der Saugseite	49
6.1.1	Beschreibung der Darstellung	49
6.1.2	Darstellungen bei fallendem Durchfluss	51
6.1.3	Darstellungen bei steigendem Durchfluss.....	57
6.1.4	Zusammenfassung.....	62
6.2	Axiale Messebene auf der Druckseite	63
6.2.1	Beschreibung der Darstellung	63
6.2.2	Darstellungen bei fallendem Durchfluss	64
6.2.3	Darstellungen bei steigendem Durchfluss.....	65
6.2.4	Interpretation	66
6.2.5	Zusammenfassung.....	68
7	Ausblick	71
7.1	PIV-Auswertung.....	71
7.2	PIV-Analyse	71
7.3	Verfasster Code	71
	Literaturverzeichnis.....	73
8	Anhang	75
	A1 Programmaufbau	75
	A2 Matlab-Code.....	76
	A3 Aufbau einer Rohdatei.....	92
	A4 Pumpenkennlinie mit eingezeichneten PIV-Messpunkten.....	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Strömung um ein Tragflügelprofil, welches abrupt von rechts nach links bewegt wurde. Links: Filmaufnahme von 1936, Rechts: Errechnete Wirbelstärke ("Vorticity") aus einer PIV-Auswertung. [1].....	1
Abbildung 1-2: Modell-Pumpturbine des Forschungsprojektes am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der TU Graz. [3].....	2
Abbildung 2-1: Kennlinieninstabilität einer Pumpe im Q-H-Diagramm. [8, Abb. 1]	5
Abbildung 2-2: Teillastwirbel auf Saug- und Druckseite eines halbaxialen Pumpenlaufrades. SW: Saugwirbel, DW: Druckwirbel. [6, Abb. 259.1]	6
Abbildung 2-3: Hauptströmung (grün) bei Teillastzirkulation. [5, Abb. 7–1].....	7
Abbildung 2-4: Rotating Stall an einem Schaufelgitter. [9, Abb. 10.30].....	8
Abbildung 2-5: Einfluss der spezifischen Drehzahl (hier n_s) auf die Laufradgeometrie von Pumpen [13]	9
Abbildung 2-6: Bildung der Zirkulation entlang einer geschlossenen Kontur C.....	11
Abbildung 2-7: Bildung der Zirkulation auf einer geschlossenen Fläche A	11
Abbildung 2-8: Wirbelröhre mit Querschnitten A1 und A2 und infinitesimale Fläche dA auf der Röhrenoberfläche. [17, Abb. 5.6].....	14
Abbildung 3-1: Grundaufbau einer Particle Image Velocity. [31].....	21
Abbildung 3-2: Mie-Streuung von Licht an einem Partikel. [34]	23
Abbildung 3-3: Prinzipaufbau eines Lasers. [36, S. 10]	24
Abbildung 3-4: Links: Kalibrationsgitter im wassergefüllten Modell auf der exakten Stelle der Messebene Rechts: Aufgenommenes Bild des Kalibrationsgitters.	25
Abbildung 3-5: Links: Aufgenommenes Bild. Mitte: Mittelung aus 188 Doppelbildern, Rechts: Resultat.	27
Abbildung 3-6: Aufteilung des Bildes in Interrogation Areas (ohne Overlap).....	28
Abbildung 3-7: Übersicht des Ausführablaufes der Kreuzkorrelation in Dynamic Studio. [30, Abb. 4–6].....	29
Abbildung 3-8: Mögliche Partikelbahn im Vergleich zur angenommenen, linearen Bahn. [2, Abb. 6.27].....	29
Abbildung 3-9: Korrelationsspitze und Hintergrundrauschen in der "Correlation Map". [2, S. 176].....	30
Abbildung 3-10: Links: Korrelation mit Phantompartikeln, Rechts: Top-Hat-Fensterfunktion, die alles bis auf die Interrogation Area unterdrückt. [30, Abb. 4–8]	31
Abbildung 3-11: Overlap der Interrogation Areas, um keine Information durch die Fensterfunktion zu verlieren. [30, Abb. 4–9]	31
Abbildung 3-12: Offset der Interrogation Areas, um die zulässige Verschiebung der Partikel einzuhalten. [30, Abb. 4–10]	32
Abbildung 3-13: Komponenten eines räumlichen Geschwindigkeitsvektors \mathbf{c} gemessen in einer 2D-PIV-Messebene	33
Abbildung 4-1: Schnittansicht einer Pumpe in Vertikalausführung, Fa. Voith. 1: Saugrohr, 2: Laufrad, 3: Leitschaukel, 4: Stützschaufel, 5: Spirale, 6:Welle zum Motorgenerator. [6, Abb. 301.2]	35

Abbildung 4-2: CAD-Modell des Pumpturbinen-Modells mitsamt PIV-Fenstern. [40, Abb. 2]	35
Abbildung 4-3: Kennlinie des Laufrades 1 der Modell-Pumpturbine im φ - ψ -Diagramm bei 15° Leitschaufelstellung. [41, Abb. 28]	36
Abbildung 4-4: Vier PIV-Messebenen auf der Saugseite des Pumpturbinen-Modells. [41, Abb. 18]	37
Abbildung 4-5: -Vier Messebenen auf der Druckseite des Pumpturbinen-Modells. [41, Abb. 17]	37
Abbildung 4-6: Koordinatensysteme festgelegt in Dynamic Studio. Links: Saugseite (axial), Rechts: Druckseite (radial25)	39
Abbildung 5-1: Schematischer Ablauf der PIV-Analyse	42
Abbildung 5-2: Unterschiedliche Größe der Betrachtungsfelder mit Sicht auf einen positiven Wirbelkern. Oben links: 1,5x1,5 IA, Oben rechts: 2,5x2,5 IA. Unten links: 3,5x3,5 IA. Unten rechts: 4,5x4,5 IA. Farbskala: Wirbelstärke in s^{-1}	43
Abbildung 5-3: Anzahl isolierter Wirbel abhängig vom relativen Verhältnisparameter	44
Abbildung 5-4: Schematischer Ablauf innerhalb des Hauptprogrammes zur Berechnung der Wirbelposition	45
Abbildung 5-5: Dantec-Auswertung mit Einfluss der Maskierung - Links: Messebene, Mitte: Maskierung, Rechts: Ergebnis der Wirbelstärke	46
Abbildung 5-6: Resultierende, unaussagekräftige Auswertung der Rohdaten ohne eigene Maskierung	46
Abbildung 5-7: Maskierung der Druckseitenmessebene in Matlab	46
Abbildung 5-8: Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit c_u eines Rankine-Wirbels	47
Abbildung 6-1: Histogramm-Darstellung der Wirbelpositionen des Messpunkts 4 (RSP0-RSP38)	49
Abbildung 6-2: Beispielhafte Histogramm-Darstellung des Messpunktes 4 mit Information über die Zirkulation, aufgeteilt in drei Bereiche	50
Abbildung 6-3: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 1	51
Abbildung 6-4: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 2	51
Abbildung 6-5: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 3	52
Abbildung 6-6: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 4	52
Abbildung 6-7: Wirbelgröße in m - Messpunkt 1	53
Abbildung 6-8: Wirbelgröße in m - Messpunkt 2	53
Abbildung 6-9: Wirbelgröße in m - Messpunkt 3	54
Abbildung 6-10: Wirbelgröße in m - Messpunkt 4	54
Abbildung 6-11: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Saugseite, fallender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser	55
Abbildung 6-12: Druckpulsationen im Saugrohr des Rotors 1 bei GVO 15°. [5, Abb. 6–10]	56
Abbildung 6-13: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 4	57
Abbildung 6-14: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 5	57
Abbildung 6-15: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 6	58
Abbildung 6-16: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 1	58
Abbildung 6-17: Wirbelgröße in m - Messpunkt 4	59
Abbildung 6-18: Wirbelgröße in m - Messpunkt 5	59
Abbildung 6-19: Wirbelgröße in m - Messpunkt 6	60

Abbildung 6-20 : Wirbelgröße in m - Messpunkt 1	60
Abbildung 6-21: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Saugseite, steigender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser	61
Abbildung 6-22: Fließrichtung (blau) der Strömung, Drehrichtung (orange) des Laufrades (nicht zu sehen) und der grau erscheinende Keil des einfallenden Laserlichts (zufolge Brechung)	63
Abbildung 6-23: Messpunkt 1. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	64
Abbildung 6-24: Messpunkt 2. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	64
Abbildung 6-25: Messpunkt 3. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	64
Abbildung 6-26: Messpunkt 4. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	64
Abbildung 6-27: Messpunkt 4. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	65
Abbildung 6-28: Messpunkt 5. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	65
Abbildung 6-29: Messpunkt 6. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	65
Abbildung 6-30: Messpunkt 1. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbeldurchmesser in m	65
Abbildung 6-31: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Druckseite, Fallender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser.....	66
Abbildung 6-32: Druckpulsationen im kranzseitigen Bereich der Leitschaufeln. [5, Abb. 6–10].....	67
Abbildung 6-33: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Druckseite, Steigender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser	67
Abbildung 6-34: MP05 - RSP0	69
Abbildung 6-35: MP05 - RSP6	69
Abbildung 6-36: MP05 - RSP14	69
Abbildung 6-37: MP05 - RSP20	69
Abbildung 6-38: MP05 - RSP26	69
Abbildung 6-39: MP05 - RSP32	69
Abbildung 6-40: MP05 - RSP38	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betriebspunkte Laufrad 1 (H9/596 F) mit GVO 15°	37
Tabelle 2: Zusammenfassung der PIV-Parameter, Saugseite	38
Tabelle 3: Zusammenfassung der PIV-Parameter, Druckseite	38
Tabelle 4: Durchgeführte Berechnungsdurchgänge	48
Tabelle 5: Datenübersicht der Bereiche für die Zirkulation und Wirbelgröße.....	50

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

AG	Aktiengesellschaft
CCD	charged coupled device
DCC	Discrete Cross Correlation
DS	Druckseite
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FFT	Fast Fourier Transformation
GVO	Guide Vane Opening (dt.: Leitschaufelöffnung)
HFM	Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen
IA	Interrogation Area
Laser	light amplification by stimulated emission of radiation
MP	Messpunkt
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
PIV	Particle Image Velocimetry
PT	Pumpturbine
PTV	Particle Tracking Velocimetry
Re	Reynoldszahl
RSP	Rotor-Stator-Position
SS	Saugseite
TBB	Time Between Bursts
TBP	Time Between Pulses
TU Graz	Technische Universität Graz

Griechische Formelzeichen

Γ	Zirkulation	[m ² /s]
μ	dynamische Viskosität	[Pas]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ_p	Standardabweichung des Druckpulsationskoeffizienten	[-]
ϕ	Durchflussziffer	[-]
ψ	Druckziffer	[-]
$\vec{\omega}$	Rotation, Vorticity, Wirbelstärke	[1/s]

Lateinische Formelzeichen

f	Frequenz	[Hz]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
H	Förderhöhe	[m]
h	Planck-Konstante	[Js]
M	Scale Factor	[-]
n_q	Spezifische Drehzahl	[1/min]
Q	Fördermenge	[m ³ /s]
S	Image Scale Factor	[-]

1 Einleitung

Particle Image Velocimetry, kurz PIV, ist ein sehr mächtiges Werkzeug in der Strömungsmesstechnik. Es zählt zu den optischen Messverfahren und erlaubt es, ohne Eingriff in das Strömungsfeld Messdaten über Betrag und Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten zu einem Zeitpunkt zu erfassen. Details zu diesem Verfahren werden in Kapitel 3 behandelt.

Um Strömungen sichtbar zu machen, bediente man sich bereits lange vor PIV an Teilchen, die man im Fluid mitschwimmen ließ. Ludwig Prandtl, Symbolfigur und Wegbereiter der modernen Strömungslehre, nutzte Anfang des 20. Jahrhunderts in seinen Visualisierungen Bärlappsporen, Aluminiumpulver oder Eisenglimmer, um eine Vielzahl an Effekten in Wasserströmungen darzustellen. [1]

Die Methode der Particle Image Velocimetry benutzt zwar ebenso Partikel in der Strömung, vollzieht mit ihrem Laser-Lichtschnitzaufbau und ihren digitalen Hochgeschwindigkeitskameras hingegen rechnergestützte Auswertungen, mittlerweile auch im dreidimensionalen Raum (3D-PIV). Vor der digitalen Anwendung gab es bereits Systeme, die die PIV-Kernaufgabe der Kreuzkorrelation analog (optisch) bewältigten, [2, S. 147] allerdings war die gesammelte Datenmenge durch den zeitlichen Aufwand der Auswertung beschränkt.

Abbildung 1-1 zeigt eindrucksvoll, dass Teile von Prandtls Filmaufnahmen von 1936 sich für eine PIV-Auswertung eignen und so den beachtlichen Forschungsfortschritten zu Prandtls Zeiten keinen Abbruch tun. Strömungsvisualisierungen waren früher und sind noch heute ein unverzichtbares Werkzeug in allen Bereichen, die sich mit dem Verhalten von Strömungen beschäftigen.

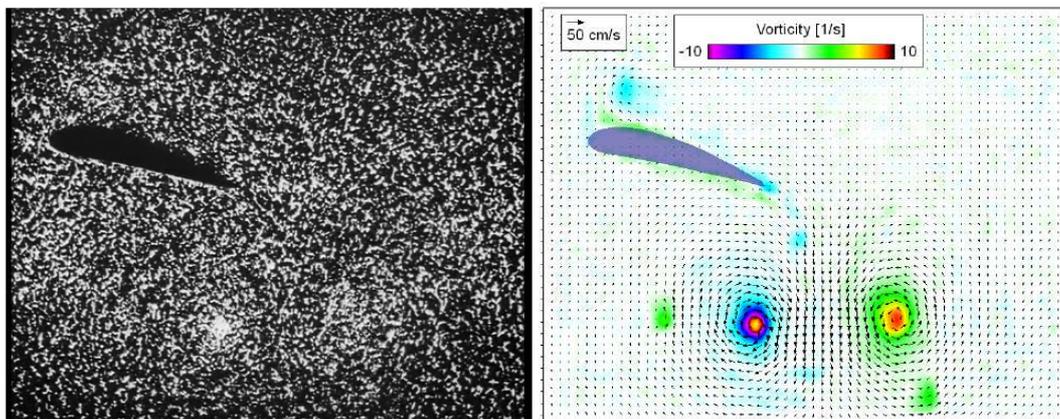


Abbildung 1-1: Strömung um ein Tragflügelprofil, welches abrupt von rechts nach links bewegt wurde. Links: Filmaufnahme von 1936, Rechts: Errechnete Wirbelstärke ("Vorticity") aus einer PIV-Auswertung. [1]

1.1 Forschungsprojekt am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen

Das Forschungsprojekt zur Untersuchung von Instabilitäten einer Francis-Pumpturbine im Pumpbetrieb an der TU Graz, zusammen mit der Andritz AG, verwendete einen umfangreichen PIV-Aufbau, um das Auftreten von Instabilitäten besser verstehen zu können [3]. Das Ziel ist, eindeutige Kriterien zu finden, die zu einem Auftreten von Instabilitäten im Pumpbetrieb führen um so bei Auslegung einer Pumpturbine diese Bedingungen vermeiden zu können. [4] Numerische Analysen des Pumpturbinenmodells wurden von der Andritz AG

durchgeführt und mit den Messergebnissen des Institutes für hydraulische Strömungsmaschinen verglichen und näher untersucht.

Bei der Messkampagne im Rahmen dieses, von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft unterstützten, Projektes (FFG-Projekt Nummer 846059), kamen neben PIV-Analysen die folgenden Messmethoden zum Einsatz:

- Visualisierung von Wirbelstrukturen mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera an der Saugseite der Maschine. Hierfür wurde der Systemdruck so weit gesenkt, dass die Wirbelstrukturen durch Kavitation sichtbar gemacht wurden.
- Messung von Druckpulsationen mit zeitlich hochauflösenden Drucksensoren, um Signaturen im Frequenzbereich Strömungsphänomenen zuordnen zu können.
- Messung der hydraulischen Belastung der Leitschaufelzapfen mit Dehnmessstreifen für die Bestimmung des Drehmoments, welches auf den Leitschaufeln wirkt.
- Erfassung der Kennliniencharakteristik mitsamt auftretender Hysteresen.

Unterschiedliche Betriebszustände und auftretende Strömungsphänomene wurden aufgezeichnet und sind mit den Ergebnissen in wichtige Erkenntnisse für Pumpturbinen eingeflossen. [5] Abbildung 1-2 zeigt unterschiedliche Fotos des PIV-Aufbaus der Modell-Pumpturbine.

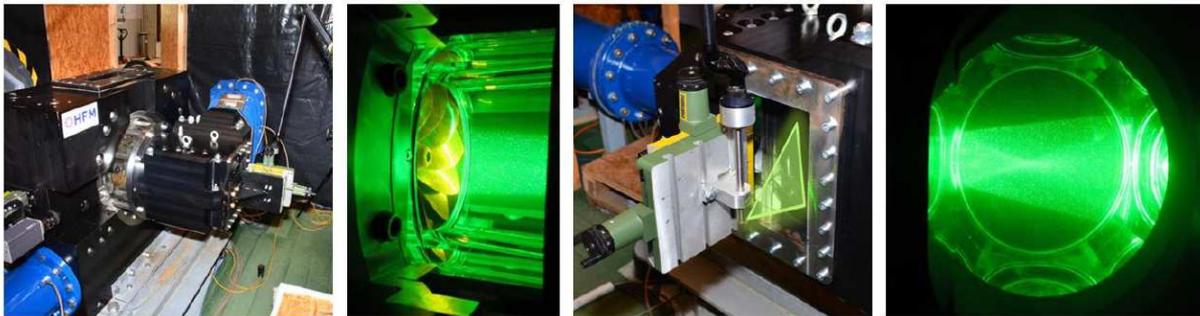


Abbildung 1-2: Modell-Pumpturbine des Forschungsprojektes am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der TU Graz. [3]

1.2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Die Theorie zu Pumpeninstabilitäten, das oben vorgestellte Forschungsprojekt und die Methode der PIV bilden das Fundament der vorliegenden Arbeit. Mit dem Wunsch, Wirbelstrukturen und Wirbel näher zu verstehen, wurde zusätzlich die strömungsmechanische Theorie zu Wirbeln erarbeitet. Der folgende Aufbau gibt einen Überblick über die Arbeit:

- Kapitel 2 widmet sich den allgemeinen Informationen zu Pumpturbinen und ihrem Betriebsverhalten im Pumpmodus. Die Kennlinieninstabilität solcher Maschinen im Pumpbetrieb ist hier besonders von Interesse, so wird auf die Begriffe Teillastzirkulation und Volllastinstabilität eingegangen. Fachbegriffe, die besonders bei hydraulischen Strömungsmaschinen für ihre Beschreibung und ihren Vergleich untereinander dienen, werden kurz vorgestellt, sowie wichtige Begriffe in der Strömungsmechanik, ohne diese eine Beschreibung von Strömungen nicht möglich ist. Einen großen Anteil dieses Grundlagenkapitels macht die Bearbeitung der Wirbelsätze aus. Sie sind in der Strömungslehre von großer Bedeutung und werden hier hergeleitet

und eingehend diskutiert. Weiter werden Methoden vorgestellt, wie sie aktuell zur analytischen Bestimmung von Wirbeln eingesetzt werden.

- Mit Kapitel 3 wird die Strömungsmesstechnik der Particle Image Velocimetry vorgestellt und im Detail behandelt. Auf die Grundlagen und der Beschreibung des Messequipments folgen Details zur Auswertung der gewonnenen Daten. Wichtige mathematische Hilfsmittel zur Verbesserung der Auswertequalität und Auswerteparameter werden vorgestellt.
- Mit dem oben beschriebenen Forschungsprojekt beschäftigt sich das Kapitel 4. Die gesammelten Messdaten sind mehreren Messebenen in der Maschine zugeordnet und wurden teilweise mit unterschiedlichen PIV-Parametern ausgewertet. In diesem Kapitel findet man alle Details zu den gewählten Daten und Informationen zu den Messpunkten, die für die vorliegende Arbeit analysiert wurden.
- Der Ablauf des Codes zur Untersuchung von Wirbeln wird in Kapitel 5 vorgestellt. Sowohl der Workflow als auch Vorgabeparameter, die für die Analyse wichtig sind, werden hier erörtert. Anschließend wird die Vorgehensweise bei der Berechnung von Größen, welche teils auf Modellvorstellungen beruhen, genau beschrieben.
- Kapitel 6 zeigt die gewonnenen Ergebnisse aus der PIV-Analyse der Wirbelstrukturen. Bei den erzeugten Grafiken wird darauf geachtet, dass die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden. Auftretende Effekte in der Modell-Pumpturbine werden verglichen, diskutiert und können in den jeweiligen Betriebspunkten mit den Ergebnissen verknüpft werden.
- Zum Schluss gibt Kapitel 7 einen Ausblick, was bei weiterführenden Untersuchungen in diesem konkreten Fall besser beziehungsweise anders gemacht werden könnten.
- Die wichtigsten Teile des Programmcodes können dem Anhang entnommen werden.

2 Grundlagen

2.1 Pumpturbinen

2.1.1 Definition, Einsatzgebiet und -zweck

Pumpturbinen zählen zu den hydraulischen Strömungsmaschinen und werden großtechnisch in Pumpspeicherkraftwerken eingesetzt. Solche Kraftwerke dienen dazu, nicht nur elektrische Energie zu produzieren, sondern auch Energie zu speichern. Wasser wird dazu von einem niedrigen Niveau in einen höher gelegenen Speichersee gefördert. Die gespeicherte Energie liegt somit in Form von potentieller Energie vor, die zu einem beliebigen Zeitpunkt wieder in elektrische Energie umgewandelt werden kann. [6, S. 298]

Für solch einen Energiespeicher wird im allgemeinen Fall eine Pumpe und eine Turbine benötigt. Praktisch stehen viele Argumente dafür, eine Pumpturbine mit beiden Fähigkeiten umzusetzen, um Kosten, maschinellen Aufwand und Platzbedarf gering zu halten.

Aus den selben Argumenten sind Pumpturbinen oft mit Motorgeneratoren ausgestattet, die für den Betrieb als Motor (im Pumpbetrieb) und als Generator (im Turbinenbetrieb) geeignet sind. [7, S. 47]

Wie für alle technischen Einrichtungen ist für ein Pumpspeicherkraftwerk der Gesamtwirkungsgrad äußerst wichtig. Der wirtschaftliche, effiziente und umweltverträgliche Umgang mit Energie besitzt einen großen Stellenwert. Die Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen wird in Zukunft nicht nur ingenieurwissenschaftliche, sondern auch gesellschaftliche und politische Herausforderungen stellen, um die Abkehr von fossilen und nuklearen Energieträgern zu schaffen.

Es ergibt sich damit eine konkrete Anforderung an Pumpturbinen: Für den Pump- und Turbinenbetrieb müssen hohe Wirkungsgrade über große Betriebsbereiche seitens der Maschine bereitgestellt werden, welche wiederum mit den geforderten Förder- und Fallhöhen in Verbindung stehen.

2.1.2 Instabiles Verhalten

Betrachtet man speziell die Kennlinie einer Francis-Pumpturbine im Pumpbetrieb, so kann ihr Förderhöhenverlauf in Abhängigkeit der Fördermenge wie in Abbildung 2-1 dargestellt werden.

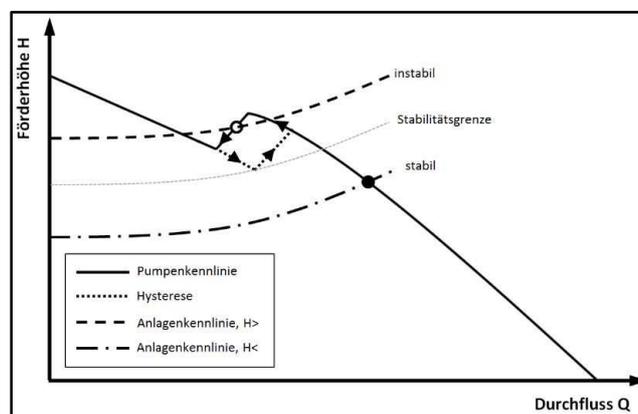


Abbildung 2-1: Kennlinieninstabilität einer Pumpe im Q-H-Diagramm. [8, Abb. 1]

In der dargestellten Kennlinie sind zwei besondere Merkmale zu beobachten: Anders als eine typische Pumpenkennlinie besitzt sie einen Verlauf mit einem "Sattel" und ist einer Hysterese unterworfen. Mit zunehmender Fördermenge ergibt sich ein Förderhöhenverlauf, welcher sich von einem Verlauf mit abnehmender Fördermenge unterscheidet. [9, S. 255]

Im Bereich des Sattels besitzen Anlagenkennlinien mehrere Schnittpunkte mit der Pumpenkennlinie und somit einen nicht eindeutigen Betriebspunkt. In diesem Bereich setzt ein instabiler Betrieb ein. Diese sogenannte Kennlinieninstabilität ist unerwünscht und in der Praxis mit großen Problemen wie z.B. Schwingungen verbunden.

2.1.3 Teillastzirkulation

Der Begriff Teillastzirkulation umfasst mehrere Effekte innerhalb einer Pumpe. Aufgrund der Tatsache, dass dem Fördermedium Energie in Form von Drall zugeführt wird, kommt es bei Teillast zu Wirbelbildung bis hin zu Wirbeln mit Rückströmungen aus dem Laufrad. Besonders halbaxiale und axiale Laufräder sind anfällig für ein dominantes Auftreten. [9, S. 209] Gründe hierfür sind die Ablösung der Strömung (zufolge einer Falschanströmung der Schaufelgeometrie) und starke Druckunterschiede quer zur Hauptströmungsrichtung bei großen Radienunterschieden von der Deck- zur Tragscheibe. [9, S. 222] Diese sogenannten Teillastwirbel bilden sich bei stark verringertem Durchfluss am Laufradein- und austritt und nehmen im Extremfall, bei $Q=0$ den gesamten Strömungsquerschnitt ein. Die zugeführte Energie wird in den Wirbeln vollständig zu Wärme dissipiert. (siehe Abbildung 2-2) Das allgemeine Auftreten von Wirbeln lässt sich wegen der zugrunde liegenden Physik nicht vermeiden, allerdings gilt die Aufmerksamkeit der Auswirkungen dieser Wirbel auf den Betrieb einer hydraulischen Strömungsmaschine.

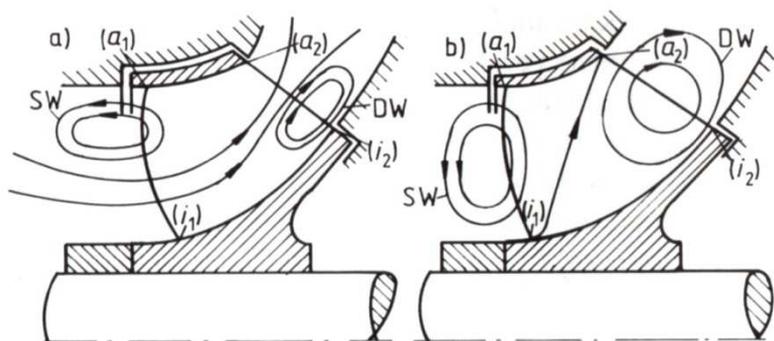


Abbildung 2-2: Teillastwirbel auf Saug- und Druckseite eines halbaxialen Pumpenlaufrades.
SW: Saugwirbel, DW: Druckwirbel. [6, Abb. 259.1]

Wenn man am Laufradeintritt die Rückströmung vom Fördermedium zurück in den Saugstutzen genauer betrachtet, verlässt das Fluid das sich drehende Laufrad mit einer zusätzlichen Umfangskomponente. Diese rotierende Bewegung setzt sich bis in die Zulaufleitung fort und bewirkt einen ungewünschten Vordrall, auch Prerotation genannt. Unter anderem wird die Gefahr für Kavitation erhöht, da der statische Druck sinkt. [6, S. 259]

Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten am Laufradaustritt besitzt besonders starke Auswirkungen auf die Pumpenkennlinie. Die Position des druckseitigen Teillastwirbels kann abhängig von der Meridiankrümmung des Schaufelkanales, der Rotation und der

Schaufelkräfte für verschiedene Betriebspunkte unterschiedlich sein [9, S. 219]. Bei Pumpen mit Leitbeschaufelung ist der Druckrückgewinn entlang dieser Leitschaufeln entscheidend für den Betrieb. Werden die Leitschaufeln beim Auftreten von Teillastwirbeln allerdings nicht korrekt angeströmt, fällt die Druckrückgewinnung wesentlich schwächer aus [9, S. 263].

Das Prinzip der "Selbstheilung" liegt nach Gülich der Überlegung zugrunde, dass sich aufgrund von Rezirkulationen im Bereich der Laufradaustrittskanten und im Leitapparat eine Teilbeaufschlagung der Strömungskanäle einstellt, bei der die Maschine hydraulisch mit passenden Parametern durchströmt wird und somit den Druckrückgewinn bei geringen Durchfluss im Leitapparat verbessert. [9, S. 250] Bei Axialmaschinen wird dieses Prinzip auf die Saugseite ausgedehnt, wo sich am Laufradeintritt eine gesunde Kernströmung ausbildet, welche von Teillastwirbeln umgeben ist (siehe Abbildung 2-3). Die Durchmesser aufteilung der zwei Bereiche sorgt hier dafür, dass eine gedachte, gesunde Stromröhre die Maschine wiederum mit passenden Parametern durchströmt und somit die Kennlinie bei geringen Durchfluss wieder ansteigt. [9, S. 255]

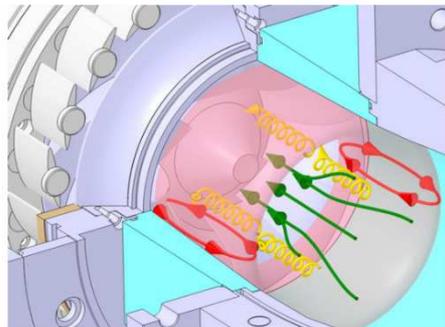


Abbildung 2-3: Hauptströmung (grün) bei Teillastrezirkulation. [5, Abb. 7-1]

Für Pumpturbinen besitzt der zulässige Betriebsbereich in Teillast eine große Bedeutung, da er mit dem erzielbaren Wirkungsgrad im Turbinenbetrieb gekoppelt ist. Es gilt: Je näher man sich dem maximalen Turbinenwirkungsgrad nähert, umso niedriger muss der Durchfluss sein, bei dem sich Instabilitäten im Pumpbetrieb einstellen dürfen. [5, S. 2]

2.1.4 Volllastinstabilität

Das Phänomen der Volllastinstabilität zeigt sich bei der Pumpenkennlinie durch eine Förderhöhenabsenkung, die bei leicht geringerem Durchfluss nahe dem Optimum liegt. Als Ursache können viele Einflüsse genannt werden, hauptsächlich spielt die Interaktion der Strömung mit dem Leitapparat eine große Rolle.

Bei Pumpen dienen die Leitschaufeln, die hinter dem Laufrad angeordnet sind, zur Druckrückgewinnung. Die aus dem Laufrad austretende, beschleunigte Strömung besitzt eine hohe kinetische Energie, welche durch den divergenten Verlauf der Leitschaufelkanäle in Druckenergie umgewandelt wird.

Fluid, das gegen einen steigenden Druckgradienten entlang einer Oberfläche strömt, reagiert sensibel auf Störungen und löst leicht von dieser Oberfläche ab. Die sogenannte Grenzschicht besitzt am Ablösepunkt auf der Oberfläche nicht genug Energie, um den Druckgradienten

überwinden zu können. In weiterer Folge bildet sich eine Ablöseblase und ein damit weiter stromabwärts einhergehender, instationärer Strömungszustand. [10, S. 431]

Aus diesen Überlegungen kann schlussgefolgert werden, dass eine nicht korrekt angeströmte Leitschaufel zu einer abgelösten Strömung führen kann. Dem divergenten Leitschaufelkanal ist es nicht mehr möglich, den gewünschten Druckrückgewinn zu erzielen. Das macht sich in der Pumpenkennlinie als abgeflachte Förderhöhe bemerkbar. [11, S. 5]

In hydraulischen, aber auch in thermischen Strömungsmaschinen wird aufgrund der konstruktiven Gestaltung zusätzlich ein besonderer Effekt beobachtet. Die im Kreis angeordneten Leitschaufelkanäle stehen in Wechselwirkung zueinander. Bildet sich in einem Leitschaufelkanal eine Ablösung, wird nachkommendes Fluid von diesem "versperrten" Kanal abgedrängt und bewirkt beim benachbarten Schaufelkanal ebenfalls eine Ablösung. Der vorherige Kanal arbeitet wieder korrekt. So "wandert" die Ablösung von Schaufelkanal zu Schaufelkanal und verursacht dort instationäre Strömungsverhältnisse. Dieser Effekt wird "Rotating Stall" (dt.: Umlaufende Ablösungen) genannt [9, S. 722] und besitzt hochdynamische Eigenschaften, die zu unerwünschten Einflüssen auf die Maschine führt. Abbildung 2-4 verdeutlicht den Effekt des Rotating Stalls an einem Schaufelgitter.

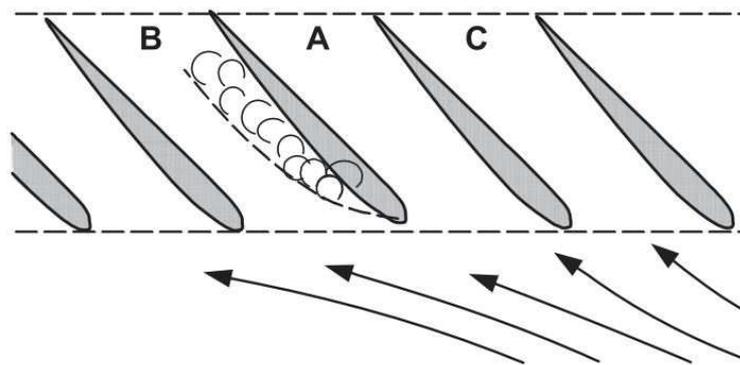


Abbildung 2-4: Rotating Stall an einem Schaufelgitter. [9, Abb. 10.30]

Rotating Stall wird bei Volllastinstabilität von Pumpen beobachtet und hängt eng mit der Falschanströmung der Leitschaufeln zusammen, was wiederum zu einem schlechten Druckrückgewinn, gar Druckverlust, führt. Rezirkulationen am Laufradaustritt und sogar am Laufradeintritt besitzen ebenfalls einen Einfluss, wie die Strömung mit dem Leitapparat interagiert. Da noch keine Teillast per se vorliegt, haben diese Einflüsse nichts mit Teillastwirbeln zu tun. [5, S. 14]

In diesem Kontext soll auch die "Flow Separation" (dt.: "Strömungsteilung") nicht unerwähnt bleiben. Im Leitschaufelkanal kann es zu Geschwindigkeitsverteilungen kommen, die große Unterschiede entlang des betrachteten Querschnittes besitzen. Flow Separation tritt ebenfalls nahe dem Betriebsoptimums auf und wird auch als eine Art Ablöseerscheinung verstanden.

2.2 Fachbegriffe und Kennzahlen für hydraulischer Strömungsmaschinen

2.2.1 Spezifische Drehzahl

Die spezifische Drehzahl n_q berücksichtigt die Nennwerte der Drehzahl n , des Volumenstroms Q und der Förderhöhe H . Ändert sich eine dieser Größen, verändert sich der

Wert der spezifischen Drehzahl und in weiterer Folge die Form des Laufrades, wie in Abbildung 2-5 am Beispiel eines Pumpenlaufrades zu sehen ist. Sie wird oftmals auch als Radformkennzahl oder Schnellläufigkeit bezeichnet und ist eine der wichtigsten Größen bei Strömungsmaschinen, da sie bei der Auslegung mit der Laufradform auch das Maschinenkonzept bestimmt. Die Größe ist dimensionsbehaftet, besitzt die Einheit einer Drehzahl und kann aus den Ähnlichkeitsgesetzen hergeleitet werden. [6, S. 100] [12, S. 78]

$$n_q := n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (2.1)$$

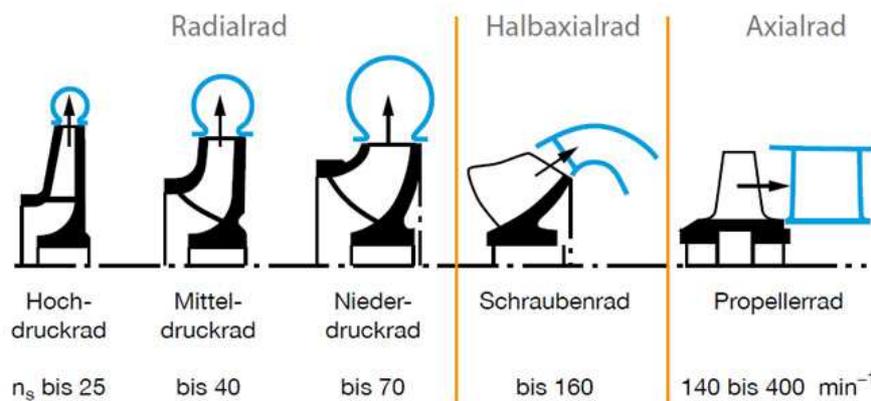


Abbildung 2-5: Einfluss der spezifischen Drehzahl (hier n_s) auf die Laufradgeometrie von Pumpen [13]

2.2.2 Druckziffer, Durchflussziffer

Für den Vergleich unterschiedlicher Maschinen dienen dimensionslose, auf charakteristische Werte bezogene Kennzahlen. Die Druckziffer ψ stellt die spezifische Arbeit $g \cdot H$ und die Umfangsgeschwindigkeit in Form von kinetischer Energie am Laufradaußendurchmesser ins Verhältnis. Ähnlich dazu bezieht die Durchflussziffer φ den Durchfluss der Maschine auf die Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaußendurchmesser $d_{2,a}$ und eine äquivalent große Fläche. [6, S. 93, 97] [12, S. 58] Die Wahl der Umfangsgeschwindigkeit als Bezug berücksichtigt die Drehzahl der Maschine.

$$\psi := \frac{g \cdot H}{\frac{u_{2,a}^2}{2}} \quad (2.2)$$

$$\varphi := \frac{Q}{\frac{d_{2,a}^2 \cdot \pi / 4}{u_{2,a}}} \quad (2.3)$$

2.3 Begriffe in der Strömungsmechanik

2.3.1 Reynoldszahl

Die Reynoldszahl ist eine sehr wichtige dimensionslose Kennzahl in der Strömungsmechanik, die Trägheitskräfte und Zähigkeitskräfte in einem Fluid ins Verhältnis setzt:

$$Re_L = \frac{U * L}{\nu} \quad (2.4)$$

Sie wird gebildet mit der Strömungsgeschwindigkeit U , einer für die Strömung charakteristischen Länge L und der kinematischen Viskosität ν . Bei niedrigen Werten dieser Kennzahl dürfen Zähigkeitskräfte nicht vernachlässigt werden und erfordern eine Rechnung, die Reibung im Fluid berücksichtigt. In Abhängigkeit der Strömungssituation liegen unterschiedliche Wertebereiche der Kennzahl vor, bei denen zwischen laminar, turbulent und einem Übergangsbereich unterschieden wird.

2.3.2 Geschwindigkeitsfeld

Bezeichnet man in einem kartesischen Koordinatensystem die drei Komponenten der Geschwindigkeit eines Massenpunktes mit u , v und w , so kann für jeden Punkt im Raum ein Geschwindigkeitsvektor \vec{v} aufgestellt werden. Liegt eine Fluidströmung im Raum vor, können Kurven gefunden werden, welche zu jedem Geschwindigkeitsvektor tangential sind. Diese Kurven werden Stromlinien genannt. Da es sich bei den Geschwindigkeitsvektoren hier mathematisch um ein Vektorfeld handelt, können Differentialoperatoren wie der Gradient, die Divergenz und die Rotation darauf angewendet werden.

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Im Gegensatz dazu können für einen Massenpunkt zu jedem Zeitpunkt Koordinaten angegeben werden, an dem sich der Massenpunkt gerade befindet. Legt man durch diese Positionen eine Kurve, erhält man die sogenannte Bahnlinie. Im allgemeinen Fall unterscheiden sich Strom- und Bahnlinie, in einer stationären, laminaren Strömung stimmen sie überein.

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3.3 Rotation eines Vektorfeldes, Wirbelstärke

Die Rotation eines Vektorfeldes ist definiert als

$$rot(\vec{v}) := \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \times \vec{v} = \nabla \times \vec{v} = \vec{\omega} \quad (2.7)$$

und wird im Zusammenhang mit Wirbeln in Strömungsfeldern auch als "Vorticity", "Curl" oder Wirbelstärke bezeichnet. Das üblicherweise verwendete Formelzeichen für den resultierenden Vektor ist $\vec{\omega}$. Oftmals wird auch die halbe Rotation für den Wirbelvektor definiert. [14, S. 78] Wird die Rotation auf ein zweidimensionales Geschwindigkeitsfeld

angewendet, steht der Vektor normal zu beiden Geschwindigkeitskomponenten. Der Betrag der Wirbelstärke entspricht der doppelten Winkelgeschwindigkeit des Wirbels, das Vorzeichen gibt Auskunft über die Drehrichtung. [15, S. 8] Der Differentialoperator Nabla (∇) steht für die partiellen Ableitungen in jede Richtung der hier verwendeten kartesischen Koordinaten.

2.3.4 Zirkulation

Bei der Zirkulation wird die Geschwindigkeitskomponente tangential zu einer geschlossenen Kontur C integriert, so wie es in Abbildung 2-6 dargestellt ist.

$$\Gamma = \oint_C \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (2.8)$$

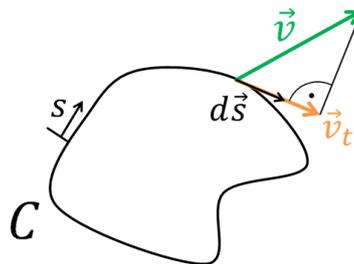


Abbildung 2-6: Bildung der Zirkulation entlang einer geschlossenen Kontur C

Mithilfe des Stokeschen Integralsatzes kann die Zirkulation auch als Fluss der Wirbelstärke durch eine Fläche A interpretiert werden [16, S. 233]:

$$\Gamma = \int_A \vec{\omega} \cdot d\vec{A} = \int_A \vec{\omega} \cdot \vec{n} \, dA \quad (2.9)$$

Die Skizze dazu ist in Abbildung 2-7 zu finden.

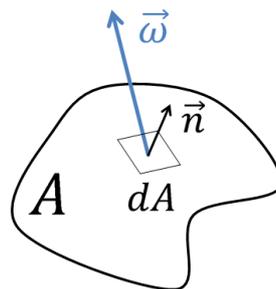


Abbildung 2-7: Bildung der Zirkulation auf einer geschlossenen Fläche A

Wobei \vec{n} den Einheitsvektor normal zur differentiellen Fläche dA darstellt. Somit ist die Wirbelstärke eine flächenbezogene Zirkulation.

2.4 Wirbelsätze

2.4.1 Croccos Wirbelsatz

Mit dem Croccoschen Wirbelsatz wird die Beziehung zwischen thermodynamischen Größen und dem Verhalten von Strömungen hergestellt.

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für geschlossene, ruhende Systeme im Gleichgewicht, die nur Druckkräfte und reversiblen Wärmeübergang über die Systemgrenze zulassen, kann folgender fundamentale Zusammenhang angegeben werden: [14, S. 20]

$$\delta q_{rev} = T ds = du + pdv = dh - vdp \quad (2.10)$$

Mit spezifischer Enthalpieänderung dh , spezifischer Entropieänderung ds , Änderung der spezifischen inneren Energie du sowie Druckänderung dp und spezifischer Volumenänderung dv . Die absolute Temperatur wird mit T bezeichnet.

Die Änderung der spezifischen Größen in Gleichung (2.10) können als Gradienten verstanden werden. Die Dichte wird als Kehrwert des spezifischen Volumens angeschrieben:

$$T \cdot grad(s) = grad(h) - \frac{1}{\rho} \cdot grad(p) \quad (2.11)$$

Geht man für die folgenden Überlegungen von einer reibungsfreien Strömung aus, in der nur Druck- und Massenkräfte auftreten, kann die Eulersche Impulsgleichung herangezogen werden, die für den räumlichen Fall folgende Form aufweist: [14, S. 114]

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{f}_F + \vec{f}_p = -grad(\Phi) - \frac{1}{\rho} \cdot grad(p) \quad (2.12)$$

Die spezifischen Massen- und Druckkräfte \vec{f}_F und \vec{f}_p können in Form von „Gradienten von Skalarfeldern“ (= Potentialfeldern) angeschrieben werden. Φ stellt ein konservatives Kraftpotential dar, wie zum Beispiel für das Schwerfeld der Erde, und p ein Druckfeld.

Ähnlich lässt sich eine substantielle Ableitung der Geschwindigkeit aus kinematischen Betrachtungen finden [14, S. 73] :

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot grad(\vec{v}) \quad (2.13)$$

Mithilfe von Beziehungen aus der Tensoranalysis lässt sich $\vec{v} \cdot grad(\vec{v})$ in obiger Formel anders darstellen [14, S. 74]:

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot grad(\vec{v}) = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + grad\left(\frac{\vec{v}^2}{2}\right) - (\vec{v} \times rot(\vec{v})) \quad (2.14)$$

Nutzt man nun Gleichung (2.12) und (2.14) gemeinsam, kann für den Druckgradienten ein neuer Ausdruck gewonnen werden:

$$-\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - (\vec{v} \times \text{rot}(\vec{v})) + \text{grad}(\Phi) + \text{grad}\left(\frac{\vec{v}^2}{2}\right) \quad (2.15)$$

Setzt man Gleichung (2.11) in (2.15) ein, erhält man:

$$T \cdot \text{grad}(s) = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - (\vec{v} \times \text{rot}(\vec{v})) + \text{grad}\left(h + \Phi + \frac{\vec{v}^2}{2}\right) \quad (2.16)$$

Bei reibungsfreier Strömung ohne Wärmeübergang (adiabat) wird der Ausdruck ganz rechts in Gleichung (2.16) zu null, denn der „Inhalt“ des Gradienten $\left(h + \Phi + \frac{\vec{v}^2}{2}\right)$ nimmt einen konstanten Wert an. Man spricht von isoenergetischer Strömung. Der Term $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$ fällt bei einer stationären Betrachtung weg. Man erhält:

$$T \cdot \text{grad}(s) = (\vec{v} \times \text{rot}(\vec{v})) = \vec{v} \times \vec{\omega} \quad (2.17)$$

Der so hergeleitete Crocco-Wazsonyische Wirbelsatz [17, S. 116] kann nun genauer untersucht werden.

Für drei Fälle wird der rechte Ausdruck zu null und es entsteht eine Strömung ohne Entropiegefälle:

- Fall 1: $\vec{v} = \vec{0}$... trivialer Fall
- Fall 2: $\vec{\omega} = \text{rot}(\vec{v}) = \vec{0}$... wirbelfreie Strömung
- Fall 3: $\vec{v} \parallel \vec{\omega}$... sog. „Beltrami-Strömung“

Auf Fall 1 und 3 wird nicht näher eingegangen. Man sieht bei Fall 2, dass die Entropie entlang einer Stromlinie konstant bleiben muss, für die stets $\vec{v} \times d\vec{s} = \vec{0}$ gilt. [14, S. 68]

Somit kann gefolgert werden, dass wirbelbehaftete Strömungen einer Entropieänderung von Stromlinie zu Stromlinie unterworfen sind und diese Entropieänderung in weiterer Folge mit der Erzeugung von Wirbeln verbunden ist.

2.4.2 Helmholtzsche Wirbelsätze

Wie auch bei der Definition von Stromlinien können in wirbelbehafteter Strömung Wirbellinien definiert werden, die tangential zu den Wirbelvektoren liegen: [10, S. 69]

$$\text{rot}(\vec{\omega}) = \nabla \times \vec{\omega} = \nabla \times \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \vec{0} \quad (2.18)$$

Das heißt:

$$\frac{dx}{\omega_x} = \frac{dy}{\omega_y} = \frac{dz}{\omega_z} \quad (2.19)$$

In weiterer Folge kann man eine Wirbelröhre (auch Wirbelfaden genannt) bilden, die aus einem Bündel von Wirbellinien besteht. Außerhalb dieser Röhre ist die Strömung drehungsfrei. [17, S. 125] Die drei Helmholtz'schen Sätze behandeln das Verhalten der Zirkulation einer solchen Wirbelröhre und werden in der Literatur oftmals als "räumliche und zeitliche Erhaltungseigenschaften der Zirkulation" bezeichnet. Eine Aussage über die Zuordnung der Masseteilchen zu den Wirbellinien wird ebenfalls getätigt: [15, S. 17,18] [17, S. 124]

- Satz 1: zeitlicher Erhaltungssatz
- Satz 2: Materielle Eigenschaft der Wirbellinie
- Satz 3: räumlicher Erhaltungssatz

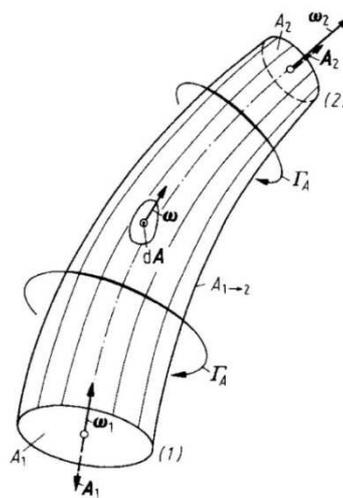


Abbildung 2-8: Wirbelröhre mit Querschnitten A1 und A2 und infinitesimale Fläche dA auf der Röhrenoberfläche. [17, Abb. 5.6]

Um die Aussagen der drei Wirbelsätze gut nachvollziehen zu können, bietet es sich an, mit dem räumlichen Erhaltungssatz (Satz 3) zu beginnen. Allen Sätzen liegen die Annahmen zugrunde, dass es sich um eine reibungsfreie Strömung handelt, die barotrop ist und nur unter dem Einfluss einer Volumenkraft steht, die ein Potential aufweist. Diese Annahmen werden in Kapitel 2.4.3 detailliert erklärt und behandelt.

2.4.2.1 Räumlicher Erhaltungssatz

Unter Verwendung der Zirkulation gilt für die Wirbelröhre in Abbildung 2-8 an der Fläche 1 folgende Aussage: (Die Rotation $\vec{\omega}$ sei über die Querschnitte gleichmäßig verteilt, die Zeit ist festgehalten) [17, S. 125]

$$\Gamma_1 = \int_{A_1} \vec{\omega}_1 \cdot d\vec{A}_1 = -\omega_1 \cdot A_1 \quad (2.20)$$

Analog dazu kann für Fläche 2 und für die Mantelfläche der Stromröhre dieselbe Aussage getätigt werden. Für die Mantelfläche zwischen den Flächen 1 und 2 stellt sich allerdings heraus, dass alle betrachteten Wirbelvektoren senkrecht zum Normalvektor der Fläche dA

stehen und somit das Flächenintegral über den Mantel zu null wird. Entlang der Wirbelröhre gilt nun:

$$\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 = -\omega_1 \cdot A_1 + \omega_2 \cdot A_2 = 0 \quad (2.21)$$

Der dritte Helmholtzsche Wirbelsatz kann somit angeschrieben werden:

$$\Gamma = \omega \cdot A = \text{konst.} \quad (2.22)$$

Bei festgehaltener Zeit ist die Zirkulation entlang einer Wirbelröhre konstant. Wird die Wirbelröhre gestaucht und ihr Querschnitt nimmt zu, verringert sich die Wirbelstärke und umgekehrt.

Liegt eine Wirbelröhre vor, darf sie nur an einer Wand/Oberfläche enden oder einen Ring bilden. Die Wirbelröhre kann nicht im freien Strömungsfeld enden oder beginnen, weil an jedem beliebigen Querschnitt die Zirkulation den selben Wert besitzen muss. [15, S. 18], [17, S. 125] [10, S. 69]

2.4.2.2 Zeitlicher Erhaltungssatz

Der zeitliche Erhaltungssatz sagt aus, dass Fluidelemente ohne Rotationsbehaftung für alle Zeitpunkte rotationsfrei bleiben. Im Umkehrschluss und auch mit den gefundenen Beziehungen aus dem räumlichen Erhaltungssatz (siehe oben) kann für wirbelbehaftete Teilchen gesagt werden, dass sie für alle Zeiten der gleichen Wirbellinie (und auch zur gleichen Wirbelröhre) angehören. [17, S. 127]

Der Beweis stützt sich zu einem Teil auf den Kelvinschen Wirbelsatz [15, S. 17], welcher in Kapitel 2.4.3 zu finden ist.

2.4.2.3 Materielle Eigenschaft der Wirbellinie

Helmholtz hat bewiesen, dass Teilchen auf einer Wirbellinie immer zur gleichen Wirbellinie gehören. [17, S. 126] Eine Wirbelröhre besitzt eine Röhrenoberfläche, die aus Wirbellinien gebildet wird. Betrachtet man einen Teil dieser Röhrenoberfläche und ihren Normalvektor, steht dieser immer senkrecht auf die Wirbelvektoren. Die Zirkulation entlang einer Kontur auf dieser Fläche ergibt sich zu null. Dem Kelvinschen Wirbelsatz zufolge bleibt diese Eigenschaft für alle Teilchen auf dieser Röhrenoberfläche zeitlich erhalten, somit besteht die Röhrenoberfläche auch später aus den selben Teilchen. Schneidet man nun zwei solche Röhrenoberflächen, ergibt sich eine Wirbellinie und es gelten die getätigten Aussagen auch für die Wirbellinie. [15, S. 17]

2.4.3 Kelvinscher Wirbelsatz

Der Kelvinsche Wirbelsatz gibt Auskunft über die Änderung der Zirkulation über der Zeit und soll hier hergeleitet werden. Ausgang hierfür ist der Reynoldssche Transportsatz, welcher für Kurvenintegrale und vektorwertige Funktionen formuliert werden muss:

$$\frac{D}{Dt} \oint_c \vec{f} \cdot d\vec{s} = \oint_c (\dot{\vec{f}} + \vec{f} \cdot \text{grad}(\vec{v})) d\vec{s} \quad (2.23)$$

D/Dt bezeichnet die substantielle Ableitung, \vec{f} eine transportierte, vektorwertige Funktion. Die Integration erfolgt über eine geschlossene Kontur c entlang des vektoriellen Kurvenstücks $d\vec{s}$, für welches in kartesischen Koordinaten gilt:

$$d\vec{s} = \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Die Zirkulation ist, wie bereits definiert, das Ringintegral über eine geschlossene Kontur c der Geschwindigkeit tangential zur Kontur:

$$\Gamma = \oint_c \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (2.25)$$

Setzt man diese Definition in den Reynoldsschen Transportsatz ein und wendet die Produktregel auf den Vektorgradienten an, kommt man zu:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= \frac{D\Gamma}{Dt} = \frac{D}{Dt} \oint_c \vec{v} \cdot d\vec{s} = \oint_c (\dot{\vec{v}} + \vec{v} \cdot \text{grad}(\vec{v})) d\vec{s} = \\ &= \oint_c \left(\dot{\vec{v}} + \frac{1}{2} \text{grad}(\vec{v} \cdot \vec{v}) \right) d\vec{s} \end{aligned} \quad (2.26)$$

Mit dem Satz von Stokes [16, S. 233] kann das Ringintegral in ein Flächenintegral überführt werden, indem die Rotation der vektoriellen Größe gebildet wird. Die Integrationsfläche A entspricht der eingeschlossenen Fläche der geschlossenen Kontur c . Die Rotation eines Gradientenfeldes ergibt sich zu immer zu null:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= \oint_c \left(\dot{\vec{v}} + \frac{1}{2} \text{grad}(\vec{v} \cdot \vec{v}) \right) d\vec{s} = \int_A \text{rot} \left(\dot{\vec{v}} + \frac{1}{2} \text{grad}(\vec{v} \cdot \vec{v}) \right) d\vec{A} \\ &= \int_A \text{rot}(\dot{\vec{v}}) d\vec{A} + \int_A \underbrace{\text{rot} \left(\frac{1}{2} \text{grad}(\vec{v} \cdot \vec{v}) \right)}_{=\vec{0}} d\vec{A} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Somit ergibt sich die zeitliche Änderung der Zirkulation aus dem Flächenintegral der Rotation der Geschwindigkeitsänderung. Die substantielle Ableitung $\dot{\vec{v}}$ wird nun näher betrachtet. Die

aus der Impulsgleichung gewonnenen Navier-Stokes-Gleichungen für ein allgemeines, newtonsches Fluid geben darüber Auskunft: [18, S. 14]

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \rho \cdot \dot{\vec{v}} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \rho \cdot \vec{f}^B \quad (2.28)$$

Für die Dichte ρ wurden noch keine Annahmen getroffen. Der Nabla-Operator auf den Druck angewendet kann auch als Divergenz des Druckes verstanden werden. Mit μ wird die dynamische Viskosität des Fluides bezeichnet, Delta stellt den vektoriellen Laplace-Operator dar, \vec{f}^B die Volumenkraftdichte. (Kraft pro Volumen) Setzt man die Gleichung (2.28) in die Gleichung (2.27) ein, entsteht:

$$\begin{aligned} \dot{\Gamma} &= \int_A \text{rot}(\dot{\vec{v}}) d\vec{A} = \int_A \text{rot} \left(-\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} + \vec{f}^B \right) d\vec{A} = \\ &= - \int_A \text{rot} \left(\frac{\nabla p}{\rho} \right) d\vec{A} + \int_A \text{rot} \left(\frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v} \right) d\vec{A} + \int_A \text{rot}(\vec{f}^B) d\vec{A} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Man kann die drei Ausdrücke auf der rechten Seite der Gleichung folgendermaßen interpretieren: Der erste Ausdruck stellt den Einfluss des Druckes dar. Ist das vorliegende Fluid barotrop, das heißt die Dichte hängt nur vom Druck ab, ergibt sich der Term zu null:

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\rho(p)} \cdot \nabla p \right) = \frac{1}{\rho(p)} \cdot \underbrace{\text{rot}(\nabla p)}_{=\vec{0}} + \nabla \underbrace{\frac{1}{\rho(p)}}_{=\vec{0}} \times \nabla p = \vec{0} \quad (2.30)$$

Der zweite Term berücksichtigt den Einfluss von Viskosität. Wirbel in einem reibungsbehafteten Fluid werden mit der Zeit schwächer, bis sie vollständig dissipiert sind. Für die Annahme von reibungsfreien Fluiden wird dieser Term vernachlässigt.

Der dritte Term behandelt Volumenkräfte, die auf das Fluid wirken. Bei konservativen Kräften kann die Volumenkraft auch als Gradient eines Potentials verstanden werden, wie es auch bei Schwerkraft und Zentrifugalkraft der Fall ist. [14, S. 58] Somit ist erneut die Rotation des Gradientenvektors null. Corioliskräfte sind nicht-konservativ, Fluidteilchen können so über die Zeit innerhalb einer Fläche A mit der geschlossenen Kontur C eine Änderung an Zirkulation erfahren.

Es kann nun mit den gefundenen Aussagen der Kelvinsche Wirbelsatz formuliert werden: [15, S. 15]

In einer barotropen, nur konservativen Kraftfeldern ausgesetzten und reibungsfreien
Strömung ist die Zirkulation entlang einer geschlossenen Kontur C konstant.

2.5 Ausgewählte Methoden zur analytischen Bestimmung von Wirbeln

Unter vielen Umständen kann die Definition eines Wirbels unterschiedlich sein. Obwohl eine allgemeine Vorstellung eines Wirbels als rotierende Fluidmasse reicht, gibt es mathematisch unterschiedliche, für die einzelnen Anwendungen zweckmäßige Definitionen. Alle der unten angeführten Kriterien/Methoden nutzen das Geschwindigkeitsfeld als Grundlage für die mathematische Betrachtung, allerdings findet man in der Literatur auch andere Herangehensweisen. [19, S. 21f] Die PIV-Auswertung in Dantec Dynamic Studio erlaubt es, die angeführten Kriterien anzuwenden. In der vorliegenden Arbeit werden sie nur der Vollständigkeit halber behandelt, könnten aber für weiterführende Untersuchungen in Zukunft von Interesse sein. Kolář [20] sowie Holm [19] stellen die Methoden umfassend vor.

2.5.1 Geschwindigkeitsgradiententensor

Um zwischen Verformung und Rotation eines Fluidteilchens zu unterscheiden, wird der Geschwindigkeitsgradiententensor $\nabla\vec{u}$ herangezogen. Er wird in einen (der Deformation geschuldeten) symmetrischen Teil \underline{S} und in einen (der Rotation geschuldeten) schiefsymmetrischen Teil $\underline{\Omega}$ unterteilt: [21, S. 38] [19, S. 13] [2, S. 261]

$$\nabla\vec{u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} := \underline{S} + \underline{\Omega} \quad (2.31)$$

Mit:

$$\underline{S} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T) \quad (2.32)$$

und

$$\underline{\Omega} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{u} - \nabla\vec{u}^T). \quad (2.33)$$

Möchte man die Eigenwerte des Geschwindigkeitsgradiententensors bilden, so lautet das charakteristische Polynom mit den definierten, sogenannten Invarianten P, Q und R:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (2.34)$$

(Das Eigenwertproblem lautet: $\underline{A} \cdot \vec{x} = \lambda \cdot \vec{x}$, beziehungsweise: $(\underline{A} - \lambda \underline{E}) \cdot \vec{x} = 0$)

Die drei Invarianten werden folgendermaßen gebildet; Sie sind für die folgenden Methoden zur Wirbelidentifikation maßgeblich.

$$P = -tr(\nabla\vec{u}) \quad (2.35)$$

$$Q = \frac{1}{2}[tr(\nabla\vec{u})^2 - tr(\nabla\vec{u}^2)] \quad (2.36)$$

$$R = -\det(\nabla\vec{u}) \quad (2.37)$$

Die Determinante der Matrix wird mit $\det()$ formuliert und mit $tr()$ die Spur der Matrix. Geht man von inkompressibler Strömung aus, vereinfacht sich das charakteristische Polynom zur folgenden Gleichung: [20, S. 640]

$$\lambda^3 + Q\lambda - R = 0 \quad (2.38)$$

2.5.2 Q-Kriterium

Dieses Kriterium nach Hunt et al. [22] betrachtet die zweite Invariante des Geschwindigkeitsgradiententensors unter der Bedingung, dass sie positiv ist:

$$Q = \frac{1}{2}[tr(\nabla\vec{u})^2 - tr(\nabla\vec{u}^2)] > 0 \quad (2.39)$$

So kann (bei inkompressibler Strömung) bei Erfüllung dieser Bedingung eine Aussage getroffen werden, ob der Rotationsanteil des Geschwindigkeitsgradiententensors gegenüber dem Deformationsanteil dominiert. Eine weitere Bedingung setzt voraus, dass im Bereich des Wirbels ein Druck herrschen muss, der niedriger als der Umgebungsdruck ist.

2.5.3 Swirling Strength

Für das Kriterium der Swirling Strength wird vorher das Δ -Kriterium benötigt. Die hier getätigte Definition eines Wirbels gibt vor, dass die Eigenwerte des Geschwindigkeitsgradiententensors komplex sein müssen. Weitere Bedingungen bezüglich der Stromlinien (welche spiralförmig oder geschlossen sein müssen) liegen ebenfalls vor. Kompressible Strömungen unterliegen laut dem Δ -Kriterium nach Dallmann [23], Vollmers et al. [24] und Chong et al. [25] folgender Bedingung für die zweite und dritte Invariante des Geschwindigkeitsgradiententensors:

$$\Delta = \left(\frac{Q}{3}\right)^3 + \left(\frac{R}{2}\right)^2 > 0 \quad (2.40)$$

Mit dem Kriterium der Swirling Strength nach Zhou et al. [26] kann man die Wirbelposition, die Wirbelstärke und die Wirbelorientierung feststellen. Man nützt wie vorhin die komplexen Eigenwerte des Geschwindigkeitsgradiententensors und spaltet sie mit den zugehörigen Eigenvektoren derart auf, dass die folgende Anschreibweise verwendet werden kann: [26, S. 361]

$$\nabla \vec{u} = (\vec{v}_r \quad \vec{v}_{cr} \quad \vec{v}_{ci}) \begin{pmatrix} \lambda_r & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{cr} & \lambda_{ci} \\ 0 & -\lambda_{ci} & \lambda_{cr} \end{pmatrix} (\vec{v}_r \quad \vec{v}_{cr} \quad \vec{v}_{ci})^T \quad (2.41)$$

Die reellwertigen und konjugiert komplexen Eigenwerte λ und -vektoren \vec{v} werden für die Darstellung verwendet: (Subindizes: r...reellwertig, cr...Realteil vom komplexen Term, ci...Imaginärteil vom komplexen Term)

$$\lambda_c = \lambda_{cr} \pm \lambda_{ci} \cdot i \quad (2.42)$$

$$\vec{v}_c = \vec{v}_{cr} \pm \vec{v}_{ci} \cdot i \quad (2.43)$$

Der reellwertige Eigenvektor mit dem dazugehörigen Eigenwert bestimmt die Richtung, in welche der Wirbel gestreckt oder gestaucht wird. Die Ebene, die mit den zwei Komponenten den komplexwertigen Eigenvektor aufgespannt wird, gibt Rückschluss auf die Drehung des Fluides. Bei noch detaillierterer Betrachtung kann durch die Größe des imaginären Anteils λ_{ci} des komplexen Eigenwertes die "Stärke des Wirbelns" (engl.: Swirling Strength) abgelesen werden. [26, S. 361]

2.5.4 λ_2 -Kriterium

Dieses Kriterium fordert für einen Wirbel, dass ein lokales Druckminimum vorherrscht. Um den Effekt von Scherung nicht mit Wirbeln zu verwechseln, werden diese Einflüsse (Viskosität und unstetige Dehnung, die nicht zufolge von Rotation entsteht) in der von Jeong und Hussain [27] aufgestellten Transportgleichung für die Dehnungsrate vernachlässigt. Inkompressible Fluide mit den getroffenen Annahmen besitzen dort einen Wirbel, wo sie der Bedingung von zwei negativen Eigenwerten des Ausdrucks

$$\underline{S}^2 + \underline{\Omega}^2 \quad (2.44)$$

genügen. Da der Tensor (2.44) symmetrisch ist, besitzt er im dreidimensionalen Raum drei reelle Eigenwerte. Bei einer Sortierung der resultierenden Eigenwerte nach Größe muss für das Kriterium eines vorliegenden Wirbels $\lambda_2 > 0$ sein, wenn für die Indizierung in (2.45) gilt: [20, S. 640]

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad (2.45)$$

3 Strömungsmesstechnik: Particle Image Velocimetry

3.1 Grundlagen zu PIV

Particle Image Velocimetry zählt zu den optischen Messmethoden, die es erlaubt, eine Geschwindigkeitsfeldmessung durchzuführen. [28] Die Fluidströmung wird mit Partikeln versetzt, welche einfallendes Licht (in den meisten Fällen von einem Laser zur Verfügung gestellt) derart streuen, dass es von einer Kamera aufgenommen werden kann.

Für eine einzige PIV-Messung wird der "Lichtschnitt" [29], welcher von der Lichtquelle und einer Optik aufgespannt wird, nicht dauerhaft, sondern in zwei Pulsen ausgesendet. Es entstehen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten Aufnahmen der beleuchteten Partikel in der Strömung. Beide aufgenommenen Bilder werden auch als "Doppelbild" bezeichnet. Unterteilt man nun diese Bilder in kleine Ausschnitte, sogenannte Interrogation Areas (kurz "IA"), erhält man mit Hilfe der mathematischen Methode der Kreuzkorrelation einen mittleren Verschiebeweg der Partikel. Mit der verstrichenen Zeit zwischen den beiden Lichtpulsen findet man mit der fundamentalen Beziehung zwischen Weg und Zeit die Geschwindigkeit. [30, Abschn. 4–1]

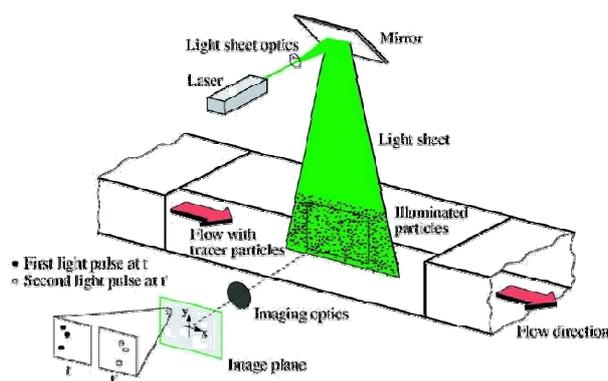


Abbildung 3-1: Grundaufbau einer Particle Image Velocity. [31]

Wird während des Messvorganges nur ein Bild aufgenommen, welches dafür für die gesamte Belichtungsdauer Streulicht der Partikel einfängt, entsteht ein "particle streak image" (dt.: Partikel-Streichbild) [2, S. 5] Das hier für die Auswertung notwendige Verfahren, um ein Geschwindigkeitsfeld zu erstellen, wird Autokorrelation bezeichnet. Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Vor dem Messvorgang werden bereits wichtige Parameter gewählt, die für die spätere Auswertung kritisch sind. Zu diesen Parametern zählen unter anderem die Größe der Interrogation Areas und die Zeit zwischen zwei Lichtpulsen. (engl.: "time between pulses") Ausgewählte Parameter werden in Kapitel 3.2.4 erläutert.

3.2 Messung und Equipment

3.2.1 Tracerpartikel, Folgevermögen und Lichtstreuung

Die zu untersuchende Fluidströmung liefert ohne mitgeführte Tracerpartikel keine praktisch auswertbare Information für das PIV-Verfahren. Der Vorgang des Einbringens von Tracerpartikeln in ein Medium wird "Seeding" genannt (engl.: Aussähen), deshalb wird oftmals auch der Begriff Seedingpartikel verwendet. Mit Seeding ist auch die Gesamtheit aller eingebrachten Partikel gemeint. Im Kontext der PIV wird keine zeitliche, eindeutige Zuordnung individueller Tracerpartikel durchgeführt. Die Messtechnik der Particle Tracking Velocimetry (kurz: PTV) bedient sich an diesem Prinzip. Bei PIV steht allerdings nicht der Tracerpartikel im Vordergrund, sondern das Seeding des Mediums. [29, S. 13]

Tracerpartikel müssen bezüglich des Strömungsfeldes einerseits ein gutes Folgevermögen aufweisen, andererseits müssen sie imstande sein, einfallendes Licht wirkungsvoll zu streuen, um von der Kamera aufgenommen zu werden.

Das Folgevermögen der Tracerpartikel gibt vor, inwiefern das entstandene Geschwindigkeitsfeld auf das tatsächliche Geschwindigkeitsfeld der Strömung übertragbar ist. Ist ein Schlupf \vec{u}_s zwischen Partikel und umgebender Strömung vorhanden, kann er folgendermaßen dargestellt werden: [2, S. 34] [32, S. 12]

$$\vec{u}_s = \vec{u}_p - \vec{u} = d_p \cdot \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} \cdot \vec{a} \quad (3.1)$$

\vec{u}_p bezeichnet die Partikelgeschwindigkeit, d_p den Partikeldurchmesser, μ die dynamische Viskosität des Fluides, ρ_p die Partikeldichte, ρ die Fluidichte und \vec{a} die konstante Beschleunigung des Fluides.

Die Darstellung beruht auf der Annahme eines kugelförmigen Partikels, welches unter dem Einfluss von Stokeschen Widerstandskräften steht, da die niedrige Relativgeschwindigkeit zwischen Fluid und Partikel ein laminares Strömungsregime vorgibt.

Untersucht man den (eindimensionalen) Geschwindigkeitsverlauf bei einer sprunghaften Änderung der Beschleunigung, kann ein exponentieller Zusammenhang über die Zeit festgestellt werden:

$$U_p = U \cdot \left[1 - \exp\left(-t \cdot \frac{18\mu}{d_p^2 \cdot \rho_p}\right) \right] \quad (3.2)$$

Man kann aus Formel (3.1) und (3.2) folgende Beziehungen feststellen: Steigen sowohl Partikeldurchmesser als auch Dichtedifferenz ($\rho_p - \rho$), ergibt sich ein größerer Schlupf und mit großem ρ_p und d_p^2 auch eine längere Zeitspanne, bis der Tracerpartikel nach einer Beschleunigungsänderung mit angepasster Geschwindigkeit antwortet. [32, S. 14].

Bei PIV ist eine gleichmäßige Partikelverteilung im Fluid gewünscht. Berücksichtigt man zusätzlich den Einfluss von Fliehkräften, kann es beispielsweise bei einem stationären Wirbel in der Strömung zu Problemen kommen, da die Teilchenverteilung sich entsprechend der Fliehkräfte einstellen wird und Partikel nach außen wandern werden. (Sofern die Dichte des Partikelwerkstoffes größer ist als die des Mediums) [2, S. 38]

Das Ziel bei der Wahl geeigneter Tracerpartikel ist für alle Einflüsse, die das Folgevermögen betreffen, Stoffe mit ähnlicher Dichte des Fluides zu verwenden und die Partikelgröße klein zu halten.

Dem gegenüber steht die Wahl der Partikelgröße aufgrund des Streuvermögens. Eine beliebig kleine Partikelgröße ist für PIV nicht möglich. Es verbessert sich zwar das Folgevermögen des Partikels in der Strömung, allerdings ist die ausreichende Streuung von Licht für die Bildaufnahme nicht mehr gegeben. Das Streuvermögen eines Partikels wird im Bereich der Mie-Streuung in Abbildung 3-2 dargestellt. Mie-Streuung ist unter anderem für Teilchen in der Größenordnung der Wellenlänge des einfallenden Lichts relevant und gibt Auskunft über die Intensität des gestreuten Lichts abhängig vom Winkel. [33, S. 7]

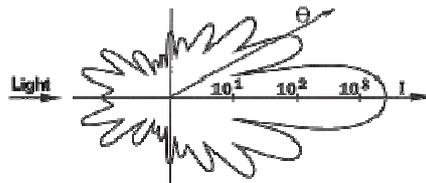


Abbildung 3-2: Mie-Streuung von Licht an einem Partikel. [34]

Zusammenfassend muss für eine PIV-Messung ein Kompromiss zwischen Größe und Dichte bei der Wahl der Tracerpartikel gefunden werden.

3.2.2 Laser und Lichtschnitt

Der benötigte Lichtschnitt, welcher die Messebene für das PIV-Verfahren aufspannt, muss die Eigenschaft besitzen, Licht in hoher Energiedichte bereitzustellen, wofür sich Laserlichtquellen sehr gut eignen. Laserlicht ist zudem monochromatisch, das heißt, es wird nur Licht mit einer Wellenlänge emittiert.

Die Funktionsweise von Laserlichtquellen basiert auf der Tatsache, dass Atome mithilfe von Photonen auf gewisse Energieniveaus gehoben werden können. Diese Energie für eine "Anregung" kann auch wieder in Form eines Photons aus dem angeregten Zustand emittiert werden. Das Atom wird auf das ursprüngliche Energieniveau zurückgeführt. Fundamental stehen diese (diskrete) Energiedifferenz ΔE und die Frequenz f des emittierten Photons folgendermaßen im Zusammenhang: [35, S. 82]

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot f \quad (3.3)$$

Mit h wird die Planck-Konstante bezeichnet.

Die Wechselwirkung von Atomen mit elektromagnetischer Strahlung wird im Laser ausgenutzt, indem eine stimulierte Anregung der Atome durchgeführt wird. Hierzu kommt es zum Effekt, dass durch die Anregung ein bereits im höheren Energieniveau befindliches Atom wieder auf das niedrigere Niveau abfällt, allerdings unter zwei phasengleich ausgesendeten Photonen. Lässt sich der Effekt genügend oft wiederholen, kann die emittierte elektromagnetische Strahlung weiter verstärkt werden. [2, S. 61]

Technisch werden mehrere unterschiedliche Energieniveaus verwendet, um die phasengleiche Emission zu verstärken. Um eine Aussendung von entstandenem Laserlicht zu bewerkstelligen, wird das an der Strahlungsemission beteiligte aktive Medium mit zwei Spiegeln begrenzt (Resonator), wovon einer halbdurchlässig ist. [35, S. 879] Das eingesetzte aktive Medium richtet sich nach den Anforderungen des benötigten Laserlichts, wie zum Beispiel der Wellenlänge und der Intensität des Lichts. In Abbildung 3-3 ist ein prinzipieller Aufbau eines Lasers dargestellt.

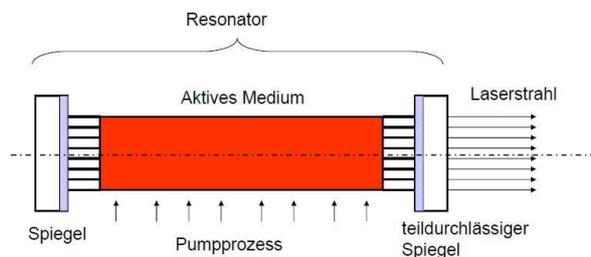


Abbildung 3-3: Prinzipaufbau eines Lasers. [36, S. 10]

Für PIV-Anwendungen in Wasser kommen hauptsächlich gepulste, frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser (Abkürzung für Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) mit einer Wellenlänge von 532nm zum Einsatz. [2, S. 65] Für die beiden, kurz hintereinander folgenden Lichtpulse werden zwei Lasereinheiten verwendet, da auch der gepulste Nd:YAG-Laser nicht in so kurzer Zeit zwei Pulse bereitstellen kann. [2, S. 68f]

Die Lichtschnittoptik ist dafür zuständig, dass der Laserlichtstrahl zu einer Ebene "aufgefächert" wird und am richtigen Ort den Messbereich gleichmäßig ausleuchtet. Dieses Ziel ist aufgrund unvermeidlicher Schattenzonen nicht immer zufriedenstellend erreichbar. Für die ganze Lichtführung gelten nachvollziehbarerweise die Gesetze der Optik, welche Lichtbrechungen und -beugungen beim Übergang des Lichts in andere Materialien berücksichtigt. Bei der Fertigung von Bauteilen aus lichtdurchlässigen Werkstoffen müssen diese Effekte bereits berücksichtigt werden, wie es beim vorliegenden Pump-turbinenmodell aufbau der Fall war.

3.2.3 Bildaufnahme und Kalibration

Die mit Partikeln versetzte Strömung wandert durch den Messbereich und wird von Laserlicht beleuchtet. Das gestreute Licht der Teilchen wird nun von einer Kamera aufgezeichnet. Aktuell sind sowohl digitale Kameras mit lichtsensiblen CCD-Chips üblich, (engl. Abk. für "charge-coupled device") als auch Kameras mit CMOS-Chips. (engl. Abk. für "complementary metal-oxide-semiconductor") Sie sind imstande, zwei Bilder mit dem geforderten, kurzen Zeitabstand aufnehmen zu können.

Die Doppelbilder werden in Graustufen aufgenommen und besitzen eine Farbtiefe von 8 Bit. Das bedeutet, die aufgenommene Helligkeitsintensität eines Bildpunktes ("Pixel") kann mit einer Stufung von $2^8=256$ Stufen aufgelöst werden. Der korrespondierende Wert, der dem Bildpunkt zugewiesen wird, reicht von 0 (keine Intensität) bis 255 (volle Intensität). [30, Abschn. 3–10]

Für die geometrische Umrechnung von der Objektebene (in Millimetern) auf die Bildebene (in Pixel) wird der Image Scale Factor S eingeführt. [30, Abschn. 4–6] So können bei der Auswertung der Messung Längeneinheiten verwendet werden, um beispielsweise Strömungsgeschwindigkeiten direkt in m/s angeben zu können.

$$S = \frac{1}{M} = \frac{l_{\text{Objektebene}}}{n_{\text{pixel}}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{Pixel}} \right] \quad (3.4)$$

S kann aus der Kalibration vor Messbeginn erhalten werden. Sein Kehrwert, der Magnification-Factor M, kommt ebenfalls zur Anwendung. [2, S. 130]

In Abbildung 3-4 wird das Kalibrationsgitter gezeigt, welches an der genauen Position der zukünftig dort befindlichen Messebene platziert wurde. Das aufgenommene Bild aus Sicht der Kamera ist rechts zu sehen. Mit dem Bild des Kalibrationsgitters werden der Messsoftware bekannte Längen vorgegeben, die es ermöglichen, den Image Scale Factor zu bestimmen und gegebenenfalls auch Bilder zu entzerren.

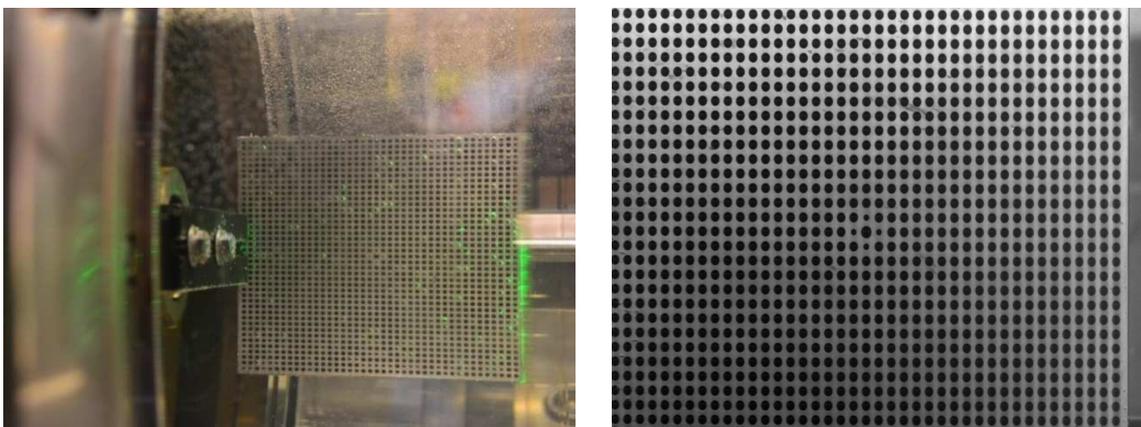


Abbildung 3-4: Links: Kalibrationsgitter im wassergefüllten Modell auf der exakten Stelle der Messebene
Rechts: Aufgenommenes Bild des Kalibrationsgitters.

3.2.4 Ausgewählte Aufnahmeparameter

3.2.4.1 Time Between Pulses

Die Größe, die neben dem Verschiebevektor für die Geschwindigkeit maßgeblich ist, wird als Time Between Pulses (Abk.: TBP) bezeichnet. Der Begriff kennzeichnet den zeitlichen Versatz Δt , der zwischen zwei einzelnen Bildaufnahmen verstreicht.

Die in Kapitel 3.3.3 behandelte Interrogation Area besitzt große Relevanz bei der Festlegung der TBP, da eine ausreichende Signalstärke bei der Auswertung die Bedingung stellt, dass die maximale Verschiebung zweier Partikel nicht größer als die halbe Seitenlänge der Interrogation Area sein soll. [2, S. 156] Konservativ wird auch ein Viertel der Seitenlänge genannt. [30, Abschn. 4–8] Somit ist mit einer abgeschätzten Strömungsgeschwindigkeit und einer vorgegebenen Größe der Interrogation Areas bereits die Time Between Pulses festgelegt. Wird eine Auswertung am PC gestartet, kann die Größe der Interrogation Area nicht beliebig klein gewählt werden. Die Qualität der Auswertung würde durch mehr fehlerhafte Vektoren stark leiden.

3.2.4.2 Dynamic Range

PIV-Messungen bieten sich für Strömungen mit komplexen Geschwindigkeitsverteilungen an. Eine einzige abgeschätzte Geschwindigkeit reicht daher oft nicht aus und es wird mit einem Bereich für die Time Between Pulses gearbeitet. Der Bereich wird aus einer minimalen und maximalen Geschwindigkeit in der Strömung gebildet, das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten wird als dynamischer Bereich R (engl.: Dynamic Range) bezeichnet. [29, S. 35] Je größer R, desto größer ist der Bereich abgedeckter Strömungsgeschwindigkeiten.

$$R = \frac{v_{max}}{v_{min}} \quad (3.5)$$

3.2.4.3 Auflösbare Geschwindigkeitsstrukturen

Um auf die kleinste Größe von Geschwindigkeitsstrukturen schließen zu können, ist sowohl der Image Scale Factor S also auch die Größe einer Interrogation Area n_{IA} besonders wichtig. [30, S. 4–51] Mit der räumlichen Ausdehnung einer Interrogation Area, welche sie tatsächlich auf der Messebene besitzt, kann der Durchmesser d_{struct} der kleinsten auflösbaren Geschwindigkeitsstruktur angegeben werden:

$$d_{struct} = S n_{IA} d_{pitch} \quad (3.6)$$

Mit d_{pitch} bezeichnet man den Abstand der Pixel auf dem PIV-Kamerachip.

Es ist zu erwähnen, dass eine Interrogation Area selbst eine Mittelung des Geschwindigkeitsfeldes in diesem Bereich darstellt. Zu große Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb einer Interrogation Area führen zu einer unrichtigen Repräsentation des

Strömungsfeldes, da sie selbst eine Art Tiefpassfilter darstellen. [30, S. 4–52] Für die kleinste darstellbare Geschwindigkeit sei auf die Literatur [2] verwiesen.

3.3 Auswertung

3.3.1 Aufbereitung der Doppelbilder

3.3.1.1 Entzerrung und Scheimpflug-Bedingung

Idealerweise steht die PIV-Kamera absolut senkrecht zur Messebene. Die erzeugte Aufnahme erscheint verzerrt, sobald sich die Kamera in einem Winkel zur Messebene befindet. Diese Tatsache macht eine Entzerrung der Bilder im Nachhinein notwendig und kann, mit der Referenz einer Kalibrieraufnahme, am PC durchgeführt werden.

Der Vollständigkeit halber wird noch erwähnt, dass unter steilen Winkeln zwischen Kamera und Messebene nicht nur die Verzerrung zunimmt, sondern auch Bereiche der Messebene nicht mehr im Brennpunkt liegen und somit unscharf werden. Mithilfe eines besonderen Aufbaus, der die sogenannte Scheimpflug-Bedingung erfüllen muss, kann eine ausgewählte Fläche vollständig scharf unter steilen Winkeln erfasst werden. [2, S. 287] [29, S. 11]

3.3.1.2 Image Pre-Processing bzw. Signalverbesserung

Liegen die entzerrten Bilder vor, kann noch eine Vielzahl an Signalverbesserungen durchgeführt werden. Diese sind für die Kreuzkorrelation sinnvoll, es kommen unterschiedliche Methoden für unterschiedliche Anforderungen in Frage. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden lediglich jene Methoden behandelt, die auch bei den Auswertungen der Modell-Pumpturbine angewendet worden sind:

- Subtraktion des Bildmittels
- Intensity Capping

Die Subtraktion des Bildmittels ist eine einfache und effiziente Methode, die aufgenommenen Doppelbilder in ihrer Qualität zu verbessern. Alle Doppelbilder werden arithmetisch gemittelt und es entsteht ein Bild, in dem alle beleuchteten Partikel verschwunden sind und nur mehr der Hintergrund erscheint.[2, S. 158] Dieses Bild wird nun von jedem einzelnen Photo subtrahiert. Abbildung 3-5 zeigt beispielhaft das Resultat einer solchen Subtraktion.



Abbildung 3-5: Links: Aufgenommenes Bild. Mitte: Mittelung aus 188 Doppelbildern, Rechts: Resultat.

Intensity Capping ist eine weitere einfache Art, die Signalqualität der Doppelbilder zu verbessern. Bei vielen Aufnahmen entstehen sehr stark belichtete Teilchen, welche unverhältnismäßig stark in die Auswertung eingehen würden. Wie der Name des Verfahren bereits verrät, wird die Intensität in der Aufnahme ab einem festgelegten Wert begrenzt. Der Einfluss der Belichtung wird somit abgemildert und es ergibt sich eine Verbesserung in der Anzahl an validierten Vektoren. [37, S. 3] [38]

3.3.2 Interrogation und Kreuzkorrelation

Die aufbereiteten Bilder werden nun der eigentlichen Auswertung unterzogen. Ziel ist es, aus ihnen Rohvektoren für ein Geschwindigkeitsfeld zu erzeugen. Interrogation Areas unterteilen Bild a (Zeitpunkt t) und Bild b (Zeitpunkt t+Δt) des Doppelbildes in kleinere Ausschnitte, die beide im Anschluss für die Kreuzkorrelation verwendet werden und am Ende einen Rohvektor ergeben.

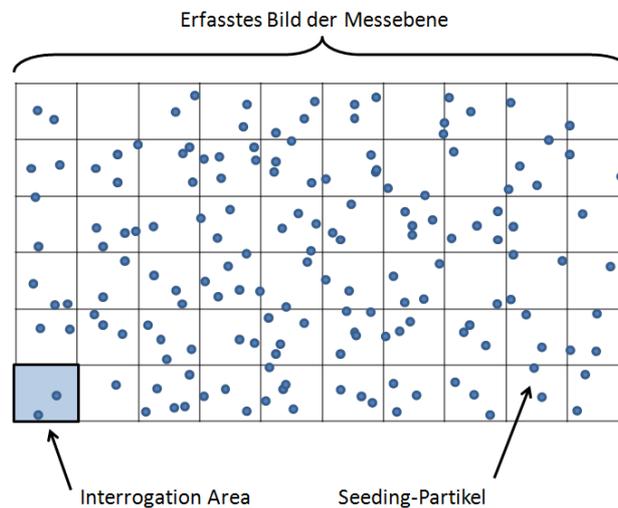


Abbildung 3-6: Aufteilung des Bildes in Interrogation Areas (ohne Overlap).

Die Interrogation Areas der beiden Bilder stellen diskrete Intensitätsverteilungen $I_1(i,j)$ und $I_2(i,j)$ der Helligkeit dar. Für die diskrete Kreuzkorrelation im Zeitbereich (auch direkte Kreuzkorrelation, engl. Abk.: DCC, genannt) kann folgende Vorschrift angeschrieben werden: [37, S. 3]

$$c(m,n) = \sum_i \sum_j I_1(i,j) \cdot I_2(i-m,j-n) \quad (3.7)$$

Es entsteht eine Matrix, welche auch Korrelationsmatrix genannt wird. Die Position der Intensitätswerte wird mit i und j beschrieben, während m und n als Verschiebung der beiden Verteilungen $I_1(i,j)$ und $I_2(i,j)$ zueinander verstanden werden kann und gleichzeitig den Ort des entstehenden Wertes in der Korrelationsmatrix vorgibt. [2, S. 153] Dort, wo die Korrelationsmatrix ihren höchsten Wert besitzt, passen beide Intensitätsverteilungen am besten überein und machen somit die Verschiebung als "Peak" in der Matrix auslesbar.

Die direkte Kreuzkorrelation besitzt den großen Nachteil, dass sie von Computern eine große Rechenleistung abverlangt und damit die Zeitspannen für Auswertungen groß sind. Schneller und zudem besser in Rechenalgorithmen implementierbar ist die diskrete Fourier-Transformation. Hier arbeitet man nicht im Zeitbereich, sondern transformiert die Intensitätsverteilungen in den Frequenzbereich, wo die Kreuzkorrelation durchgeführt wird. Aus mathematischer Sicht ist diese Vorgehensweise einer Faltung im Bildbereich ähnlich und wird als Korrelationstheorem bezeichnet [39, S. 256]. Im Anschluss werden die Ergebnisse in den Zeitbereich zurücktransformiert. [30, Abschn. 4–8] In Abbildung 3-7 ist der Ausführablauf, so wie er in Dantec Dynamic Studio abläuft, dargestellt.

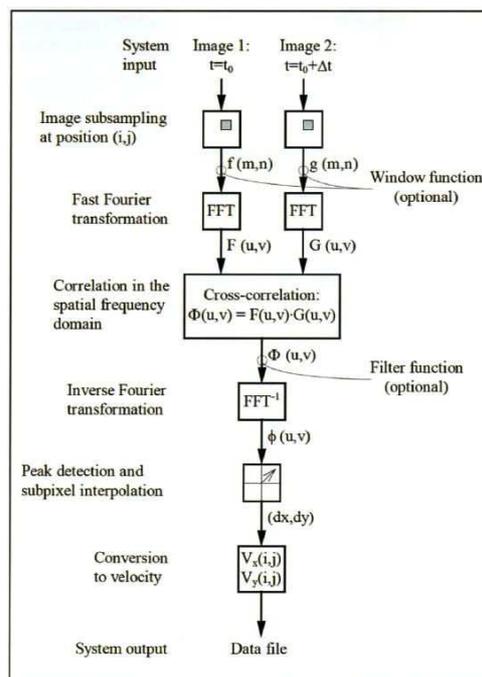


Abbildung 3-7: Übersicht des Ausführablaufes der Kreuzkorrelation in Dynamic Studio. [30, Abb. 4–6]

Zu beachten ist, dass ein einfaches Kreuzkorrelationsverfahren eine Verschiebung ausgibt, die lediglich geradlinig sein kann. (siehe Abbildung 3-8) Rotation oder Deformationen des Fluides können nur angenähert und im eigentlichen Sinn nicht dargestellt werden. [2, S. 154] Auswerteverfahren, welche mit Bildverformung arbeiten, eignen sich für solche Darstellungen.

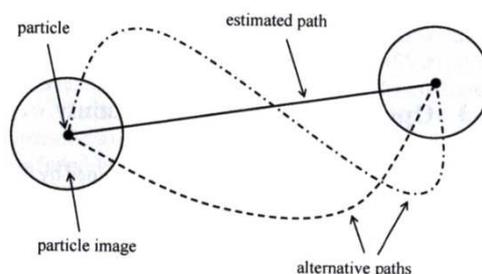


Abbildung 3-8: Mögliche Partikelbahn im Vergleich zur angenommenen, linearen Bahn. [2, Abb. 6.27]

Wie in Kapitel 3.2.4 besprochen, besitzen Aufnahmeparameter wie Time Between Pulses und die Strömungsgeschwindigkeit im Fluid einen erheblichen Einfluss auf die Auswertequalität. Mehr Vektoren, also kleinere Interrogation Areas, bedeuten folglich keine bessere Auswertung.

3.3.2.1 Peak-Detektion

Mit der genauen Position des Peaks in der Korrelationsmatrix besitzt man die genaue Größe und Richtung des Verschiebevektors. Aufgrund der gleichen Größe der Interrogation Areas des Doppelbildes im Frequenzbereich geht bei der Korrelation Information verloren, somit nimmt das Signalrauschen in der Korrelationsmatrix mit zunehmender Partikelverschiebung zu. [37, S. 3] Es wird schwieriger, den eigentlichen Korrelations-Peak identifizieren zu können.

Möchte man die Position des größten Peaks bestimmen, wird eine 2D-Gauss-Kurve in diskreten Stützpunkten der Werte gelegt und ihr Maximum zwischen den Pixel-Werten der Position interpoliert. Somit kann die Verschiebung mit einer Genauigkeit festgestellt werden, die unter einem Pixel liegt (sogenannte Sub-Pixel Interpolation). In Abbildung 3-9 ist die Korrelationsspitze einer Kreuzkorrelation deutlich zu erkennen. Das Hintergrundrauschen ist in diesem Beispiel relativ zum Peak gering.

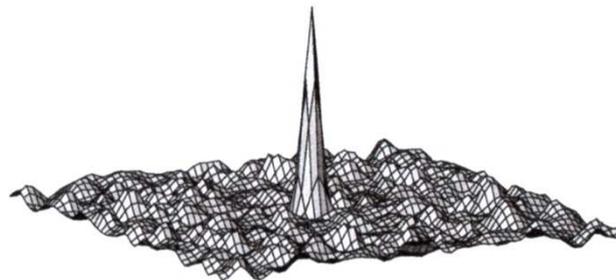


Abbildung 3-9: Korrelationsspitze und Hintergrundrauschen in der "Correlation Map". [2, S. 176]

3.3.2.2 Fensterfunktionen

Die diskrete Fouriertransformation arbeitet mit der periodischen Aneinanderreihung der Intensitätsverteilungen, die wir als Partikelbilder verstehen. Es ergibt sich das Problem, dass sich Korrelationsspitzen mit "Phantompartikeln" ergeben, welche lediglich durch die Periodizität der Daten auftauchen, aber nicht tatsächlich vorhanden sind. Abhilfe gegen dieses Signalrauschen verschaffen Fensterfunktionen.

Eine Fensterfunktion innerhalb einer Interrogation Area verleiht, wie eine Gewichtsfunktion, äußeren Partikeln eine geringere Intensitätsverteilung als mittig liegenden Partikeln. Somit werden Korrelationen, die sich potentiell mit einem Phantompartikel ergeben würden, unterdrückt.

Der Verlauf dieser Gewichtsfunktionen verleiht diesen ihren Namen. Eine Top-Hat-Fensterfunktion (dt.: Zylinderhut) und eine Gauß-Fensterfunktion werden sehr häufig angewendet. Eine Top-Hat-Fensterfunktion (Abbildung 3-10) multipliziert alle

Intensitätswerte bis zu einer festgelegten Distanz zum Rand der Interrogation Area mit Null, während innen liegende Intensitäten mit eins multipliziert werden.

Eine Gauß-Fensterfunktion entspricht in der Form ihrer Gewichtsfunktion einer Normalverteilungskurve. Die Parameter, mit denen diese Fensterfunktionen für eine Auswertung angewendet werden, können in Dantec Dynamic Studio vorgegeben werden.

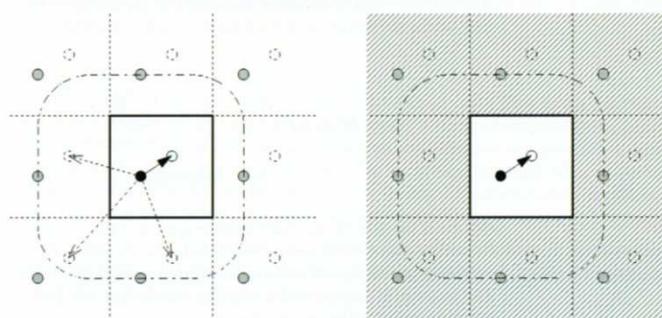


Abbildung 3-10: Links: Korrelation mit Phantompartikeln, Rechts: Top-Hat-Fensterfunktion, die alles bis auf die Interrogation Area unterdrückt. [30, Abb. 4–8]

Es ist zu erwähnen, dass mit diesem Verfahren Information am Rand von Interrogation Areas verloren geht. Um diese Information dennoch zu nutzen, werden Interrogation Areas überlappt, so sind die Partikel am Rand bei der nächsten Interrogation Area in der Mitte. Abbildung 3-11 verdeutlicht diesen Vorgang. [30, S. 4–16] [30, S. 4–19]

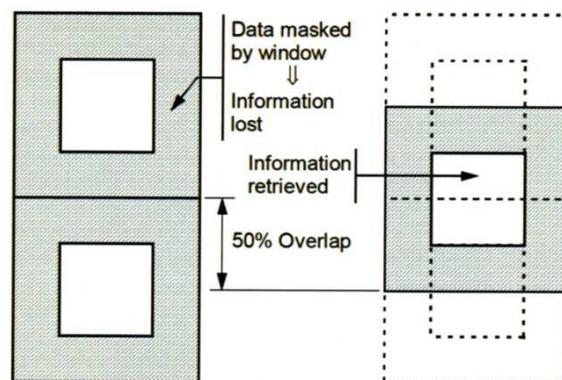


Abbildung 3-11: Overlap der Interrogation Areas, um keine Information durch die Fensterfunktion zu verlieren. [30, Abb. 4–9]

3.3.2.3 Offset

Zwei Interrogation Areas müssen bei einer Kreuzkorrelation nicht direkt übereinander liegen. So kann es vorkommen, dass eine Strömung eine Hauptströmungsrichtung besitzt, die die Tracerpartikel dazu veranlasst, pro Zeitschritt eine große Distanz zurückzulegen. Die zu korrelierenden Partikel haben in der Zeit die Interrogation Area bereits verlassen. Kann die Time Between Pulses nicht mehr kürzer eingestellt werden, könnte man sich nur mehr mit sehr großen Interrogation Areas behelfen, die für eine maximale zulässige Verschiebung der Partikel groß genug wären.

Abhilfe verschafft ein Offset der Interrogation Area (siehe Abbildung 3-12), welcher nun wieder kleinere Interrogation Areas erlaubt und zugleich die zusätzliche Verschiebung in den Rohvektoren berücksichtigt. [30, S. 4–20]

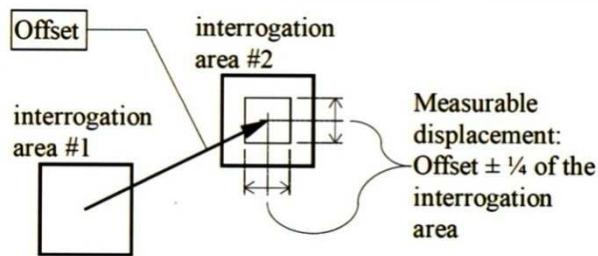


Abbildung 3-12: Offset der Interrogation Areas, um die zulässige Verschiebung der Partikel einzuhalten. [30, Abb. 4–10]

3.3.2.4 Mathematische Filter

Die Anwendung der mathematischen Filter findet direkt nach der Kreuzkorrelation statt. Die Korrelationsebene wird im Frequenzbereich untersucht und bearbeitet. Im Frequenzbereich wird mit Fourier-Reihen und ihren zugehörigen Fourier-Koeffizienten gearbeitet. Je breiter der Peak in der Korrelationsebene ist, desto größer sind die Fourier-Koeffizienten für niedrige Frequenzen. Umgekehrt verhält es sich analog: Je schärfer die Korrelationsspitze, desto hochfrequenter ist das Signal im Frequenzbereich und die Koeffizienten der Fourier-Reihe bei hohen Frequenzen sind größer. [30, Kap. 4.4.1.8] Mathematische Filter manipulieren, ähnlich zu einer Gewichtsfunktion, diese Fourier-Koeffizienten und können beispielsweise den konstanten Fourier-Koeffizienten zu null setzen, um Hintergrundbeleuchtung oder Reflektionen aus der Korrelationsebene zu filtern, die die Signalqualität verbessern (sogenannter No-DC-Filter). Weitere Filter sind:

- Low-Pass-Filter
- Band-Pass-Filter

Die Parameter, mit denen diese Filterfunktionen für eine Auswertung angewendet werden, können in Dantec Dynamic Studio eingegeben werden.

3.3.3 Validierungsverfahren

Validierungsverfahren haben mehrere Namen, aber ihre Anwendungsreihenfolge ist immer dieselbe. Ihre Aufgabe ist es, fehlerhafte Rohvektoren im errechneten Geschwindigkeitsfeld automatisch ausfindig zu machen und gegebenenfalls durch interpolierte Vektoren zu ersetzen.

3.3.3.1 Vergleich der Korrelationsspitzen

Die Korrelationsspitze gibt Aufschluss über die Länge und Richtung des entstehenden Geschwindigkeitsvektors. Kommt es vor, dass es zu mehreren, ähnlich großen Korrelationsspitzen kommt, ist es fraglich, ob der resultierende Vektor aus der höchsten Spitze wirklich aussagekräftig ist. Mithilfe der Peak Validation (wie sie in Dantec Dynamic Studio genannt wird) wird der größte Peak ins Verhältnis zum nächstgrößten Peak gestellt. Fällt dieses Verhältnis unter einen bestimmten Wert ab, so wird der potentielle Vektor aussortiert. [30, S. 4–73]

3.3.3.2 Länge des Geschwindigkeitsvektors

Als nächsten Schritt werden die Vektoren einer Form von "Plausibilitätsprüfung" unterzogen. Besitzen Geschwindigkeitsvektoren einen stark überhöhten Betrag, den sie physikalisch nicht besitzen können, scheiden diese Vektoren aus. Mit der Vorgabe des Gesamtbetrages des Vektors oder der einzelnen Beträge der Komponenten in x- und y-Richtung kann diese Art der Validierung gesteuert werden. In Dantec Dynamic Studio wird diese Validierung "Range Validation" genannt. [30, S. 76]

3.3.3.3 Vergleich mit umliegenden Vektoren

Strömungsfelder sind in vielen Fällen keinen sprunghaften Änderungen in der Geschwindigkeit unterworfen. Diese Annahme, dass sich die Geschwindigkeit nur allmählich von Position zu Position ändert, wird in der vorliegenden Validation angewendet. Umliegende Vektoren eines Vektors werden gemittelt und anschließend wird die Änderung in der Größe verglichen. Mit einer vorgegebenen Toleranz wird eruiert, ob sich der betrachtete Vektor in einem zu großen Maß von den umgebenden unterscheidet. Trifft dieser Fall zu, wird der Vektor aussortiert und kann gleich mit einem gemittelten Vektor ersetzt werden. Somit wird das Geschwindigkeitsfeld "geglättet". In Dantec Dynamic Studio, die diese Validierung als "Moving Average Validation" bezeichnet, ist die Vorgabe eines Akzeptanzfaktors notwendig. [30, S. 77]

3.3.4 Geschwindigkeitsfeld

Zusammenfassend führt das Image Pre-Processing, die Kreuzkorrelation mitsamt den Filtern und die sukzessive Anwendung aller Validierungsverfahren zu einem "validierten" Vektorfeld, welches sich pro Doppelbild ergibt. Wichtig ist hierbei zu wissen, dass der Vektor aus der Interrogation Area das Geschwindigkeitsfeld der Tracerpartikelströmung darstellt und diese Partikel wiederum mit ihrem Folgevermögen das Strömungsfeld des Fluides annähern. Ein großer Aspekt bleibt noch zu erwähnen, welcher mit Abbildung 3-13 verdeutlicht wird: Das Ergebnis der PIV-Auswertung an einer Stelle der zweidimensionalen Messebene kann vektoriell lediglich die Geschwindigkeitskomponente in dieser Ebene darstellen. Über die in der Abbildung angedeutete z-Komponente kann keine Aussage getroffen werden. [2, S. 261]

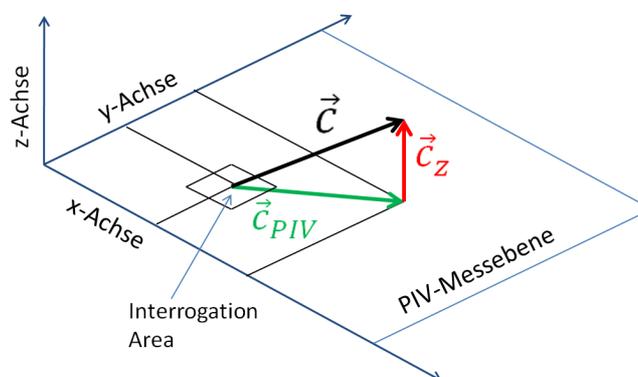


Abbildung 3-13: Komponenten eines räumlichen Geschwindigkeitsvektors \vec{c} gemessen in einer 2D-PIV-Messebene

3.3.5 Out-of-Plane-Motion

Bei PIV-Messebenen, welche senkrecht zu einer Hauptströmungsrichtung stehen, treten besondere Einflüsse auf. Eine der wesentlichsten wird als Out-of-Plane-Motion bezeichnet und kann als Fehlerquelle für die Auswertung gesehen werden. [2, S. 228] Aufgrund der Tatsache, dass die Messebene sehr dünn ist, können trotz sehr kurzer Zeit zwischen den Belichtungen die Tracerpartikel bereits beim zweiten Bild den Lichtschnitt verlassen haben. Umgekehrt können auch neue Tracerpartikel erscheinen, die vorher noch nicht im Lichtschnitt waren. Diese sogenannte Out-of-Plane-Motion besitzt ein erhöhtes Risiko, dass bei der Kreuzkorrelation der entstandenen Doppelbilder "Korrelationspartner" (bereits stromabwärts befindliche Tracerpartikel) fehlen. Dieser Verlust wird in der Fachliteratur auch als "Loss of Pairs" (engl.: Paarverlust) bezeichnet. Es ist wichtig, diesen Effekt bei der Orientierung von Messebenen bereits zu kennen, da es laut [2] genügend Methoden gibt, diesen Einfluss gering zu halten und in der Auswertung zu berücksichtigen.

Um eine Auskunft über Out-of-Plane-Motion bei inkompressibler Strömung zu erhalten, kann als differentielle Größe η gebildet werden, welche die Summe der Dehnungen in den beiden, kartesischen Messebenenkoordinaten x und y darstellt (u , v und w stellen die Komponenten des berechneten Geschwindigkeitsvektors in der Messebene dar, sowie normal dazu): [2, S. 261]

$$\eta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial w}{\partial z} \quad (3.8)$$

Dieser Wert gilt lediglich als Hilfsgröße zur Feststellung von Out-of-Plane-Motion. Mit ihr kann keine Geschwindigkeit in z -Richtung nachträglich errechnet werden. [2, S. 261]

4 Messkampagne der Modell-Pumpturbine

4.1 Hydraulik einer Francis-Pumpturbine

Zum allgemeinen Aufbau einer Francis-Pumpturbine gibt Abbildung 4-1 Auskunft: Im Pumpbetrieb strömt Wasser vom Saugrohr (1) durch das Laufrad (2), welches vom Motorgenerator angetrieben wird. Der Motorgenerator befindet sich am anderen Ende der Welle (6). Nachdem das Wasser das Laufrad verlassen hat, strömt es an den verstellbaren Leitschaufeln (3) und an den Stützschaufeln (4) vorbei, welche für das Fluid einen divergenten Kanal bilden. Anschließend wird das Wasser über die Spirale (5) durch eine Druckleitung in einen Speichersee gefördert. Für alle Begriffe in dieser Arbeit (z.B. Eintritt: Saugseite, Austritt: Druckseite) gibt der Pumpbetrieb die Fließrichtung vor.

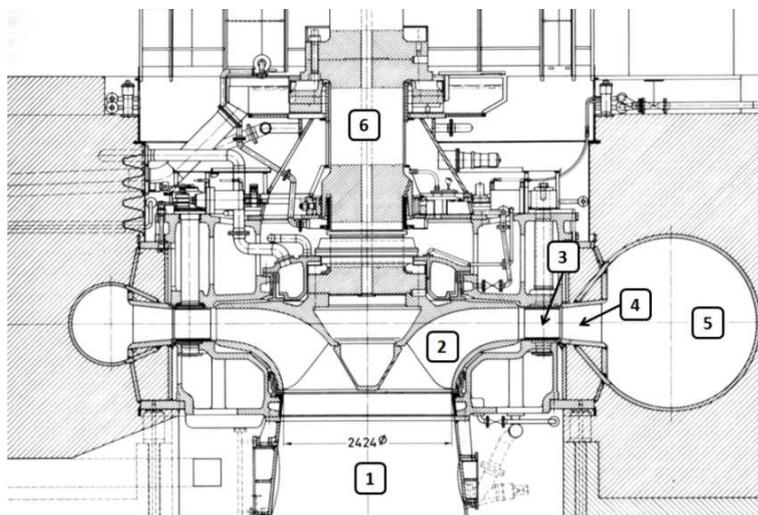


Abbildung 4-1: Schnittansicht einer Pumpturbine in Vertikalausführung, Fa. Voith. 1: Saugrohr, 2: Laufrad, 3: Leitschaufel, 4: Stützschaufel, 5: Spirale, 6: Welle zum Motorgenerator. [6, Abb. 301.2]

Für die vorliegende Modell-Pumpturbine gilt derselbe Aufbau der Grundkomponenten Saugrohr, Laufrad, Leit- und Stützschaufeln, sowie Spirale. Zusätzlich zu den Fenstern, welche für die PIV-Messungen am Saugrohrkonus und an der Druckseite in der Spirale vorgesehen wurden, ist ein 90°-Krümmer am Eintritt in die Maschine installiert. (siehe Abbildung 4-2)

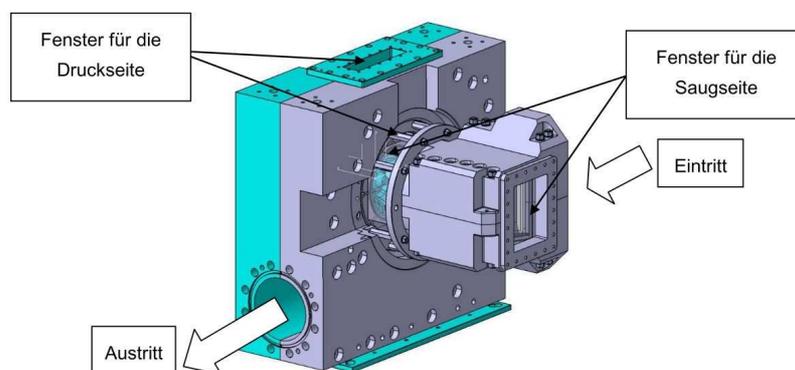


Abbildung 4-2: CAD-Modell des Pumpturbinen-Modells mitsamt PIV-Fenstern. [40, Abb. 2]

4.2 Struktur der vorhandenen PIV-Messdaten

4.2.1 Betriebspunkte

Bei den Messungen am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen wurden zwei unterschiedliche Laufräder für die selbe hydraulische Geometrie (Spirale, Leitapparat, etc.) untersucht. Für zwei unterschiedliche Stellungen der Leitschaufeln (auch Leitapparatstellung genannt) von 15° und $27,5^\circ$ liegen PIV-Messdaten vor. Die angefahrenen Betriebspunkte für Laufrad 1 der Modell-Pumpturbine sind in Abbildung 4-3 für die Leitapparatstellung von 15° dargestellt.

Die Modellmaschine besitzt, wie in Abschnitt 2.1.2 erläutert, einen instabilen Kennlinienverlauf. In der vorliegenden Arbeit werden die PIV-Messdaten von nur einer Leitapparatstellung (15°) und einem Laufrad (H9/596 F) untersucht, da der Förderhöhenabfall bei kleiner Leitapparatstellung weitaus ausgeprägter ist als bei der größeren Leitapparatstellung. Die hydraulischen Effekte, die für die Instabilitäten im Pumpbetrieb verantwortlich sind, liegen hierbei allerdings näher beisammen und sind schwierig zu unterscheiden.

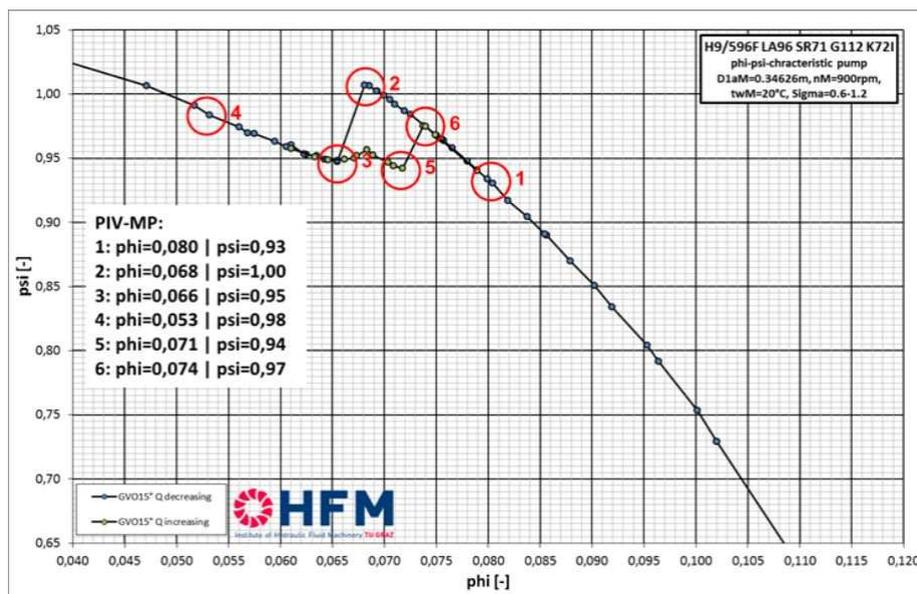


Abbildung 4-3: Kennlinie des Laufrades 1 der Modell-Pumpturbine im ϕ - ψ -Diagramm bei 15° Leitschaufelstellung. [41, Abb. 28]

Die in rot markierten Betriebspunkte in Abbildung 4-3 sind mit PIV-Daten versehen. Unterteilt man die Kennlinie in einen "stabilen" (BP 1, 2 und 6) und "instabilen" (BP 3, 4 und 5) Ast, gelten folgende Messreihenfolgen für steigenden und fallenden Durchfluss:

- 1 - 2 - 3 - 4 (Durchfluss fallend; Vom stabilen auf den instabilen Ast)
- 4 - 5 - 6 - 1 (Durchfluss steigend; Vom instabilen auf den stabilen Ast)

Für die Darstellung der Auswertungen sind diese beiden Reihenfolgen in Kapitel 6 von großer Bedeutung. Tabelle 1 fasst die Kenndaten der Messpunkte zusammen und gibt den Durchfluss am jeweiligen Punkt relativ zum Nenndurchfluss Q_n an.

Tabelle 1: Betriebspunkte Laufrad 1 (H9/596 F) mit GVO 15°

PIV-MP	Durchflussziffer ϕ	Druckziffer ψ	Durchfluss Q relativ zum Nenndurchfluss Q_n
1	0,080	0,93	1,00* Q_n
2	0,068	1,00	0,85* Q_n
3	0,066	0,95	0,83* Q_n
4	0,053	0,98	0,66* Q_n
5	0,071	0,94	0,89* Q_n
6	0,074	0,97	0,93* Q_n

4.2.2 Messebenen und Rotor-Stator-Positionen

Die Untersuchung der Zuströmung im Saugrohr und der Abströmung im Leitapparat wurde durch die Sichtfenster der Maschine durchgeführt. Durch diese Fenster konnte die Maschine für Laserlichtschnitte und die PIV-Kamera zugänglich gemacht werden. Im Vorfeld wurden jeweils vier Messebenen auf Saug- und Druckseite definiert, welche in Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 respektive dargestellt sind.

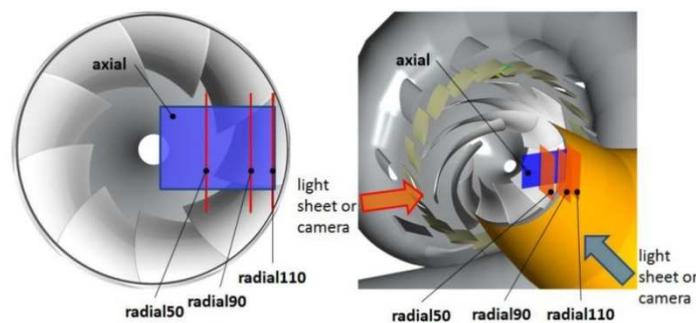


Abbildung 4-4: Vier PIV-Messebenen auf der Saugseite des Pumpturbinen-Modells. [41, Abb. 18]

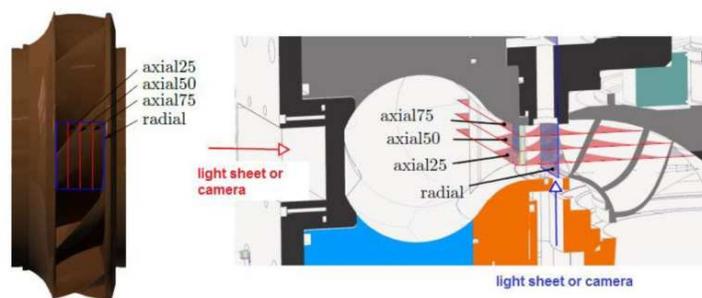


Abbildung 4-5: -Vier Messebenen auf der Druckseite des Pumpturbinen-Modells. [41, Abb. 17]

Eine weitere Besonderheit der Messkampagne ist, dass pro Betriebspunkt und Ebene mit einem Triggersignal gearbeitet wurde, welches mit jeder Umdrehung des Laufrades ausgelöst wurde. Durch Wahl eines Zeitversatzes nach dem Triggersignal konnte immer eine bestimmte Laufradstellung für die Doppelbild-Aufnahme vorgegeben werden. Diese sogenannten Rotor-Stator-Positionen (kurz: RSP) ermöglichten es, für 20 unterschiedliche Winkelversätze zwischen Laufrad und Leitapparat PIV-Daten zu sammeln. Beim eingesetzten Laufrad mit

neun Laufschaufeln erstreckt sich ein Laufschaufelkanal am Austritt über 40° des Radumfangs. Somit sind bei 2°-Schritten alle Rotor-Stator-Positionen von 0° bis 38° erfasst. Zur Kontrolle wurde auch die Position mit 40° (Position 21) gemessen, welche als Verifizierung der Position 1 mit RSP 0° diente.

Hier erkennt man den großen Umfang der Messkampagne, wenn man beide Laufräder, alle Leitapparatstellungen, Betriebspunkte, Messebenen und Rotor-Stator-Positionen berücksichtigt. Jede einzelne Messung beinhaltet 189 Doppelbilder auf der Saugseite und 499 Doppelbilder auf der Druckseite. Die immense Datenmenge und die lange Exportdauer der Rohdaten aus Dantec Dynamic Studio sind die Hauptgründe für die Analyse lediglich eines Laufrades bei einer Leitapparatstellung und zwei ausgewählten Messebenen in dieser Arbeit.

4.2.3 Festgelegte PIV-Parameter

Die Parameter für die Auswertung in Dantec Dynamic Studio wurden auf die verschiedenen Messebenen angepasst. Sowohl die axiale Messebene auf der Saugseite als auch die radiale Messebene auf der Druckseite stehen senkrecht zur Hauptströmungsrichtung. Somit wird nicht die Hauptkomponente des Geschwindigkeitsvektors gemessen und die Out of Plane Motion ist groß, Tracerpartikel halten sich nicht lange im dünnen Laserlichtschnitt auf. [5, S. 60] Dieser Effekt wurde in Abschnitt 3.3.5 erläutert. Tabelle 2 und Tabelle 3 listen alle relevanten PIV-Parameter der gewählten Messebenen auf.

Tabelle 2: Zusammenfassung der PIV-Parameter, Saugseite

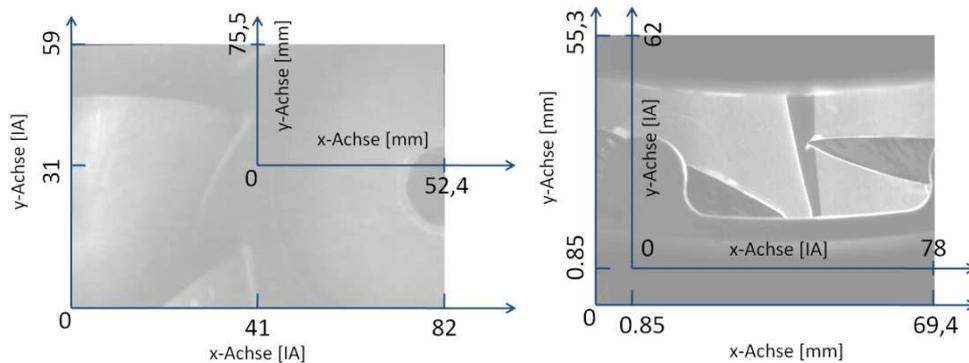
Messebene	Kreuzkorrelation						Validierung		
	M [Pixel/mm]	IA-Größe [Pixel]	Overlap [%]	Offset	Fenster- Funktion	Filter- Funktion	Peak- Validation	Range Validation	Moving Average Validation
axial	12,65	32x32	50	nein	Gaussian k=0,75	Low-Pass Gaussian k=3	Peak Ratio: 1,2	Betrag des Vektors: 7>x>7 m/s	Mittelung: 3x3; Akzeptanz faktor: 0,1

Tabelle 3: Zusammenfassung der PIV-Parameter, Druckseite

Messebene	Kreuzkorrelation						Validierung		
	M [Pixel/mm]	IA-Größe [Pixel]	Overlap [%]	Offset	Fenster- Funktion	Filter- Funktion	Peak- Validation	Range Validation	Moving Average Validation
radial25	18,28	32x32	50	nein	Gaussian k=0,75	Low-Pass Gaussian k=3	Peak Ratio: 1,2	Betrag des Vektors: 7>x>7 m/s	Mittelung: 3x3; Akzeptanz faktor: 0,1

4.2.4 Koordinatensysteme

Für die zwei untersuchten Messebenen können die in Abbildung 4-6 dargestellten Abmessungen und Koordinatensysteme angegeben werden. Von Interesse ist das Koordinatensystem, welches dimensionslos die Position der Interrogation Areas angibt, da diese Koordinaten dem Rechenprogramm in Kapitel 5 zugeführt wird. Mit der genau bekannten Position kann bei Bedarf jederzeit die räumliche Position in Millimeter umgerechnet werden. Für die Umrechnung von Pixel auf Millimeter wird der in Abschnitt 3.2.3 behandelte Image Scale Factor S verwendet und (bei Bedarf) die Größe der Interrogation Area in Pixel.



**Abbildung 4-6: Koordinatensysteme festgelegt in Dynamic Studio.
Links: Saugseite (axial), Rechts: Druckseite (radial25)**

Aufgenommene Doppelbilder der Saugseite in der Messebene "axial" besitzen eine Größe von 1316x936 Pixel und decken eine reelle Größe von 104x74 mm ab. Ohne Overlap würde dies zirka 41x29 IAs ergeben, allerdings liegt bei der Auswertung ein Overlap von 50% vor, was die Positionen mit ausgewerteten PIV-Größen verdoppelt und so ein Feld mit zirka 82x59 IAs erzeugt.

Analog dazu besitzt die Messebene "radial25" auf der Druckseite eine Größe von 1280x1024 Pixel mit einer reellen Größe von 70x56 mm. Mit einem Overlap von 50% führt das zu einem diskreten Skalarfeld mit zirka 80x64 IAs.

Der gewählte Overlap spielt bei der Betrachtungsfeldgröße in Abschnitt 5.4.1 noch eine wesentliche Rolle zur Bestimmung der tatsächlichen Größe gefundener Wirbel.

5 Untersuchung von Wirbelstrukturen in Matlab

5.1 Einführung

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein Matlab-Code verfasst, welcher grob in vier Blöcke unterteilt ist und weiter unten genauer beschrieben wird. Als Input dienen exportierte Textdateien aus Dantec Dynamic Studio, die unter anderem die Wirbelstärke als Funktion der Position in den Messebenen beinhalten. Die Hauptaufgabe besteht darin, mit einer geringen Anzahl an Vorgaben die Zentren von Wirbeln zu erkennen und die Position und Wirbelstärke der Wirbel zu erfassen, sowie jeweils die Größe und Zirkulation zu berechnen.

Die Bestimmung von Wirbeln kann auf viele Arten erfolgen, einige wurden in Kapitel 2.5 vorgestellt. Der vorliegende Code nutzt zur Berechnung die abgeleiteten Größen der Wirbelstärke, was mit seinen Vor- und Nachteilen in Abschnitt 5.5.1 detailliert besprochen wird.

In weiteren Schritten werden diese Ergebnisse eingegrenzt, dargestellt und statistisch verwertet. Es wird darauf geachtet, wenn möglich, den zeitlichen Charakter der Messungen zu erhalten und alle Dateien "ungemittelt" zu betrachten. Schwankungen in den gemessenen (und folglich auch in den abgeleiteten) Größen würden "herausgemittelt" werden und wären nicht mehr darstellbar.

5.2 Rohdaten

Ausgangspunkt der Analyse ist die diskrete Berechnung der Wirbelstärke an den unterschiedlichen x-,y-Positionen in einer Messebene. Dieser Vorgang wird in Dantec Dynamic Studio durchgeführt, es ist auch denkbar, diese Werte mit anderen Programmpaketen (beispielsweise mit dem Matlab-Programm "PIVlab" [37]) zu erhalten oder sie mit gegebenen Geschwindigkeitsfeldern aus einer PIV-Software selbst zu berechnen.

Durch die zweidimensionale Beschaffenheit der Messebene (im Gegensatz zu Stereo-PIV oder 3D-PIV) ist es der Software nur möglich, die Wirbelstärke senkrecht zur Ebene zu bilden. [2, S. 261] Aus diesem Grund sind es skalare Werte ω_z , die den jeweiligen Positionen zugeordnet werden, da alle Vektoren (vorzeichenabhängig) parallel zur z-Achse stehen.

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5.1)$$

Wirbel, die sich in ungünstigen Orientierungen zur Messebene befinden, werden nicht oder nur schlecht erfasst. Ebenso muss man die Tatsache berücksichtigen, dass lediglich Geschwindigkeitskomponenten der Tracerpartikel erfasst werden, welche in der PIV-Messebene liegen. Abschnitt 3.3.4 behandelt diese Gegebenheit einer 2D-PIV-Messung.

Als Input-Daten für die Analyse liegen somit diskrete Skalarfelder vor, welche an jeder Position mit x- und y-Koordinate den Betrag der Wirbelstärke in z-Richtung zugeordnet haben. Je ein Skalarfeld gehört zu seinem Doppelbild mitsamt dem Geschwindigkeitsfeld.

Pro RSP liegen auf der Saugseite ca. 189 Dateien und auf der Druckseite ca. 499 Dateien vor. Insgesamt ergeben sich bei 20 RSP folglich 3780 und 9980 Dateien pro Messpunkt.

5.3 Ablauf

Der allgemeine Ablauf des Codes lässt sich mit dem Diagramm in Abbildung 5-1 schematisch darstellen: Um den Ablauf der Berechnung zu beschleunigen, wird der Speicherort aller Textdateien aus Dantec angegeben, damit im "Vorty Task Creator" eine für das Hauptprogramm lesbare Liste aller zu verarbeitenden Textdateien erstellt werden kann. Nach Angabe der Vorgabeparameter, welche in Abschnitt 5.4 erläutert werden, kann das Hauptprogramm "Vorty" seine Berechnungen durchführen. Die Ergebnisse werden in Form eines Cell-Arrays pro RSP abgespeichert und sind nach dem Berechnungsvorgang jederzeit abrufbar. Ein Cell Array besteht aus individuellen Cells, die einzeln angesprochen werden und jede Art von Daten beinhalten können. [42] Hier sind der Dateiname, die importierten Wirbelstärken, alle Wirbelabbilder und ihre errechneten Positionen hinterlegt.

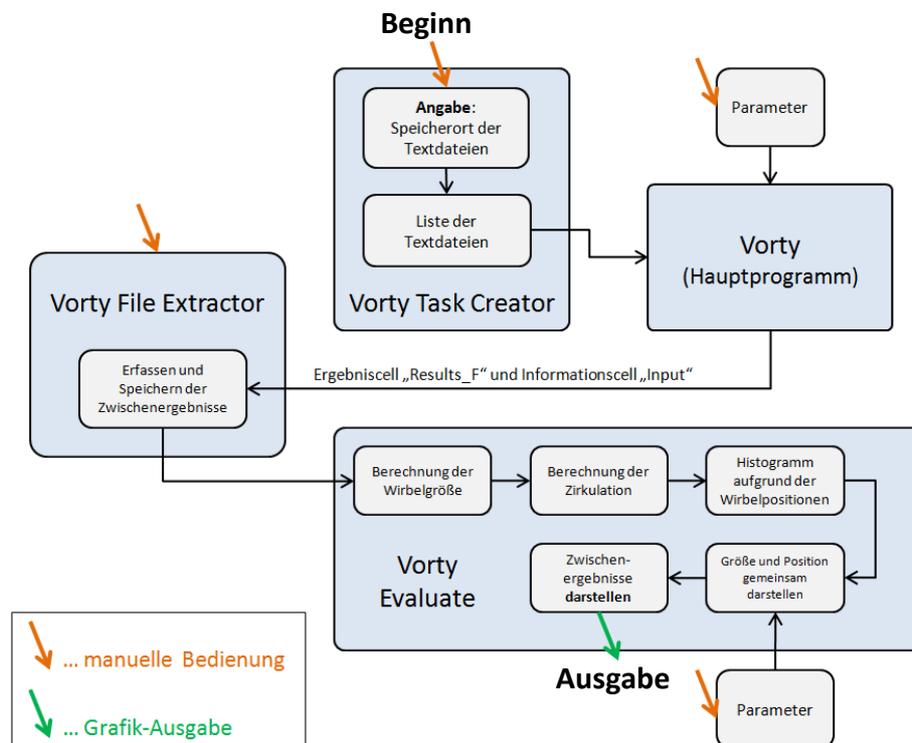


Abbildung 5-1: Schematischer Ablauf der PIV-Analyse

Nach dem Durchlaufen des Hauptprogramms werden alle Ergebnisdaten mithilfe des Programms "Vorty File Extractor" gesammelt und sowohl nachvollziehbar als auch automatisch beschriftet. Die Berechnung weiterer Größen wie der Zirkulation und Größe der Wirbel findet im Programm "Vorty Evaluate" statt. Hier werden ebenso Parameter eingestellt, um eine zugängliche und einheitliche Darstellung der Ergebnisse zu erzielen, welche in Kapitel 6 zu finden sind.

5.4 Vorgabeparameter

Für den Programmablauf und -aufbau sind für das Hauptprogramm "Vorty" vier Vorgabeparameter besonders wichtig. Zwei davon wurden durch Untersuchungen im Laufe der Programmierung fixiert, womit die übrigen zwei Parameter den gesamten Auswerteprozess steuern.

5.4.1 Betrachtungsfeldgröße

Das Programm hat einen Algorithmus zur Verfügung, welcher wie eine Lupe funktioniert und mit der das gesamte Skalarfeld abgesucht wird. In jedem Betrachtungsfeld wird die kleinste und größte Wirbelstärke bestimmt. Stellt der Algorithmus fest, dass im Betrachtungsfeld der "Lupe" einer der beiden maximalen Werte genau in der Mitte des Feldes liegt, gilt dieses Feld als Kandidat für einen Wirbelkern.

Die Größe dieses "Lupenfeldes" ist ein fixierter Parameter in der Programmierung. In Abbildung 5-2 sind zum Vergleich Größen mit 1,5x1,5 IA, 2,5x2,5 IA, 3,5x3,5 IA und 4,5x4,5 IA dargestellt. Wie im Abschnitt 4.2.4 angekündigt, spielt der festgelegte Overlap der IAs (hier mit 50%) eine große Rolle: Läge kein Overlap vor, würden sich die vorher genannten Seitenlängen der Betrachtungsfelder verdoppeln. (3x3 IA, 5x5 IA, etc.)

Um eine genauere Wirbelposition zu erhalten, wurde im Betrachtungsfeld (welches bei 2,5x2,5 IA nur 25 Wirbelstärkewerte besitzt) kubisch interpoliert, um eine verfeinerte Auflösung zu erhalten. Man erkennt, dass bei 1,5x1,5 IA der Wirbelkern nicht mehr ins Betrachtungsfeld passt, wo hingegen ab einer Größe von 3,5x3,5 IA bereits benachbarte Wirbel zu sehen sind. Die Betrachtungsfeldgröße wurde mit 2,5x2,5 Interrogation Areas festgelegt und entspricht umgerechnet 80x80 Bildpixeln. (=2,5x32 Pixel) Abhängig vom Image Scale Factor der Messebenen kann so auf die Objektgrößen geschlossen werden.

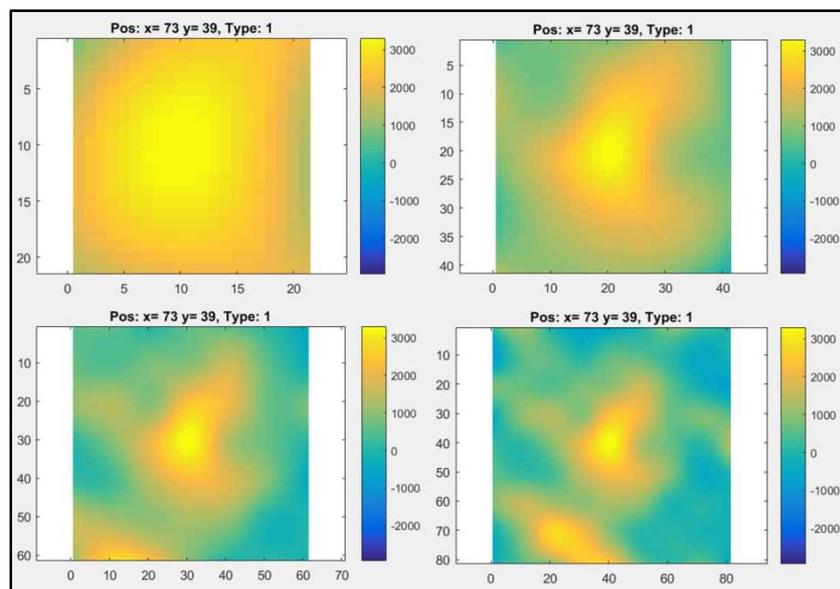


Abbildung 5-2: Unterschiedliche Größe der Betrachtungsfelder mit Sicht auf einen positiven Wirbelkern. Oben links: 1,5x1,5 IA, Oben rechts: 2,5x2,5 IA. Unten links: 3,5x3,5 IA. Unten rechts: 4,5x4,5 IA. Farbskala: Wirbelstärke in s^{-1}

Alle Kandidaten für einen Wirbel werden mitsamt ihrer größten Wirbelstärke und ihrer Position gespeichert. Ob es sich um einen negativen oder positiven Wirbel handelt, wird ebenfalls festgehalten.

5.4.2 Verhältnisparameter α

Eine wesentliche Anforderung ist, kleine Wirbel mit geringer Wirbelstärke auszusortieren. Würden - über alle Rotor-Stator-Positionen eines Messpunktes - alle gefundenen Wirbel

dargestellt werden, wäre eine Aussage über die Positionsverteilung schwer zu tätigen. Aus diesem Grund wurde der "relative Verhältnisparameter α " eingeführt. Er stellt alle Höchstwerte der gespeicherten Wirbel ins Verhältnis zum absolut höchsten Wert, welcher im Skalarfeld gefunden wurde. α_{rel} wird beim Rechenstart vorgegeben. Der Vorgang wird für positive und negative Werte getrennt ausgeführt.

$$\alpha_{rel} = \frac{\omega_z}{\omega_{z,max}} \quad (5.2)$$

Der Verhältnisparameter sorgt innerhalb einer Aufnahme dafür, dass Wirbel unter einer gewissen Wirbelstärke aussortiert werden. Somit bleiben, beispielsweise bei einem relativen Verhältnisparameter von $\alpha=0.8$, nur diejenigen Wirbel übrig, die zumindest 80% der Wirbelstärke des stärksten gefundenen Wirbels der Datei besitzen. Ein Vorteil des Verhältnisparameters ist die Möglichkeit festzustellen, ob es viele oder wenige starke Wirbel in der Nähe des größten Wertes gibt. In Abbildung 5-3 erkennt man den Verlauf der gefundenen Wirbelanzahl, welcher von Datei zu Datei stark unterschiedlich sein kann.

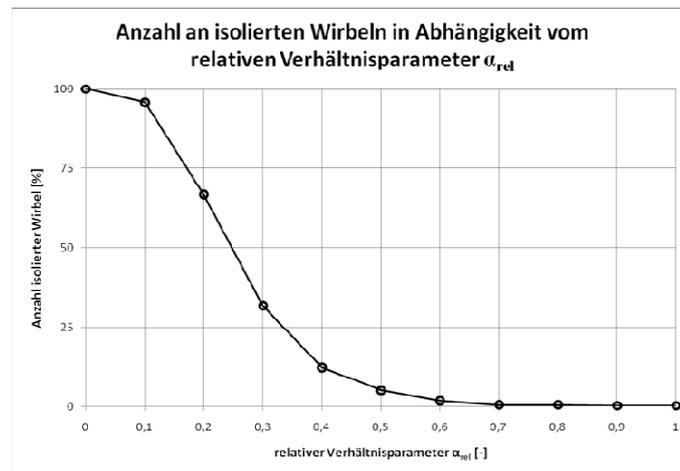


Abbildung 5-3: Anzahl isolierter Wirbel abhängig vom relativen Verhältnisparameter

Um nun die Wirbelstärken mehrerer Dateien untereinander (innerhalb einer RSP) vergleichen zu können, wird ein "absoluter Verhältnisparameter" definiert. Dieser ergibt sich durch folgende Berechnung mit dem relativen Verhältnisparameters:

$$\alpha_{abs} = \frac{\omega_{z,max,RSP}}{\omega_{z,max,Datei}} \alpha_{rel} \quad (5.3)$$

Somit ist es programmtechnisch möglich, Werte über 1 zu bekommen und bei den zutreffenden Dateien (mit zu schwachen Wirbeln) eine Wirbelanzahl von null zu erhalten. Lediglich die Datei mit den stärksten Wirbeln erhält einen absoluten Verhältnisparameter, welcher mit dem relativen Wert ident ist. Die restlichen Dateien erhalten ein α_{abs} , für welches gilt: $1 \geq \alpha_{abs,Datei} > \alpha_{rel}$. Auf die größte Wirbelstärke $\omega_{z,max,RSP}$ der gesamten RSP gesehen, bleiben wenige Wirbel von Interesse übrig.

5.4.3 Wirbeltyp

Die Programmierung sieht es vor, dass sowohl negative als auch positive Wirbelstärken allein betrachtet werden können. Allgemein sind sowohl negative als auch positive Werte von Interesse, deshalb kommt dieser Parameter in seiner eigentlichen Funktion nicht zum Einsatz.

Zusammenfassend ergibt sich der Ablauf des Hauptprogrammes entsprechend dem Schema in Abbildung 5-4 .

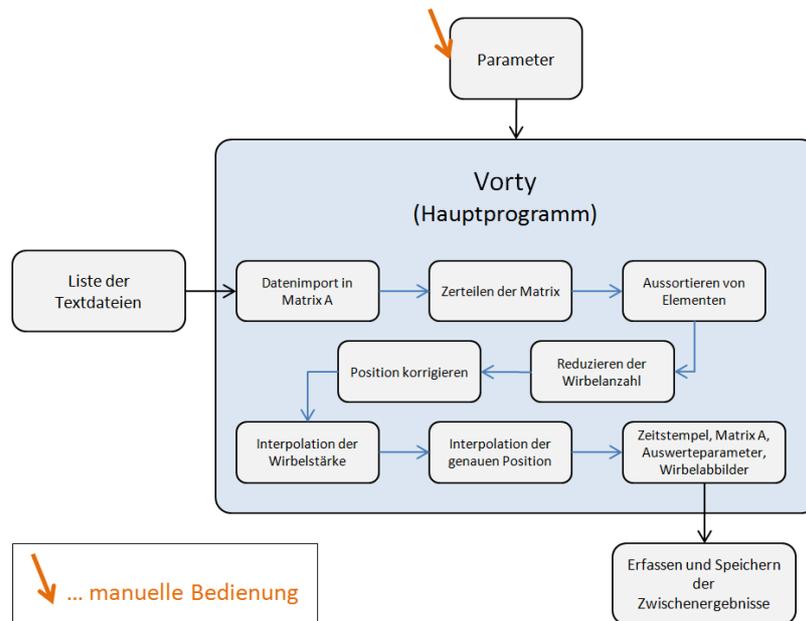


Abbildung 5-4: Schematischer Ablauf innerhalb des Hauptprogrammes zur Berechnung der Wirbelposition

5.4.4 Maskierung

Für die PIV-Messebene auf der Druckseite, die nicht nur die Strömung, sondern auch zwei Leitschaufeln, Lichtreflexionen und andere Bereiche der Wandung abbildet, musste eine Maskierung im Programm vorgenommen werden. Prinzipiell wurde die Maskierung bereits in Dantec Dynamic Studio vorgesehen, allerdings hatte diese einen Einfluss auf die Berechnung der abgeleiteten Größen, unter anderem auch auf die der Wirbelstärke. Abbildung 5-5 verdeutlicht die Ergebnisse einer Doppelbildauswertung, die mit einer Maskierung in Dynamic Studio durchgeführt wurde. Auf der rechten Seite ist zu sehen, dass alle Ränder in der Errechnung der Wirbelstärke einen Einfluss hatten. Durch die Reihenfolge, in der Maskierungen in Dantec Dynamic Studio durchführbar sind (zum Beispiel vor oder nach der Kreuzkorrelation), finden sich unterschiedliche Auswirkungen. Eine beispielhafte Analyse solcher Rohdaten in Vorty ist in Abbildung 5-6 zu sehen.

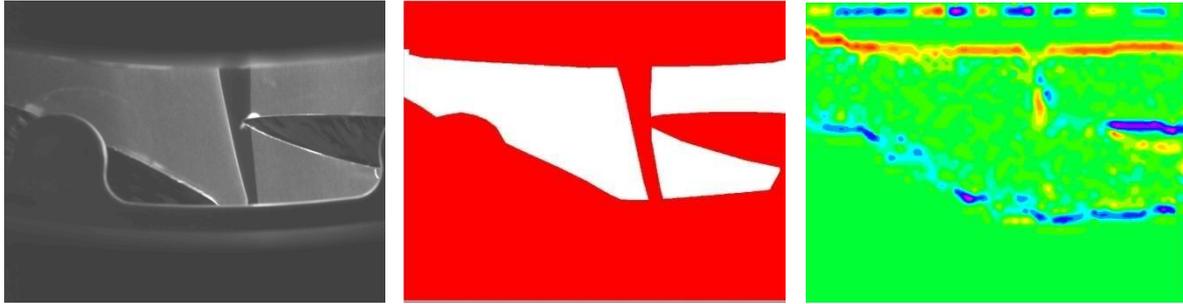


Abbildung 5-5: Dantec-Auswertung mit Einfluss der Maskierung - Links: Messebene, Mitte: Maskierung, Rechts: Ergebnis der Wirbelstärke

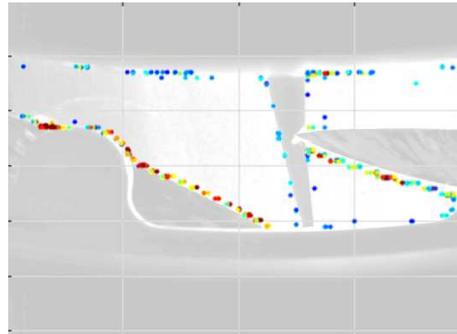


Abbildung 5-6: Resultierende, unaussagekräftige Auswertung der Rohdaten ohne eigene Maskierung

Die Entscheidung fiel auf eine neue Berechnung der bestehenden PIV-Auswertung in Dantec Dynamic Studio. Ursprünglich wurde die Kreuzkorrelation ohne Maskierung durchgeführt und die Maskierung erst anschließend auf den Vektorplot angewendet. Nun wird die Maskierung bereits bei den Doppelbildern ausgeführt, damit die Kreuzkorrelation bereits mit bereinigten Bildern startet. Die neuen Ergebnisse der Wirbelstärke wurden anschließend exportiert und dennoch einer weiteren, großzügigen Maskierung im Matlab-Programm unterzogen. (siehe Abbildung 5-7)

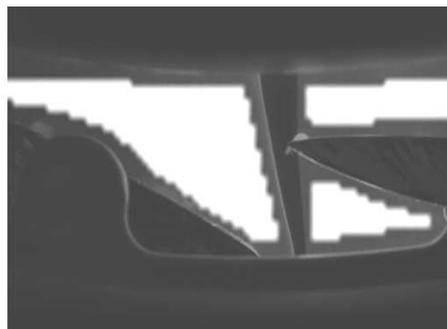


Abbildung 5-7: Maskierung der Druckseitenmessebene in Matlab

5.5 Berechnete Größen

5.5.1 Position

Autoren wie Kolář weisen darauf hin, dass sich die Wirbelstärke als Indikator für die Präsenz eines Wirbels generell nicht eignet. [20, S. 698] Grund dafür ist, dass die Wirbelstärke allgemein nicht zwischen Scherbewegung und Rotation des Fluides unterscheiden kann. [43, S. 58] In diesem Bewusstsein wurde mit Vorty eine Lokalisation von Wirbeln nichtsdestotrotz mit Werten der Wirbelstärke durchgeführt. Die Position wird, wie oben kurz erläutert, mithilfe der Aufteilung des Skalarfeldes durchgeführt. Es wird Ausschau nach lokalen

Extremwerten der Wirbelstärke gehalten und im Anschluss, nach einer Beurteilung mit dem relativen Verhältnisparameter, diese Position als Wirbelmitte interpoliert.

5.5.2 Größe

In der Strömungslehre kann man Wirbel in verschiedene mathematische Formen einteilen. Festkörperwirbel beschreiben beispielsweise ein Fluid, welches mitsamt einem Behälter in stationäre Drehung versetzt worden ist. Die Umfangsgeschwindigkeit c_u der Flüssigkeitspartikel hängt linear vom Abstand zum Drehmittelpunkt ab, ganz in Analogie zur Rotation eines Festkörpers (siehe Gleichung (5.4)). Man spricht bei Festkörperwirbeln auch von erzwungenen Wirbeln, da im Beispiel das Fluid durch den Behälter "gezwungen" wird, mitzurotieren.

$$c_u(r) = r \cdot \Omega \quad (5.4)$$

Mit r wird der Abstand zur Rotationsachse bezeichnet und mit Ω die Winkelgeschwindigkeit.

Im Gegensatz dazu beschreibt der freie Wirbel eine Verteilung der Umfangsgeschwindigkeit nach dem Drallsatz, bei dem sich die Umfangsgeschwindigkeit invers zum Abstand des Drehzentrums verhält:

$$c_u \cdot r = \text{const.} \quad (5.5)$$

Dieser Zusammenhang eignet sich gut zur Beschreibung der Fluidpartikelbewegung außerhalb des Wirbelzentrums. Im Drehzentrum findet man bei der mathematischen Beschreibung eine theoretisch unendlich große Winkelgeschwindigkeit vor, die Zirkulation ist, bis auf dieses theoretische Zentrum, null. [9, S. 16]

Wirbel in reibungsbehafteter Strömung kann man folgendermaßen betrachten: In der Mitte des Wirbels bildet sich eine Fluidrotation aus, die man als erzwungen betrachten kann und sich damit einen Festkörperwirbel gut annähert. Außerhalb dieses, sogenannten Kernwirbels, tritt ein freier Wirbel in Erscheinung, welcher mit steigendem Abstand zur Wirbelmitte, reziprok zum Abstand, an Umfangsgeschwindigkeit einbüßt. Diese Modellvorstellung eines Wirbels wird Rankine-Wirbel genannt. [9, S. 16] Der Geschwindigkeitsverlauf der Umfangskomponente ist in Abbildung 5-8 zu sehen.

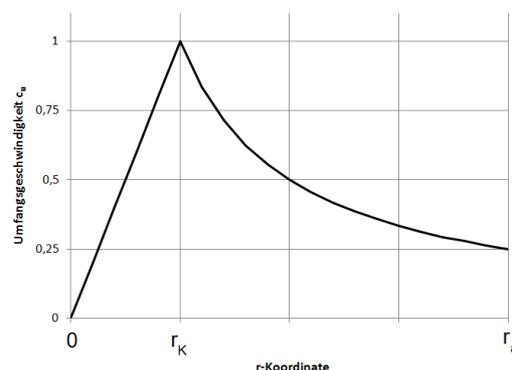


Abbildung 5-8: Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit c_u eines Rankine-Wirbels

Das Vorgehen zur Bestimmung der Wirbelgröße im Matlab-Programm läuft folgendermaßen ab: Werte der Wirbelstärke, die einem erkannten Wirbel zugeordnet wurden, werden als Kern des Wirbels betrachtet, da lediglich der erzwungene Wirbel eine Wirbelstärke besitzt. Mit der zugehörigen Fläche wird ein idealisierter Radius der Kernströmung bestimmt, welcher als "Kernradius" r_K in die Berechnung eingeht. Die Winkelgeschwindigkeit Ω_{Kern} des erzwungenen Wirbels errechnet sich mit der Zirkulation Γ_{Kern} (siehe Abschnitt 0) und der Fläche dieses Wirbelkerns, welche im Programm vorliegt. [9, S. 16]

$$\Omega_{Kern} \cong \frac{\Gamma_{Kern}}{2 \cdot r_k^2 \cdot \pi} \quad (5.6)$$

Über diesen Radius und die Winkelgeschwindigkeit wird der Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit im äußeren Bereich des (freien) Wirbels nach Formel (5.5) berechnet. Anschließend wird als errechnete Wirbelgröße jener Durchmesser ($2 \cdot r_a$) definiert und angegeben, bei dem die Umfangsgeschwindigkeit auf 25% der Geschwindigkeit am Kerndurchmesser gesunken ist:

$$c_u(r_a) := 0,25 * c_u(r_k) \quad (5.7)$$

Man muss erwähnen, dass der errechnete Durchmesser durch diese Definition und Vorgehensweise eine Rechengröße darstellt.

5.5.3 Zirkulation

Zur Berechnung der Zirkulation wurden die einzelnen "Wirbelabbilder" herangezogen, so wie sie im Berechnungsablauf in den Ergebnissen abgespeichert wurden. Die einzelnen Wirbelstärken $\omega_{z,i}$ an den jeweiligen Positionen wurden mit den Flächenteilchen ΔA_i des Wirbels multipliziert und diskret aufsummiert, um die Zirkulation Γ_{Kern} des Wirbelkerns anzunähern.

$$\Gamma_{Kern} \cong \sum_i \omega_{z,i} \cdot \Delta A_i \quad (5.8)$$

5.6 Berechnungsdurchgänge

Für die Bearbeitung der Textdateien aus Dantec Dynamic Studio werden für alle ausgewählten Betriebspunkte und Messebenen die in Tabelle 4 aufgelisteten Berechnungen durchgeführt.

Tabelle 4: Durchgeführte Berechnungsdurchgänge

Messebene	rel. Verhältnisparam.	Wirbelanzahl	Wirbeltyp	Betrachtungsfeldgröße
Saugseite Axial	$\alpha=0.8=\text{konst.}$	variabel	negativ und positiv	2,5x2,5 IA
Druckseite Axial25	$\alpha=0.8=\text{konst.}$	variabel	negativ und positiv	2,5x2,5 IA

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Axiale Messebene auf der Saugseite

6.1.1 Beschreibung der Darstellung

In Anlehnung an die Koordinatensysteme der Messebenen, so wie sie in Dantec Dynamic Studio festgelegt wurden (siehe Abschnitt 4.2.4), werden auch hier die Messebenen in diesen Koordinatensystemen beschrieben.

Für die Analyse der Saugseite wird die Messebene mit Histogrammen versehen. Unten rechts in Abbildung 6-1 ist beispielhaft die Messebene mit Blick auf das Laufrad dargestellt. Der Grafik überlagert finden sich blaue Punkte, welche jeweils eine Wirbelposition darstellen. Das obere Histogramm teilt die Wirbelanzahl nach ihrer x-Koordinate ein, das Histogramm links nach ihrer y-Koordinate. Es befinden sich 20 Balken entlang der x-Achse und 15 Balken entlang der y-Achse. Die Balken zeigen die relative Anzahl der Wirbel, das heißt, alle gezählten Wirbel pro Balken werden auf die Wirbel-Gesamtanzahl bezogen. Die dargestellte relative Anzahl der Wirbel ist einer Prozentangabe ähnlich.

Für den Vergleich der Messpunkte untereinander ist diese, auf die jeweilige Wirbel-Gesamtanzahl bezogene, Darstellung hilfreich, da unterschiedlich viele Wirbel in den Messpunkten vorliegen und die relativen Anzahlen anschaulicher sind.

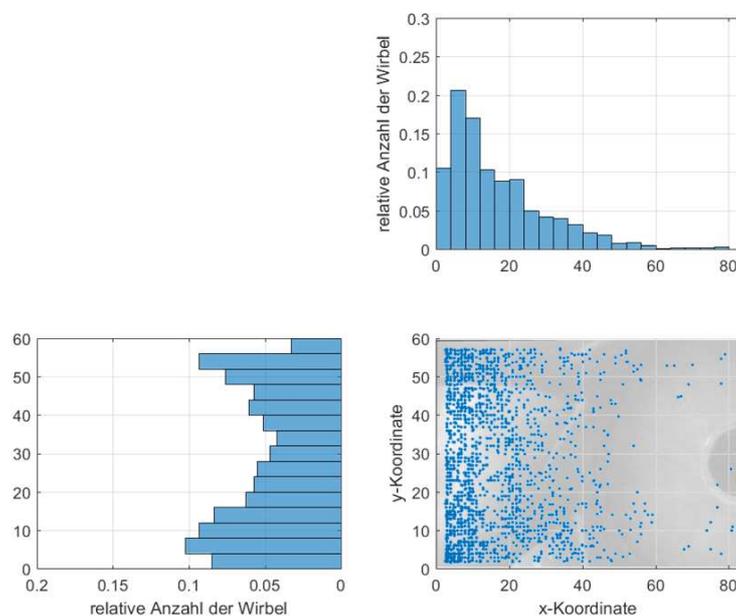


Abbildung 6-1: Histogramm-Darstellung der Wirbelpositionen des Messpunkts 4 (RSP0-RSP38)

Um zusätzliche Information aus diesen Bildern zu erhalten, werden die Wirbelpositionen mit den zugehörigen, berechneten Größen verknüpft. Beispielsweise kann nun die Zirkulation der Wirbel farblich dargestellt werden. Von großem Interesse ist der Aufenthaltsort, an dem sich Wirbel mit großer, mittelgroßer oder kleiner Zirkulation befinden.

In Abbildung 6-2 werden pro Koordinatenachse drei Histogramme mit gleicher Balkenbreite übereinandergelegt. Jedes Histogramm bezieht seine Werte auf die Anzahl der Wirbel, die in den jeweiligen Bereich (groß: L, mittel: M, klein: S) fallen. Es gibt sowohl Wirbel mit

negativer als auch mit positiver Zirkulation. In den Histogrammen ist das Vorzeichen dieser Größe nicht berücksichtigt, um die Darstellung zu verbessern.

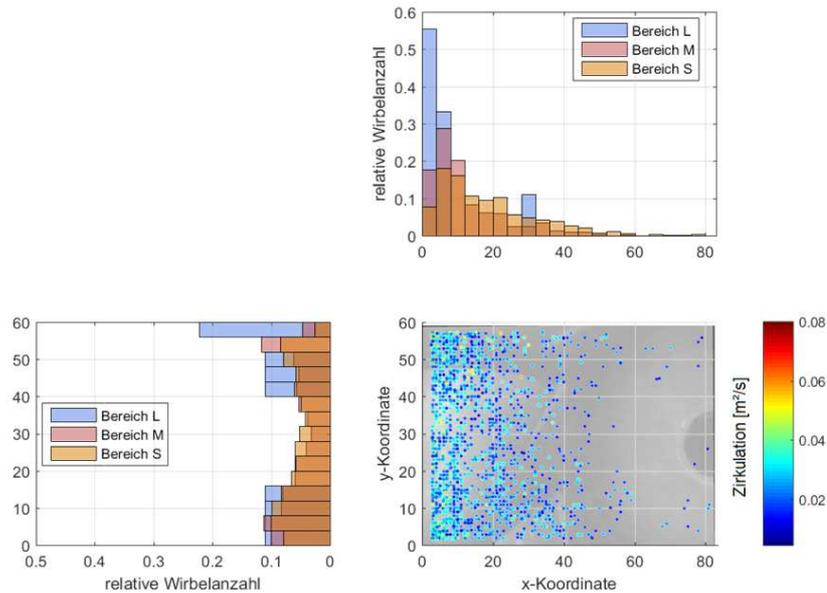


Abbildung 6-2: Beispielhafte Histogramm-Darstellung des Messpunktes 4 mit Information über die Zirkulation, aufgeteilt in drei Bereiche

Die Tabelle 5 gibt Auskunft über die Erfassung der Zirkulationswerte und Wirbeldurchmesser in den Bereichen L, M und S. Es ist wichtig, dass für jeden Messpunkt diese Einteilung der Bereiche beibehalten wird, um die unterschiedlichen Messpunkte vergleichen zu können. Diese Einteilung der Bereiche L, M und S richtet sich ausschließlich nach dem größten und kleinsten aufgetretenen Wert (ausgewertet über alle Messpunkte). Die Aufteilung in drei gleich große Spannen hat sich, obwohl willkürlich festgelegt, als die übersichtlichste herausgestellt.

Tabelle 5: Datenübersicht der Bereiche für die Zirkulation und Wirbelgröße

Histogramm für	Zirkulation [m ² /s]	Wirbel-durchmesser [m]
Bereich L	0,08 bis 0,055	0,026 bis 0,022
Bereich M	0,055 bis 0,029	0,022 bis 0,018
Bereich S	0,029 - 0,0045	0,018 bis 0,014

In den folgenden Abschnitten finden sich die Darstellungen mit Klassifikation der Zirkulation und der Wirbelgröße, in der Reihenfolge wie die Messpunkte in ihrem fallenden und steigenden Durchfluss angeordnet sind. Im Anschluss darauf ist die Interpretation zu finden, sowie eine Zusammenfassung der Erkenntnisse.

6.1.2 Darstellungen bei fallendem Durchfluss

6.1.2.1 Zirkulation

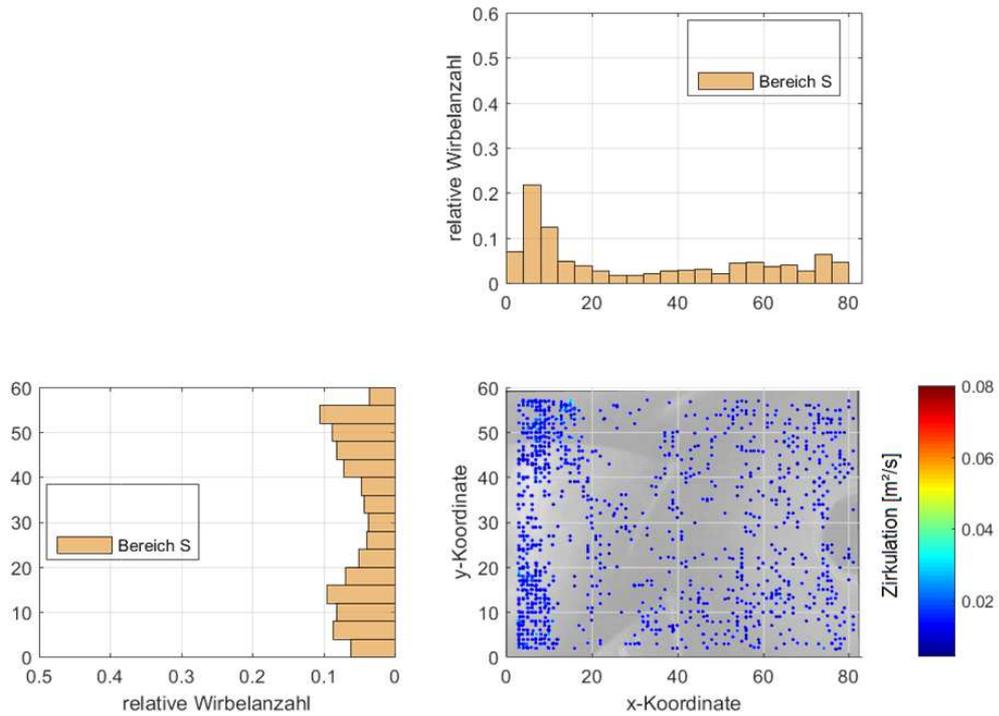


Abbildung 6-3: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 1

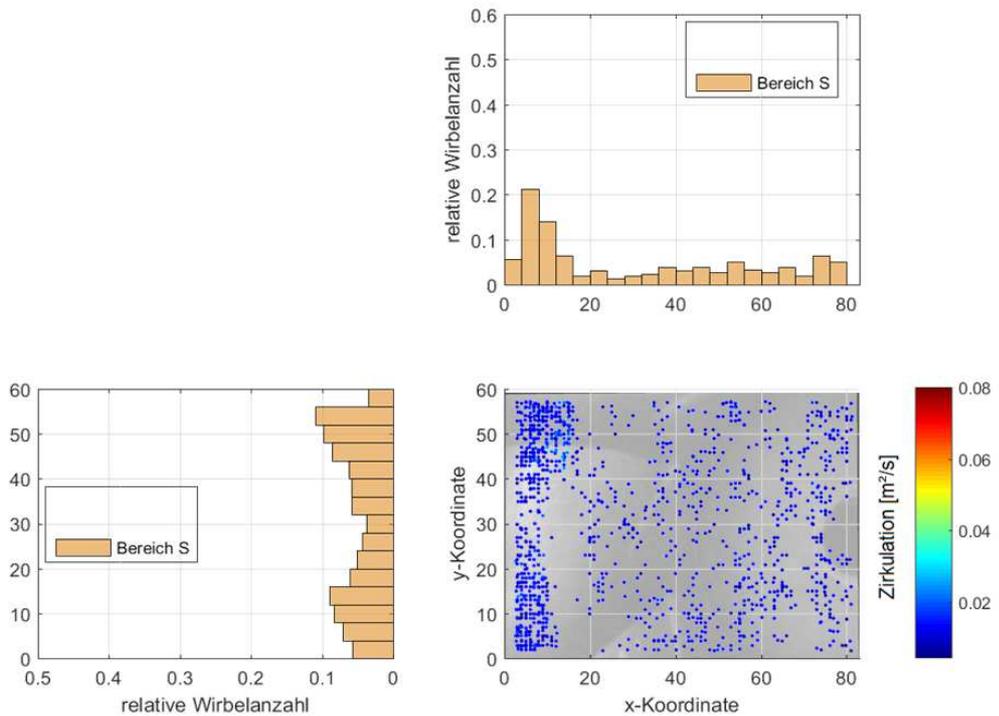


Abbildung 6-4: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 2

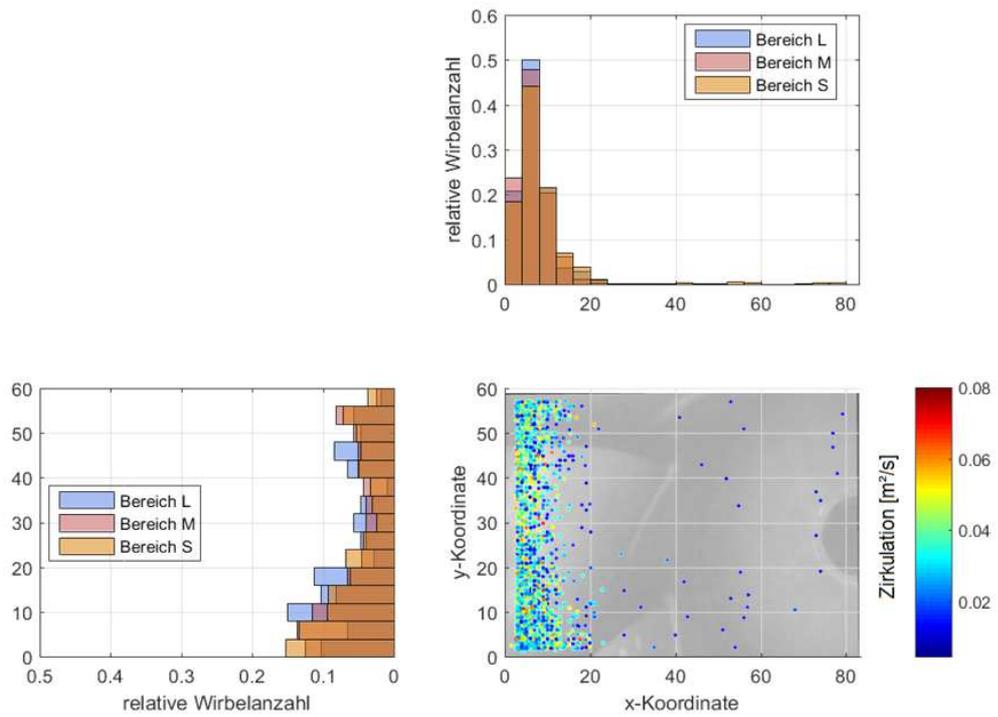


Abbildung 6-5: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 3

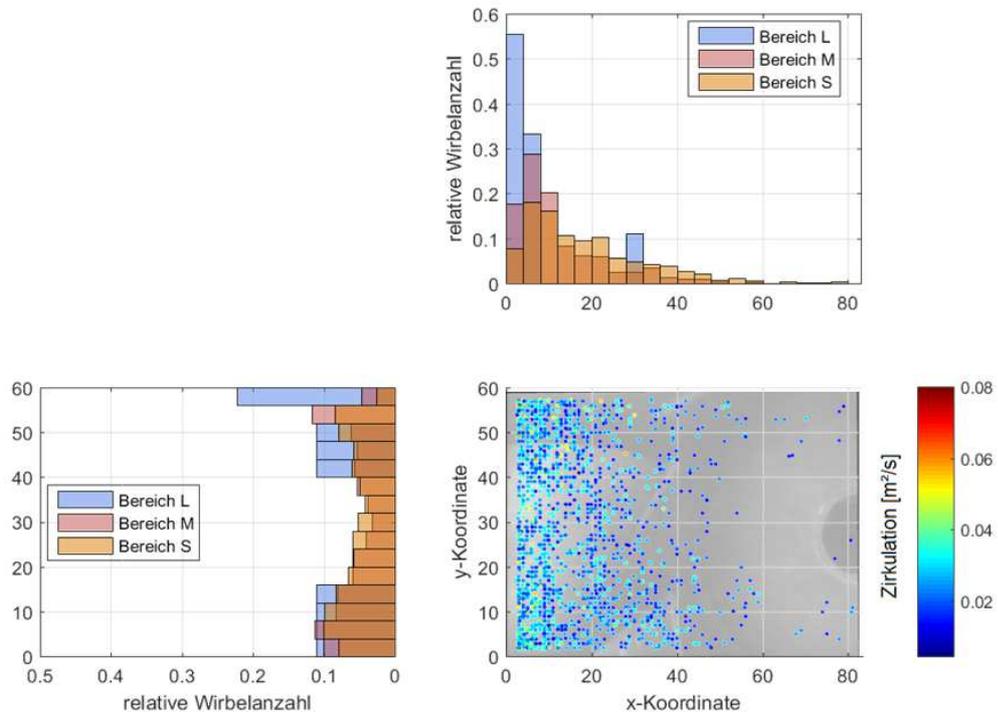


Abbildung 6-6: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 4

6.1.2.2 Wirbelgröße

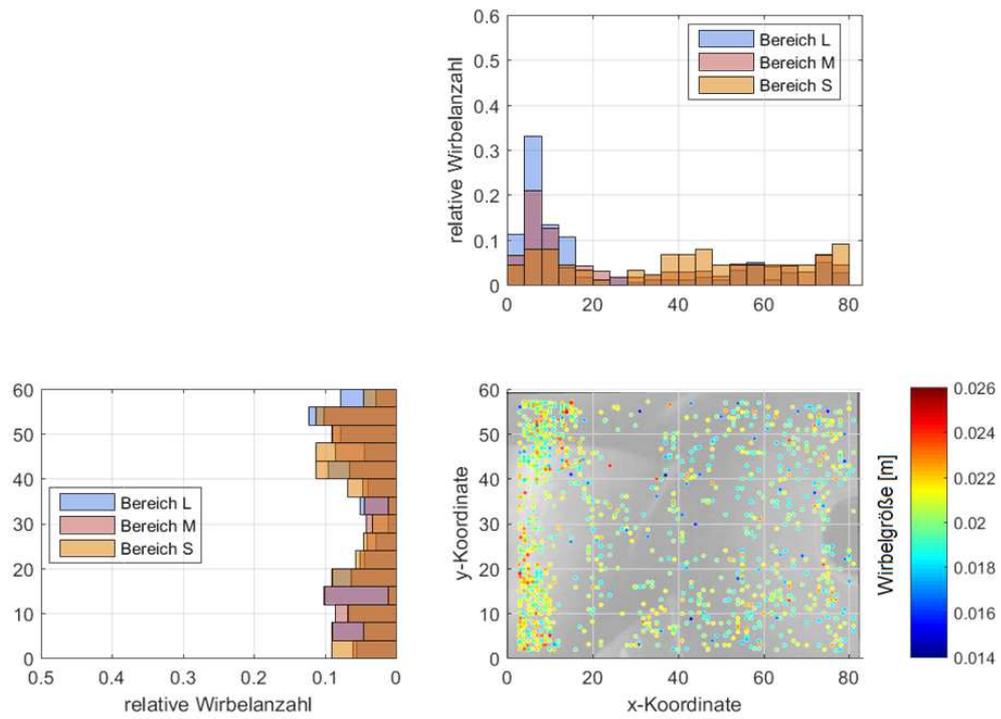


Abbildung 6-7: Wirbelgröße in m - Messpunkt 1

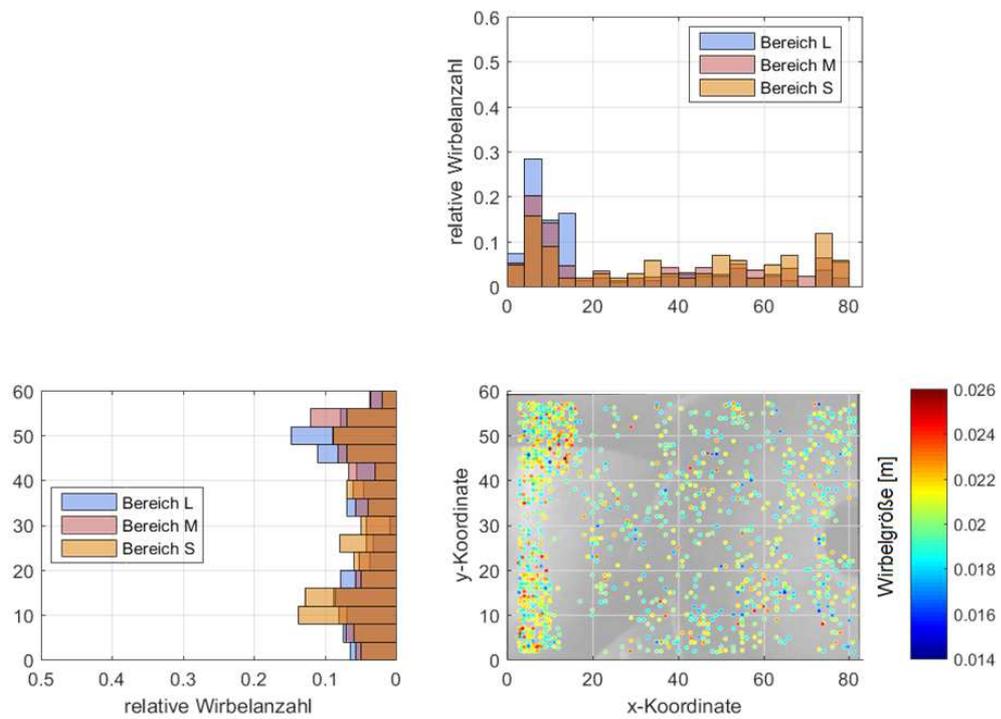


Abbildung 6-8: Wirbelgröße in m - Messpunkt 2

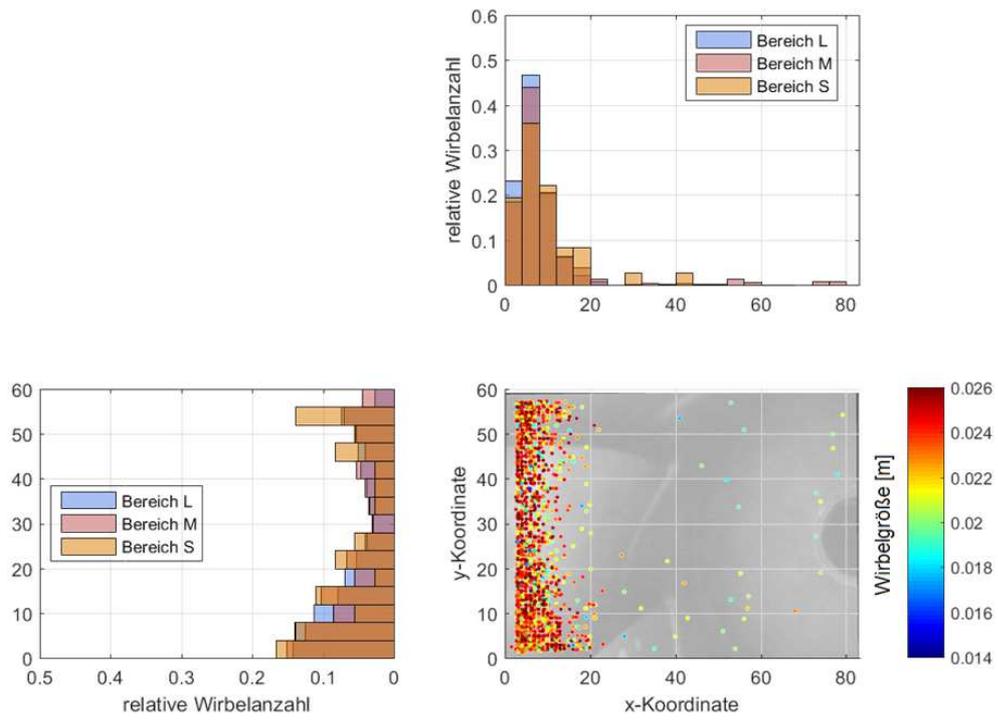


Abbildung 6-9: Wirbelgröße in m - Messpunkt 3

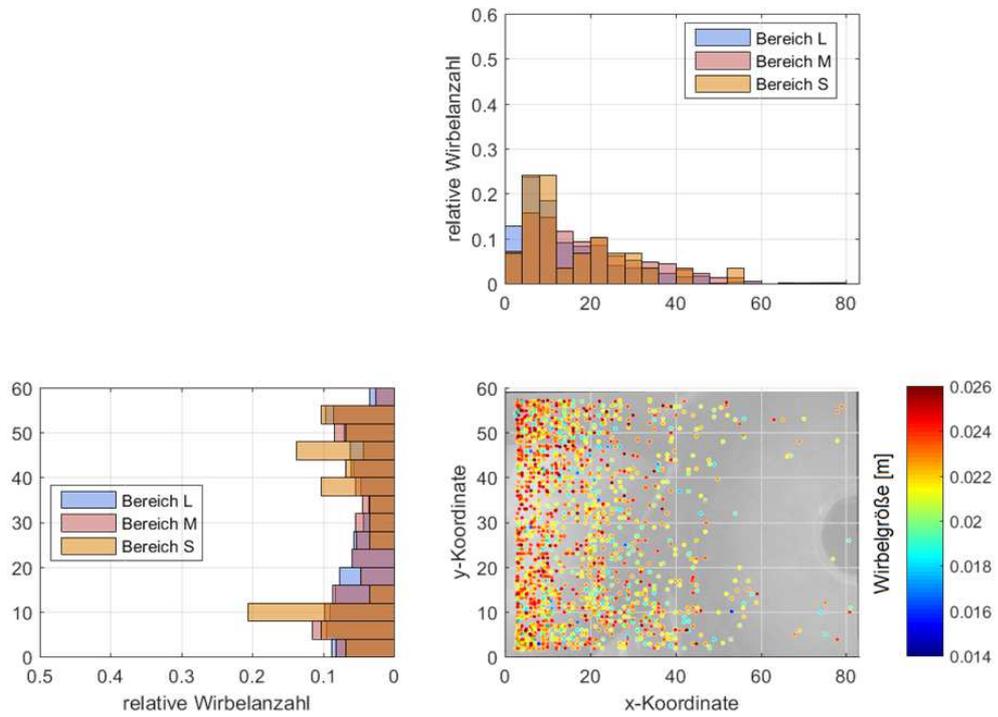


Abbildung 6-10: Wirbelgröße in m - Messpunkt 4

6.1.2.3 Interpretation

Die Pumpenkennlinie wird bei den in Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-10 dargestellten Ergebnissen mit fallendem Durchfluss durchfahren (Reihenfolge 1,2,3,4). Die nach Zirkulationswerten erstellten Histogramme finden sich in Abbildung 6-3 bis Abbildung 6-6. Größenklassifizierte Darstellungen sind in Abbildung 6-7 bis Abbildung 6-10 zu finden.

Die sich am stabilen Ast befindlichen Messpunkte 1 und 2 zeigen zwischen der x-Koordinate 20 bis 80 ein ähnliches Histogramm der Zirkulation. Am linken Rand der Messebene ist eine vermehrte Anzahl der Wirbel erkennbar. Die Zirkulation der gefundenen Wirbel ist durchgehend unter $0,029 \text{ m}^2/\text{s}$ und ist somit dem Bereich S zugeteilt.

Hinsichtlich der Wirbelgröße sind Messpunkt 1 und 2 ebenfalls vergleichbar. Die Aufteilung der Durchmesser auf die drei verschiedenen Bereiche ist gegeben, größere Wirbel (besonders im Bereich L von $0,022 - 0,026 \text{ m}$) befinden sich radial weiter außen.

Vollzieht die Maschine den Sprung auf den instabilen Ast, so ist bei Messpunkt 3 als erstes ein Förderhöhenabfall von 5% bemerkbar, aber auch eine neue Wirbelverteilung auf der Messebene: Die Wirbel befinden sich markant weit von der Rotationsachse weg. Sowohl die Zirkulation als auch die Wirbelgröße nehmen stark zu, es sind kaum mehr Wirbel in der Mitte des Rohres zu finden. Den Verlauf der gemittelten Zirkulation mitsamt der Standardabweichung in den Betriebspunkten 1 bis 4 findet sich in Abbildung 6-11 links.

Die kleinste Durchflusszahl besitzt Messpunkt 4, man spricht bereits von starker Teillast. Obwohl die einzelnen Wirbel niedrigere Werte der Zirkulation besitzen als die in Messpunkt 3, füllen sie die Messebene auf der Saugseite wesentlich weiter in die Rohrmitte aus. Bezüglich der Größe befinden sich die Wirbel in Messpunkt 4 allgemein auf ähnlichem Niveau als bei Messpunkt 3, was durch Abbildung 6-11 rechts ersichtlich ist.

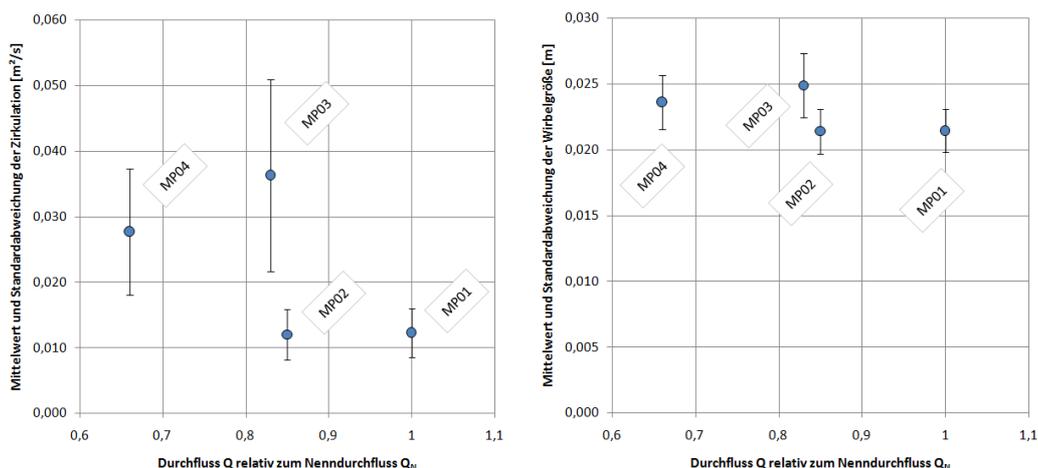


Abbildung 6-11: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Saugseite, fallender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser

Es ist zu erwähnen, dass eine Aussage, was zwischen den PIV-Messpunkten für eine Strömungssituation vorherrscht, nicht getätigt werden kann. Obwohl viele Messungen

durchgeführt worden sind, lässt sich ein Verlauf zwischen den Messpunkten nicht interpolieren, höchstens kann ein Trend angegeben werden.

Links in Abbildung 6-11 ist der Sprung der Zirkulation von Messpunkt 2 auf Messpunkt 3 gut zu erkennen. Es nimmt die Standardabweichung stark zu, die Schwankungen der errechneten Größe sind um ca. 42 % größer als zuvor in Messpunkt 2.

Die Wirbelgröße (in Abbildung 6-11 links) steigt ebenfalls (um ca. 14 %) bei diesem Übergang und bei annähernd gleicher Standardabweichung.

Wie in den Diagrammen oben dargestellt, ist die Pumpenkennlinie mit fallendem Durchfluss von einem großen Anstieg der Größen Zirkulation und Wirbelgröße geprägt. Auch die Wirbelpositionen auf der Messebene ändern sich beim Übergang vom stabilen auf den instabilen Ast signifikant. Dieser Übergang fällt mit dem Sprung in der Pumpenkennlinie von Messpunkt 2 auf Messpunkt 3 überein.

Durch die Zunahme an Wirbeln mit großer Zirkulation in den Messpunkten 3 und 4 kann darauf geschlossen werden, dass eine größere Wechselwirkung von Kräften zwischen Maschine und Fluid stattfindet und es im Saugrohrkonus zu Vibrationen kommt. Messungen von Druckpulsationen an der Modell-Pumpturbine [5], insbesondere am Saugrohrkonus bei der vorliegenden GVO von 15° und den betrachteten Messpunkten, wurden durchgeführt. Die Ergebnisse aus [5, S. 79] sind in Abbildung 6-12 über die Durchflussflussziffer aufgetragen. Der sogenannte Druckpulsationskoeffizient mit seiner Standardabweichung σ_p , ein Maß für die Druckschwankung, ist im dimensionslosen Kennfeld eingezeichnet. Ab dem Knick der Kennlinie steigt σ_p . Der Anstieg in den Druckschwankungen fällt mit dem veränderten Bild der Wirbelpositionen ab Messpunkt 3 überein.

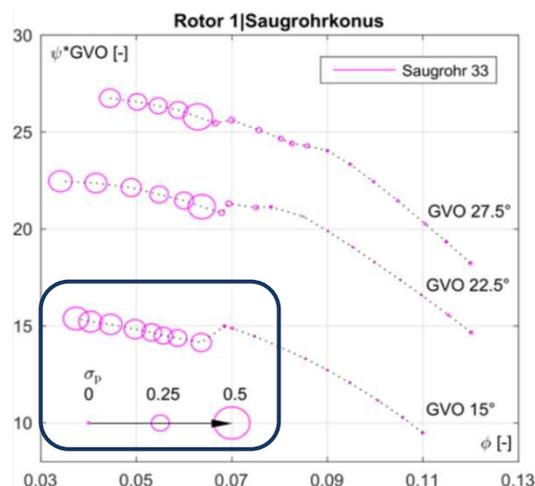


Abbildung 6-12: Druckpulsationen im Saugrohr des Rotors 1 bei GVO 15°. [5, Abb. 6–10]

6.1.3 Darstellungen bei steigendem Durchfluss

6.1.3.1 Zirkulation

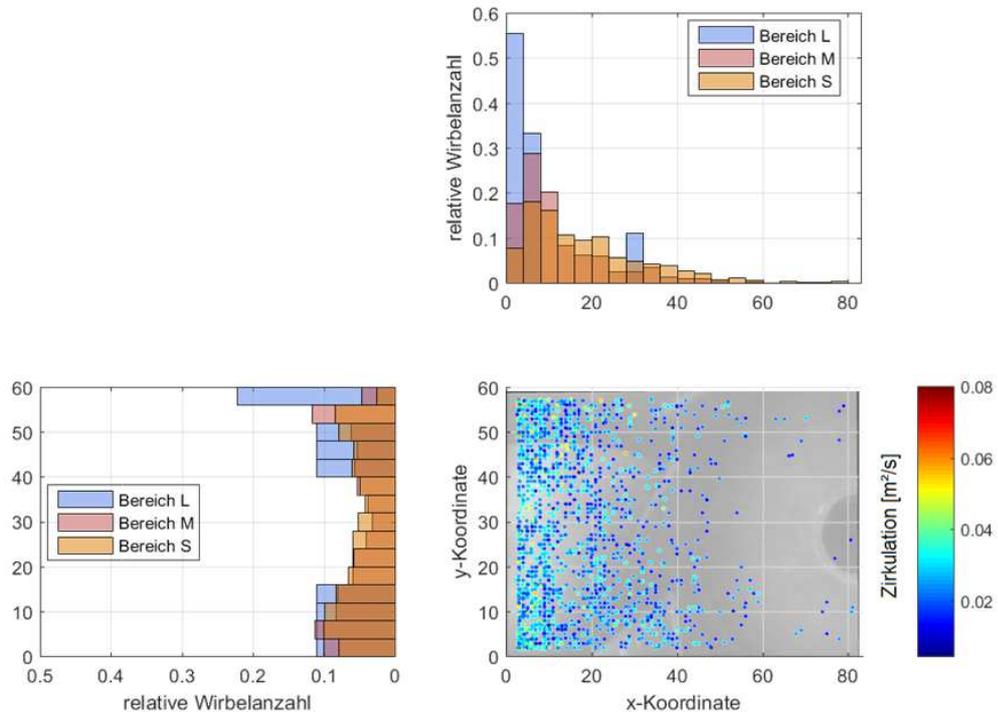


Abbildung 6-13: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 4

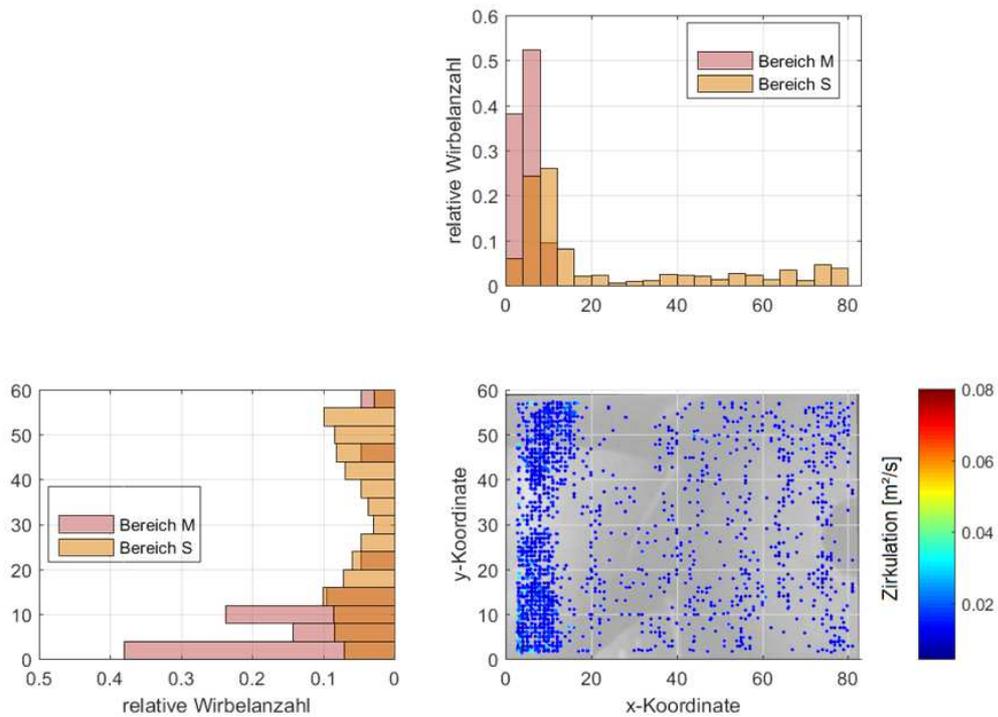


Abbildung 6-14: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 5

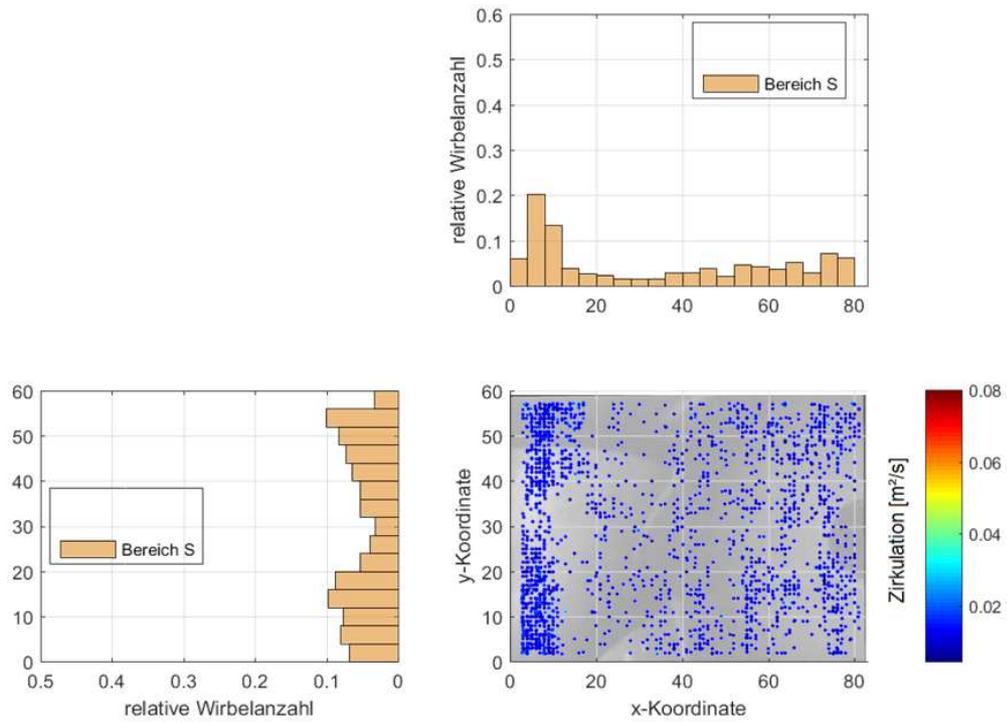


Abbildung 6-15: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 6

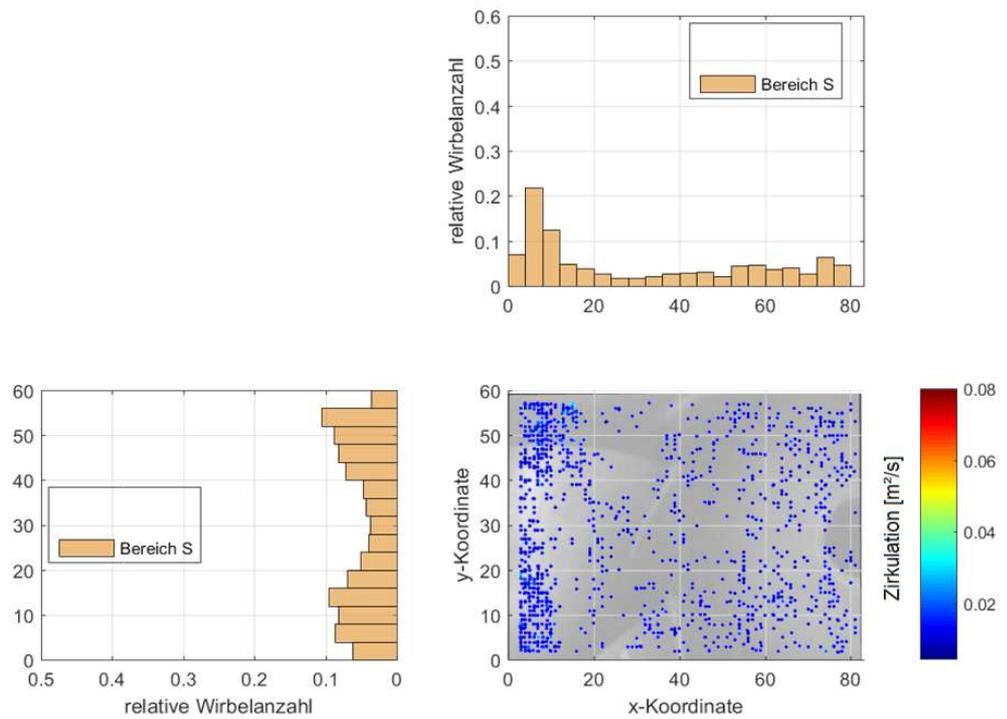


Abbildung 6-16: Zirkulation in m^2/s - Messpunkt 1

6.1.3.2 Wirbelgröße

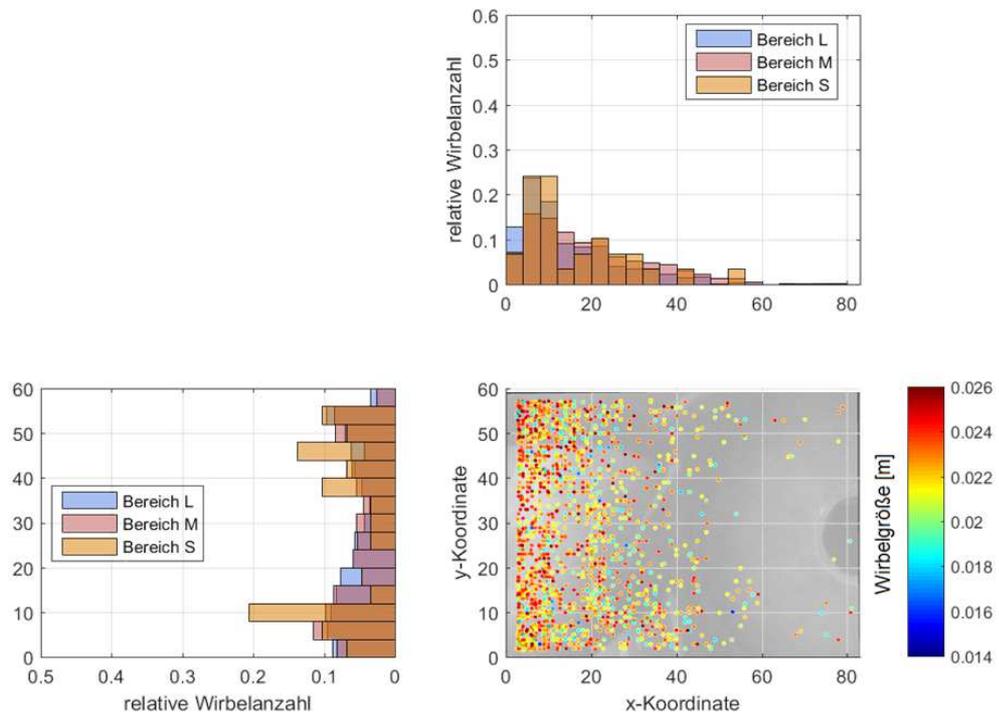


Abbildung 6-17: Wirbelgröße in m - Messpunkt 4

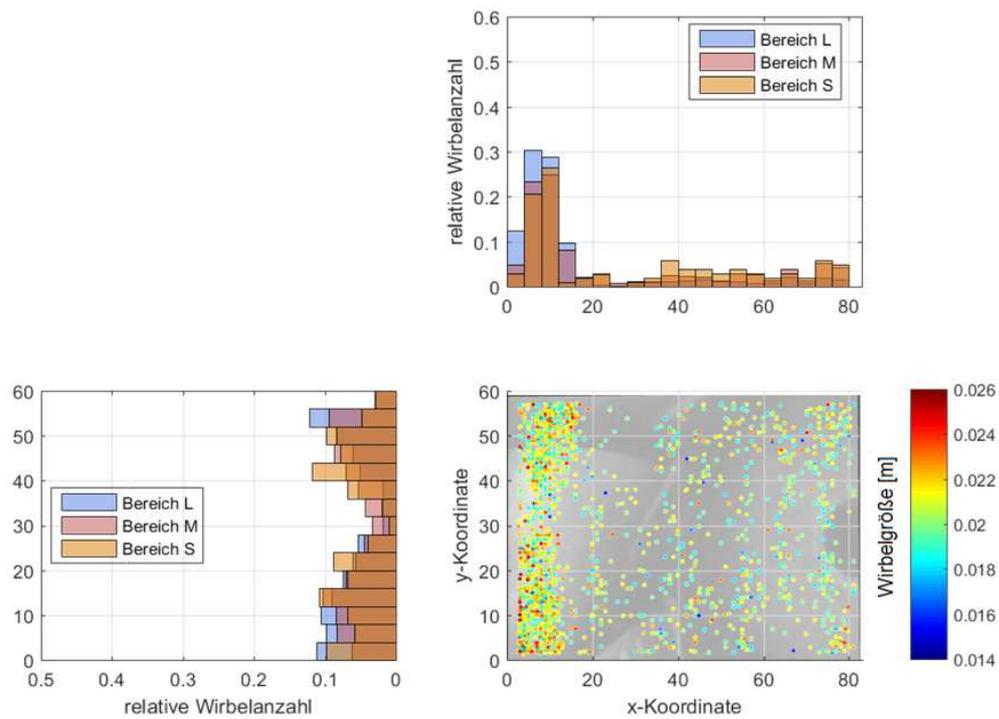


Abbildung 6-18: Wirbelgröße in m - Messpunkt 5

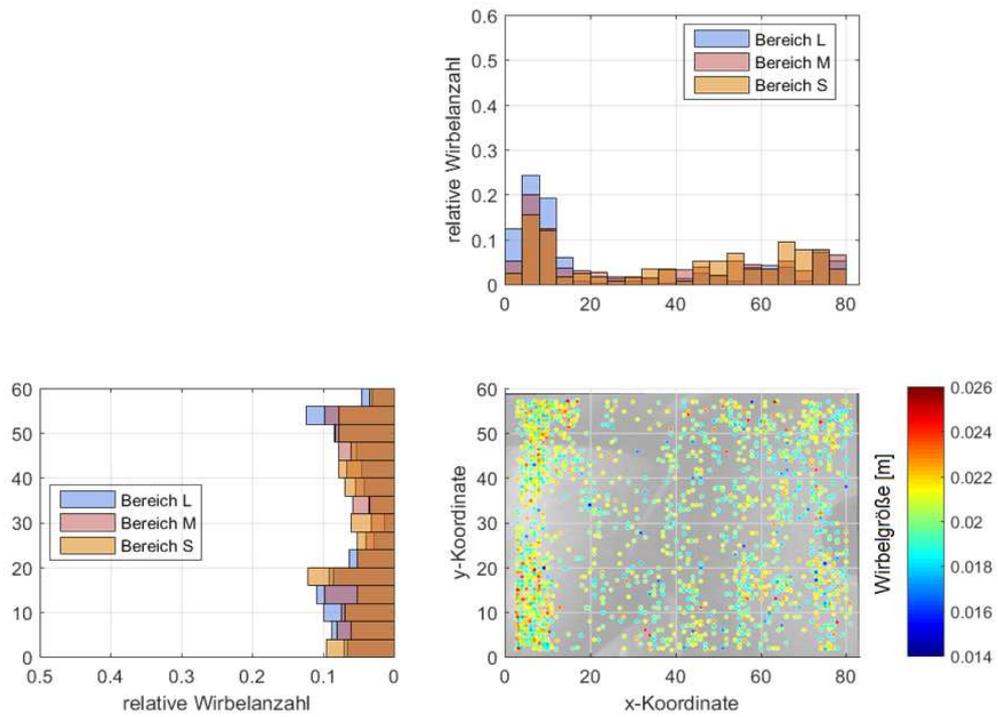


Abbildung 6-19: Wirbelgröße in m - Messpunkt 6

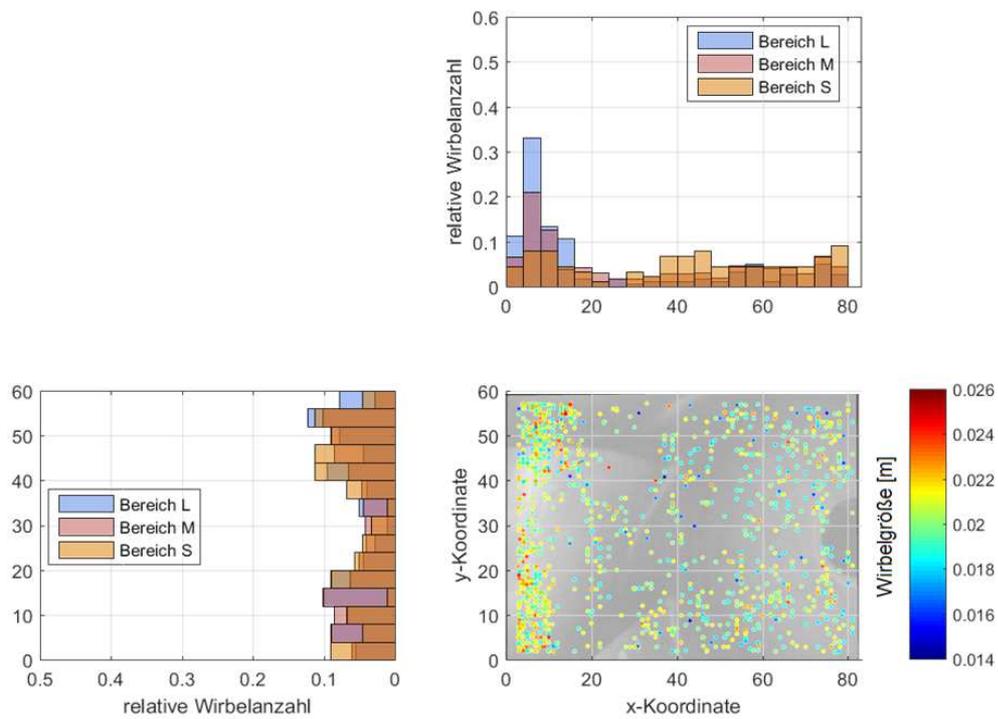


Abbildung 6-20 : Wirbelgröße in m - Messpunkt 1

6.1.3.3 Interpretation

Aufgrund der beschriebenen Hysterese der instabilen Pumpenkennlinie werden nun die Messpunkte bei steigendem Volumenstrom betrachtet. In dieser Reihenfolge (4-5-6-1) sind die Messpunkte 4 und 1 als Start- und Endpunkt ident zum oberen Fall betrachtet worden (fallender Volumenstrom). Der Übergang vom instabilen zum stabilen Ast vollzieht sich laut Pumpenkennlinie mit Messpunkt 5 auf Messpunkt 6.

Die Histogramme bezüglich der Zirkulation finden sich in Abbildung 6-13 bis Abbildung 6-16. Die Wirbelgrößen werden in Histogrammform in Abbildung 6-17 bis Abbildung 6-20 dargestellt.

Messpunkt 5, kurz vor dem Übergang auf den stabilen Ast, besitzt im Vergleich zu Messpunkt 6 mehr Wirbel auf der wandnahen Saugrohrseite. Bezüglich der Zirkulation sind auf der Außenposition der x-Achse (zwischen Koordinate 0 und 20) Wirbel des Bereichs M feststellbar, was bei Messpunkt 6 nicht der Fall ist: Hier sind die Wirbel durchgehend wieder dem Bereich S zugeteilt, wie es auch bei Messpunkt 1 und 2 der Fall ist.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den Wirbelgrößen, was Messpunkt 5 und 6 betrifft. Mit einer Verteilung von Wirbelgrößen des Bereichs S und M in Richtung der Rohrmitte und einem Band an Wirbeln aller Größen radial außen kann man eine gewisse Ähnlichkeit zu Messpunkt 6 feststellen. Messpunkt 6 zeigt im Vergleich zu Messpunkt 5 zwar weniger Wirbel im Bereich L, aber eine größere Verteilung der Wirbelgrößen hin zur Rohrmitte.

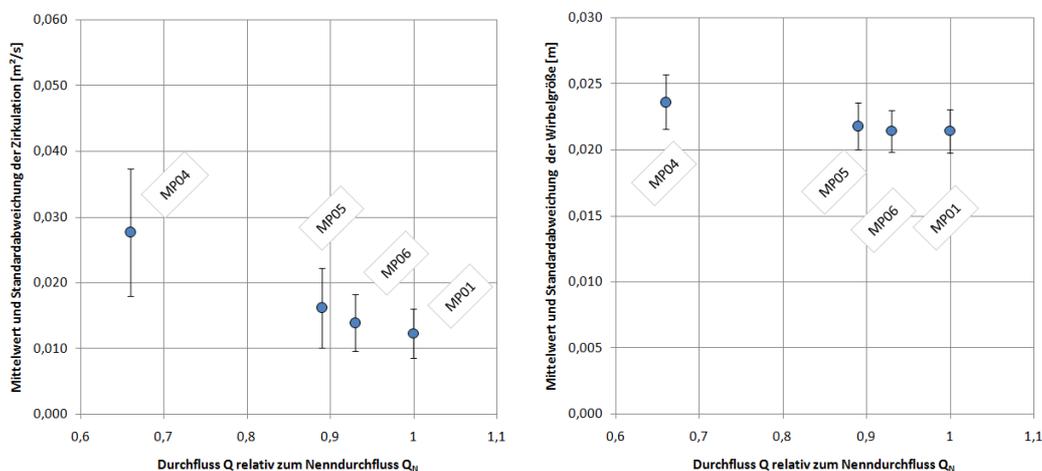


Abbildung 6-21: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Saugseite, steigender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser

Erneut kommen wieder statistische Betrachtungen zum Einsatz: Der Mittelwert der Zirkulation pro Messpunkt fällt stetig ab. (Abbildung 6-21 links) Die Wirbelgröße nimmt von Messpunkt 4 auf Messpunkt 5 um ca. 7,7% ab, bleibt danach bis Messpunkt 1 einigermäßen gleich.

Beim Durchfahren der Pumpenkennlinie lässt sich aus den errechneten Größen kein signifikanter Sprung vom instabilen auf den stabilen Kennlinienast feststellen, so wie er im Fall des sinkenden Durchflusses von Messpunkt 2 auf Messpunkt 3 stattgefunden hat.

6.1.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wurden auf der untersuchten axiale Messebene auf der Saugseite folgende Feststellungen gemacht:

Bei fallendem Volumenstrom fällt der Knick in der Kennlinie mit einer großen Änderung der Wirbelzirkulation und -größe überein. Aus den Druckpulsationsmessungen des Versuchs ist in diesem Bereich zusätzlich ein großer Anstieg der Druckpulsationen messbar. Das Bild der erkannten Wirbelpositionen ändert sich im Vergleich zu den Messpunkten des stabilen Kennlinienastes, es lässt sich eine Ausbildung einer Kernströmung hin zur Teillast vermuten.

Wird die Messung mit steigendem Volumenstrom untersucht, ist dem Sprung in der Förderhöhe keine markante Änderung der Zirkulation und der Größe zuzuordnen. Die Zirkulation sinkt in den vier Punkten jedenfalls stetig, je weiter man sich wieder dem Betriebsoptimum nähert. Die Bilder der Wirbelpositionen unterscheiden sich in den Messpunkten 4, 5 und 6 nicht wesentlich.

Betrachtet man alle Histogramme der y-Koordinate fällt auf, dass die Balken in der Mitte durchgehend kleiner sind als weiter außen. Das ist bei jedem Histogramm entlang der y-Achse der Fall, weil die rechteckige Messebene im runden Bereich des Rohres vor dem Laufrad nicht alle Wirbel beinhaltet, am wenigsten auf Höhe der Laufradnabe (y-Koordinate 30). So sind die Balken in der Mitte zufolge der rechteckigen Messebenenform kleiner, als die tatsächlich vorliegende Wirbelanzahl im Rohr ergeben würde.

6.2 Axiale Messebene auf der Druckseite

6.2.1 Beschreibung der Darstellung

Aufgrund der Abhängigkeit der Wirbelpositionen von der vorhandenen Rotor-Stator-Position wird keine Betrachtung mit Histogrammen vorgenommen. Die Aussagekräftigkeit von Histogrammen in x- und y-Richtung wird aufgrund der maskierten Bereiche ebenfalls verringert.

Obwohl die Vorgabeparameter im Matlab-Code für die Druckseite dieselben sind als für die Saugseite, wurden wesentlich mehr Wirbel in der Auswertung gefunden. Die folgenden Grafiken zeigen 30% der größten Wirbel, um dennoch Übersicht über die Zustände zu erhalten. Alle statistischen Analysen wurden mit der vollen Anzahl an Wirbeln durchgeführt.

Bezüglich der Orientierung der Messebene ist zu beachten, dass die Strömung die Leitschaufeln von oben links nach unten rechts passiert. Abbildung 6-22 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Das (nicht sichtbare) Laufrad, das auf der oberen Kante der Grafik angeordnet ist, dreht sich im Uhrzeigersinn. Der hellgraue Keil, der sich im Strömungskanal befindet, ist ein Effekt des einfallenden Laserlichts durch die aus Acrylglas gefertigten Leitschaufeln, die es dem Laser ermöglichen, den Leitapparat auszuleuchten. In diesem Bereich des Keils sind keine Aussagen möglich und muss ebenfalls mithilfe der Maskierung ausgeblendet werden.

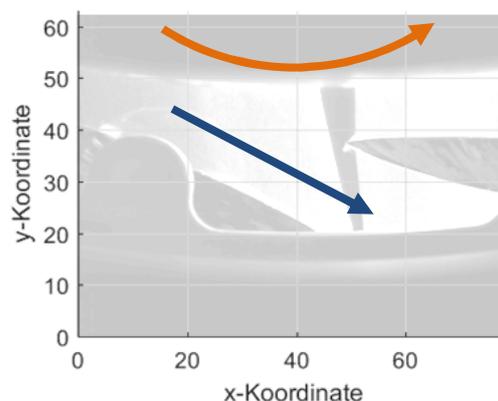


Abbildung 6-22: Fließrichtung (blau) der Strömung, Drehrichtung (orange) des Laufrades (nicht zu sehen) und der grau erscheinende Keil des einfallenden Laserlichts (zufolge Brechung)

Die folgenden Grafiken zeigen die Druckseite der Pumpturbine im Bereich des Leitapparates mit den gefundenen Wirbeln in der Messebene Axial25. Wie bei der Saugseite werden Wirbelgröße und Zirkulation farblich in den Reihenfolgen des steigenden und des fallenden Durchflusses gezeigt. Darauf folgt die Interpretation und Zusammenfassung der Ergebnisse. Auf die Abhängigkeit der Wirbelpositionen von der Rotor-Stator-Position wird ebenfalls eingegangen.

6.2.2 Darstellungen bei fallendem Durchfluss

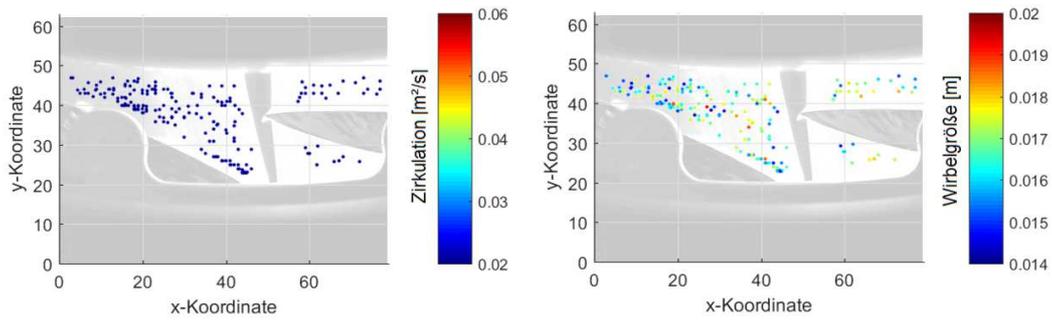


Abbildung 6-23: Messpunkt 1. Links: Zirkulation in m²/s, Rechts: Wirbeldurchmesser in m

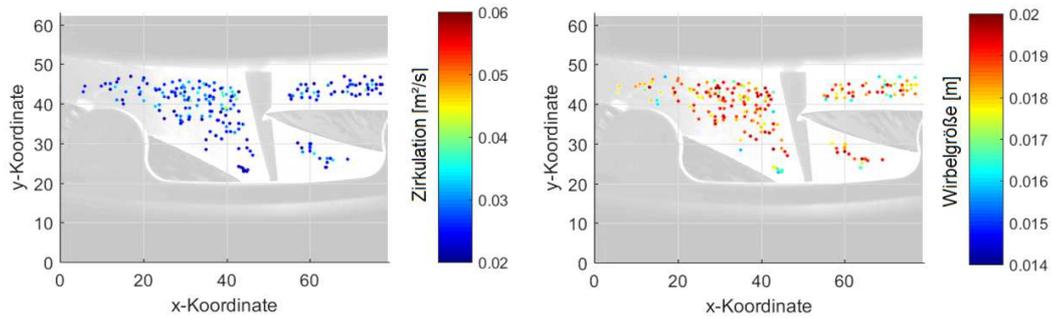


Abbildung 6-24: Messpunkt 2. Links: Zirkulation in m²/s, Rechts: Wirbeldurchmesser in m

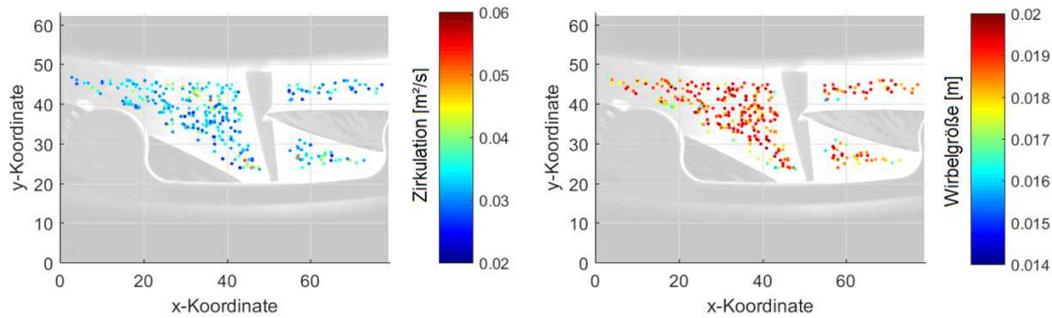


Abbildung 6-25: Messpunkt 3. Links: Zirkulation in m²/s, Rechts: Wirbeldurchmesser in m

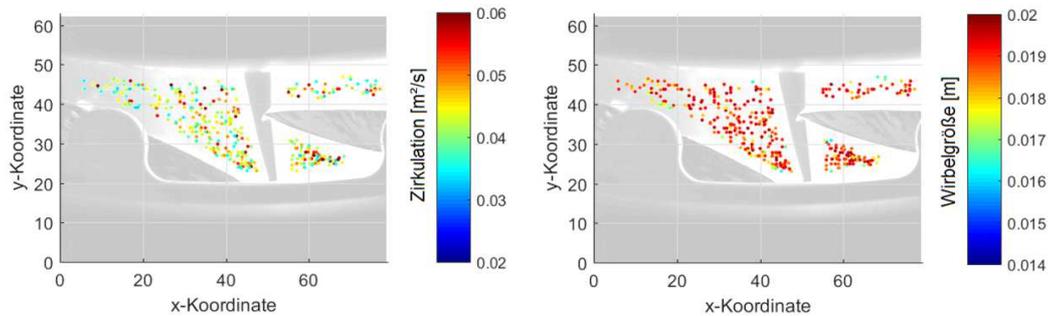


Abbildung 6-26: Messpunkt 4. Links: Zirkulation in m²/s, Rechts: Wirbeldurchmesser in m

6.2.3 Darstellungen bei steigendem Durchfluss

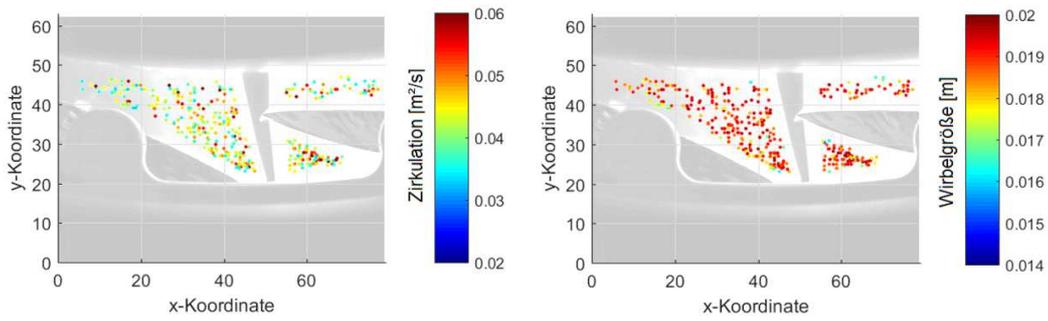


Abbildung 6-27: Messpunkt 4. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbelgröße in m

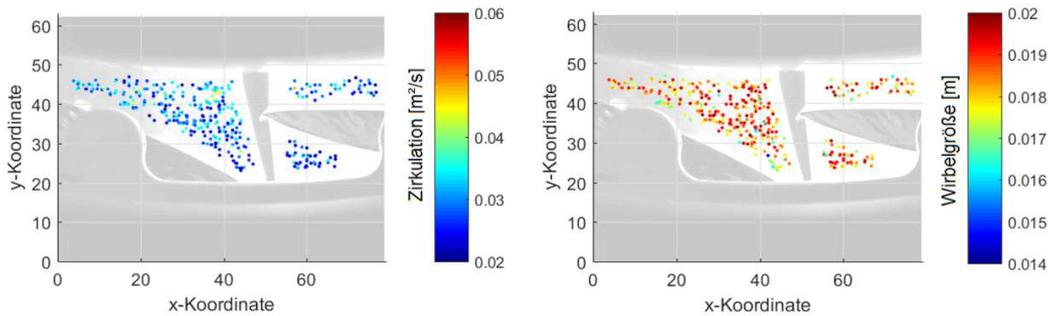


Abbildung 6-28: Messpunkt 5. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbelgröße in m

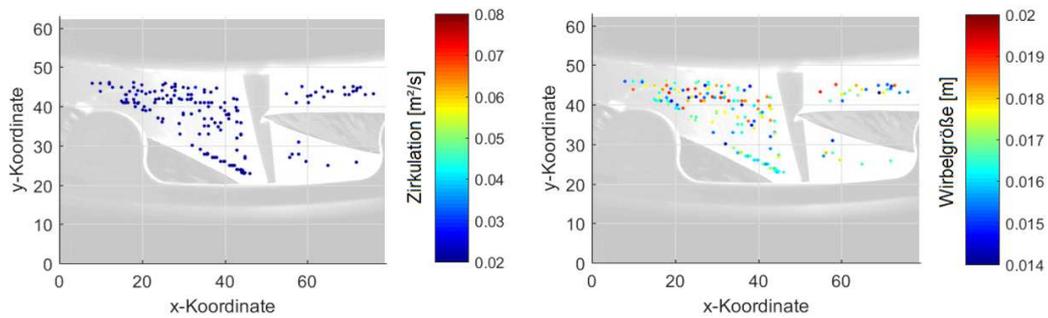


Abbildung 6-29: Messpunkt 6. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbelgröße in m

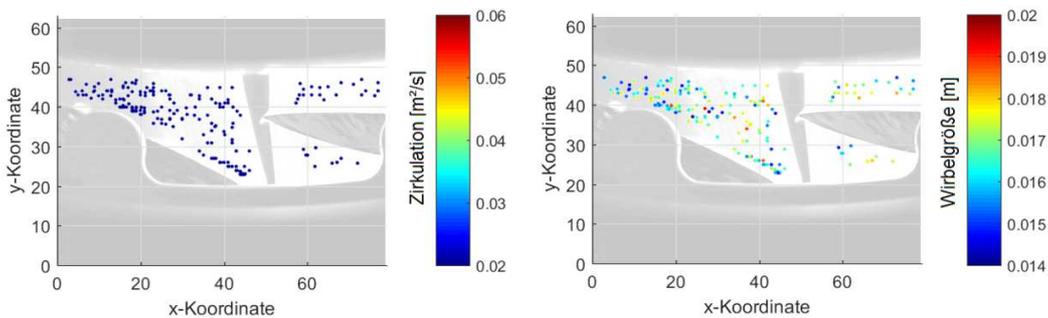


Abbildung 6-30: Messpunkt 1. Links: Zirkulation in m^2/s , Rechts: Wirbelgröße in m

6.2.4 Interpretation

Bei der Betrachtung der Betriebspunkte mit fallenden Durchfluss in Abbildung 6-23 bis Abbildung 6-26 fällt der Zirkulationsanstieg der Wirbel auf. Der Sprung von Messpunkt 3 auf 4 ist zwar vorhanden, aber deutlich geringer als auf der vorher behandelten Saugseite. Die Durchmesser der Wirbel nehmen, beginnend mit Messpunkt 2, kaum zu. Die stärksten und größten Wirbel finden sich in Messpunkt 4, welcher sich in starker Teillast befindet. Des weiteren ist der Sprung in der Wirbelgröße, so stark wie er sich auf der Druckseite gezeigt hat, nicht präsent. Die Wirbelgröße verläuft sowohl für den instabilen als auch für den stabilen Ast annähernd gleich (siehe Abbildung 6-31 rechts), was auch für die Standardabweichung zutrifft.

Durch die Maskierung ist, obwohl sie großzügig durchgeführt worden ist, bei Messpunkt 1 und 6 eine Unplausibilität feststellbar: Anders als bei allen anderen Messpunkten finden sich am unteren Ende der linken Leitschaufel Wirbelpositionen, die sehr geradlinig der Kontur der Schaufel folgen. Der Vergleich mit der verwendeten Maskierung in Abbildung 5-5 führt dazu, dass man diesen Wirbelpositionen nur begrenzt Glauben schenken kann. Obwohl die anderen Messpunkte zufriedenstellende Ergebnisse in dieser Hinsicht zeigen, liegt bei beiden Messpunkten 1 und 6 der eindeutige Hinweis vor, dass die Maskierung noch nicht zur Gänze ausreichend ist. Die errechnete Zirkulation dieser Wirbelpositionen, welche nicht signifikant höher ist als eine im Bereich innerhalb der Ebene, beeinflusst die Ergebnisse allerdings kaum.

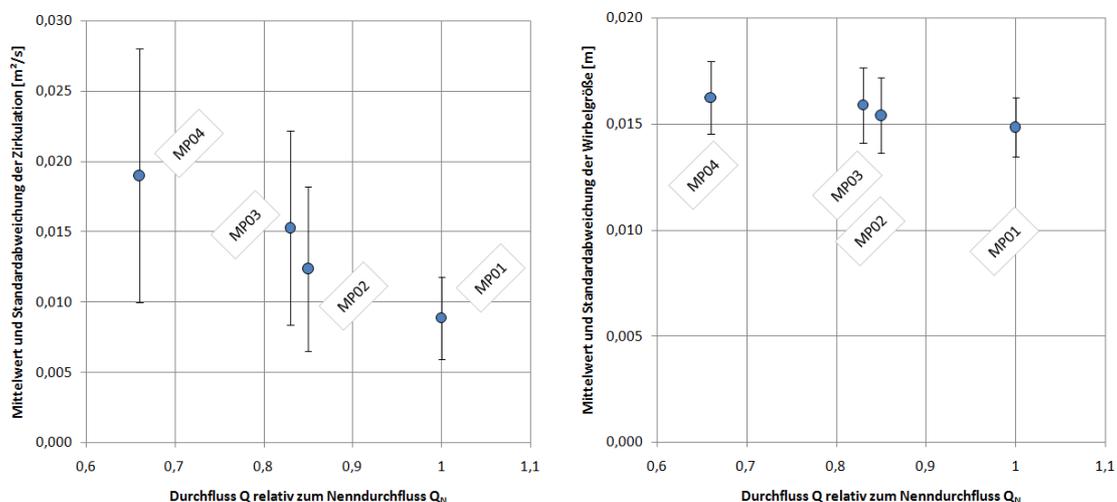


Abbildung 6-31: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Druckseite, Fallender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser

Auf der Druckseite wurden für den Rotor 1 im Rahmen des Forschungsprojektes Druckpulsationsmessungen im Leitapparat durchgeführt. Die Druckmessbohrungen in den Wandungen des Gehäuses waren sowohl in der Nähe der Nabenseite als auch in der Nähe der Kranzseite des Laufrades angeordnet. Die Messebene Axial25 liegt laut Abbildung 4-5 näher an der Kranzseite des Laufrades, aus diesem Grund werden in Abbildung 6-32 die Druckpulsation der Kranzseite gezeigt. Vergleicht man die Darstellung mit dem Diagramm in Abbildung 6-31 links, kann man den stetigen Anstieg der Druckschwankungen σ_p mit dem stetigen Anstieg der Zirkulation ab dem Kennlinienknick nachvollziehen.

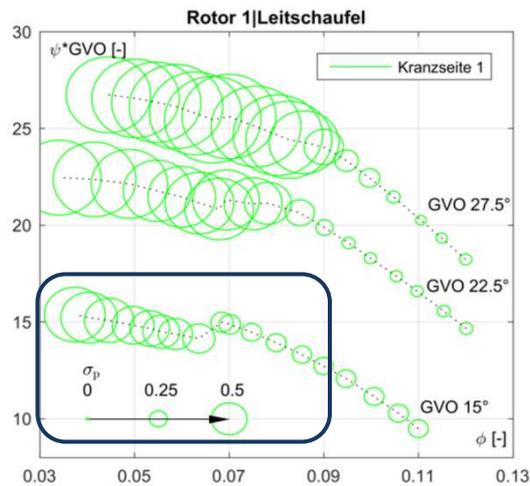


Abbildung 6-32: Druckpulsationen im kranzseitigen Bereich der Leitschaufeln. [5, Abb. 6-10]

Die Messpunktreihe bei steigendem Durchfluss lässt ebenfalls auf einen Sprung der Zirkulationswerte schließen, hier von Messpunkt 5 auf Messpunkt 6 (siehe Abbildung 6-33 links). Anders als auf der Saugseite, wo zwischen den beiden genannten Messpunkten kein Sprung erkennbar war, liegt hier eine starke Abnahme der Zirkulation von 36,7% vor. Auch die Wirbelgröße verringert sich, wenn auch leicht, um 5,64%. Danach, am stabilen Ast der Pumpenkennlinie mit Messpunkt 6 und 1, bleiben Zirkulation und Wirbelgröße auf gleichem Niveau.

Im Vergleich zur Saugseite (vergleiche Abbildung 6-21) sind die Werte der Zirkulation und Größe auf der Druckseite durchgehend kleiner, befinden sich aber in der selben Größenordnung.

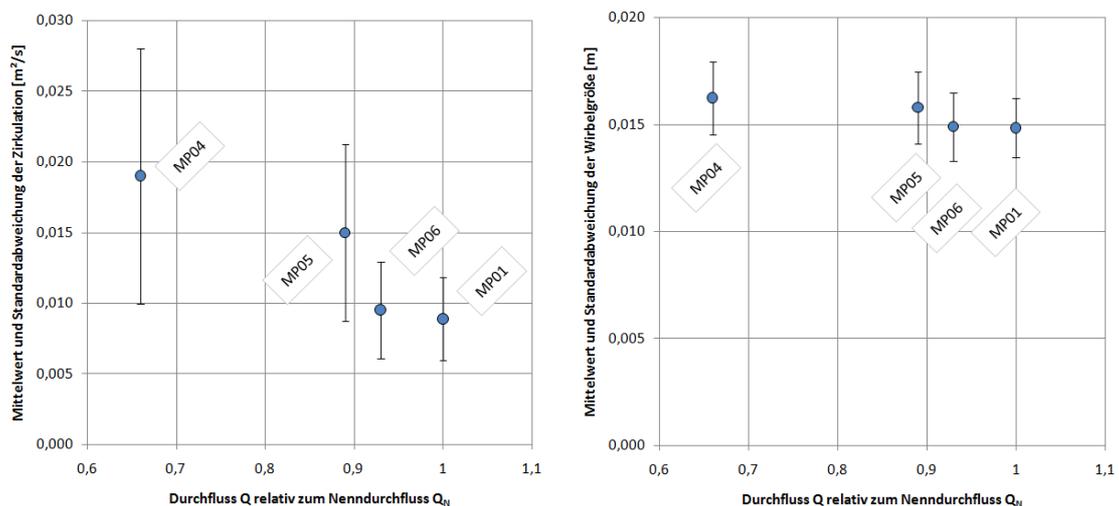


Abbildung 6-33: Mittelwerte der Zirkulation und Größe der Wirbel samt Standardabweichung der Druckseite, Steigender Durchfluss. Links: Zirkulation, Rechts: Durchmesser

6.2.5 Zusammenfassung

Für die Druckseite lassen sich in Fortführung zur Saugseite weitere Feststellungen machen:

Grundsätzlich verändern sich die Zirkulation und Wirbelgröße auf der Druckseite im Bereich des Kennliniensprungs weniger signifikant als wie auf der Saugseite. Der Sprung in der Kennlinie korreliert bei sinkendem und steigendem Volumenstrom mit einer Änderung in der Zirkulation und Wirbelgröße.

Da der Druckrückgewinn im Leitapparat durch die Wechselwirkung zwischen Laufradaustritt und Leitapparat stark beeinflusst wird, liegt die Vermutung nahe, dass die vorliegende Analyse einer Messebene allein auf der Druckseite nicht ausreicht, um eine aussagekräftige Beurteilung über die Strömungszustände zu machen. Aus dieser Überlegung heraus ist es nicht gegeben, dass die Diagramme in Abbildung 6-31 und Abbildung 6-33 repräsentativ für den ganzen druckseitigen Strömungskanal sind. Nichtsdestotrotz findet sich bei sinkendem Volumenstrom eine Übereinstimmung über die Wechselwirkung zwischen Fluid und Maschine in Form von Druckpulsationsschwankungen, die mit den gemittelten Zirkulationswerten in den Messpunkten die selbe, steigende Tendenz ergibt. Diese Übereinstimmung liegt mit großer Wahrscheinlichkeit daran, dass die analysierte Messebene in der Nähe der kranzseitigen Druckpulsationsmessung liegt.

6.2.5.1 Abhängigkeit von der Rotor-Stator-Position

Im vorliegenden Fall der Analyse ist eine Abhängigkeit der Wirbelpositionen von der Rotor-Stator-Position vorhanden, welche aber keine weiteren Informationen liefert. Die grau hinterlegten Wirbelpositionen des Messpunktes 5 in den Abbildungen Abbildung 6-34 bis Abbildung 6-40 stellen alle im Messpunkt erkannten Wirbelpositionen dar. Rot und als größere Punkte gezeichnet sind die Wirbel aus den betreffenden Rotor-Stator-Positionen.

Aufgrund der Messebenenordnung auf der Druckseite liegt die Hauptströmungsrichtung innerhalb der PIV-Ebene. Diese, in vielen Aspekten günstige Anordnung, bewirkt die ungleichmäßig verteilten Wirbelpositionen. Die Positionen sind stark unterschiedlich, allerdings sind sie nicht wiederkehrend und stellen statistisch zufällige Auftrittsorte dar. Gerade bei Teillast ist die Geschwindigkeitsverteilung im Leitapparat von großem Interesse, mithilfe von PIV [5] und auch beispielsweise mit Hitzdrahtanemometern [44] können hier aufschlussreiche Untersuchungen durchgeführt werden.

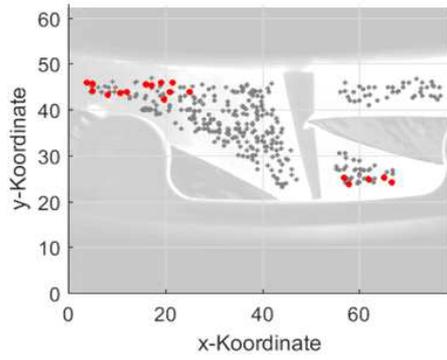


Abbildung 6-34: MP05 - RSP0

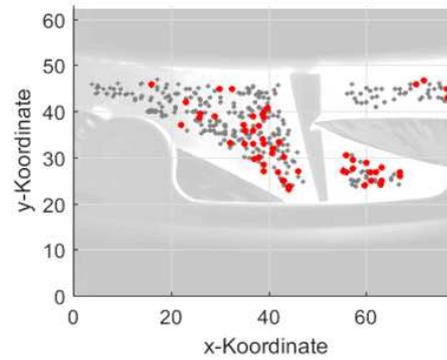


Abbildung 6-35: MP05 - RSP6

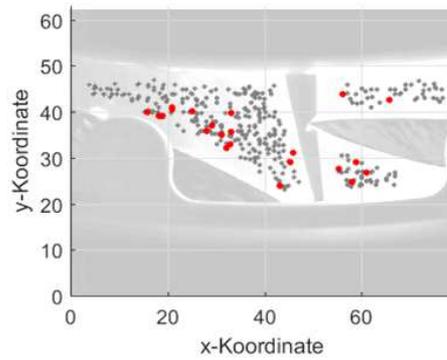


Abbildung 6-36: MP05 - RSP14

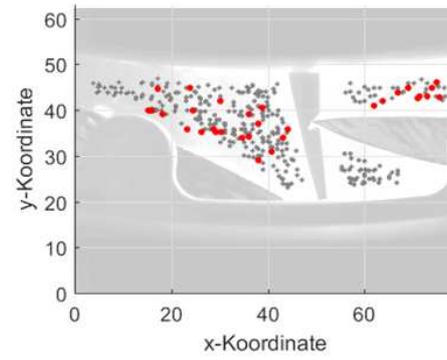


Abbildung 6-37: MP05 - RSP20

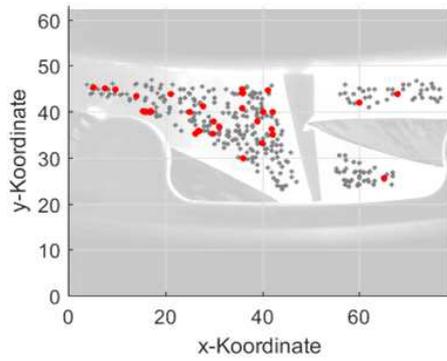


Abbildung 6-38: MP05 - RSP26

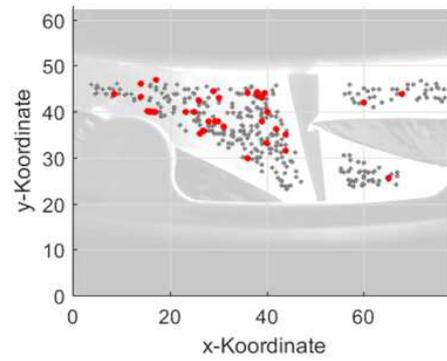


Abbildung 6-39: MP05 - RSP32

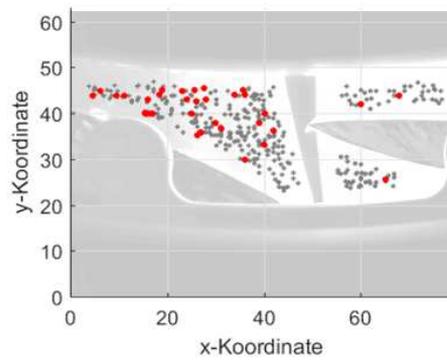


Abbildung 6-40: MP05 - RSP38

7 Ausblick

7.1 PIV-Auswertung

Alle Rohdaten stammen aus Dantec Dynamic Studio, in diesem Programm wurden alle PIV-Daten bereits ausgewertet. Eine denkbare Verbesserungsmöglichkeit ist, das Image Pre-Processing, die Kreuzkorrelation und die Berechnung der abgeleiteten Größen (wie z.B. der Wirbelstärke und der Zirkulation) in einem völlig separaten Matlab-Vorgang aus den Doppelbildern zu erhalten. Hierzu kann beispielsweise das kostenfreie Programmpaket PIVLab [37] verwendet und abgeändert werden, um Spezialsoftware wie Dantec Dynamic Studio auszuweichen und den gesamten Auswerte-Analyse-Vorgang in Matlab nach eigenen Vorstellungen abzuwickeln.

7.2 PIV-Analyse

Von großem Interesse sind natürlich die verbleibenden, nicht analysierten, Messdaten der anderen Leitschaukelstellungen und der anderen Messebenen. Die Messdaten des zweiten Rotors mitsamt seiner Parameter würden weitere Aufschlüsse über das Strömungsverhalten der Maschine geben, allerdings wäre eine Abänderung des Matlab-Codes notwendig, um die restlichen Messebenen mit ihrer unterschiedlichen Orientierung in der Maschine zu berücksichtigen. Die Messebene Axial75 auf der Druckseite ist besonders interessant, da mit ihrer Analyse die Frage beantwortet werden könnte, ob sich die Druckpulsationsmessung mit der Nabenseite deckt oder nicht.

7.3 Verfasster Code

Der vorliegende Programmcode nutzt die exportierten Skalarfelder aus Dantec Dynamic Studio, um Stück für Stück (mithilfe der Betrachtungsfeldgröße und den weiteren Parametern) die größten Wirbelstärkewerte zu finden, um sie als potentielle Wirbel, nach der Intensität sortiert, weiterzuverarbeiten. Wie in der Arbeit behandelt, eignet sich die Wirbelstärke im Allgemeinen nicht zur Feststellung von Wirbeln, weil sie nicht zwischen einer Scherbewegung und einer Rotation des Fluides unterscheidet. Weiter ist diese (obwohl intuitive) Interpretation eines Wirbels nicht immer vom hauptsächlichen Interesse.

Künftig könnte der Programmcode umgeändert/neu verfasst werden, um

- die Positionserkennung nach anderen Kriterien (beispielsweise nach dem Q-Kriterium) zu implementieren
- die Sortierung der Wirbel nach der Zirkulation durchzuführen (anstatt nach der Wirbelstärke)
- eine bessere Maskierung von Bereichen ohne aussagekräftige Daten durchzuführen

Obwohl es im Zeitraum der Verfassung der Arbeit den Versuch gab, den Matlab-Code für die Positionserkennung nach dem Q-Kriterium zu adaptieren (Anteil der Rotation überwiegt gegenüber dem Anteil der Scherbewegung), konnte die so gefundene Positionsinformation

nicht weiter verarbeitet oder verglichen werden, weil der Programmieraufwand eine komplett neue Programmstruktur erforderte und den Zeitrahmen sehr stark vergrößert hätte. Ferner ist die Auswertung der exportierten Datensätze aus Dantec Dynamic Studio ebenfalls zeitaufwendig, eine Beschleunigung der Berechnung durch verbesserten Code ist immer gegeben.

Die Vorsortierung der Wirbel nach der Zirkulation geht mit dem Problem einher, dass diese Größe bei allen möglichen Wirbel vorher berechnet werden müsste, um später dem Anwender die Möglichkeit zu geben, nur Wirbel mit einem gewissen Zirkulationswert (oder einer gewissen Wirbelgröße) anzeigen zu lassen. Die Rechenzeit würde sich verlängern, der Vorteil wäre eine noch bessere Beurteilung der Verhältnisse auf den Messebenen.

Kurzum bietet der noch verfügbare "Datenschatz" der Modell-Pumpturbine, welcher am Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen lagert, viele interessante Informationen über die Messung, welche allein mit Matlab-Code noch umfangreich ausgewertet, analysiert, dargestellt und interpretiert werden könnte.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Willert und J. Kompenhans, „PIV Analysis of Ludwig Prandtl’s Historic Flow Visualization Films“, Nr. May 2014, 2010.
- [2] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, und J. Kompenhans, *Particle Image Velocitometry: A Practical Guide*, 3. Auflage. Springer International Publishing AG, 2018.
- [3] J. Kepler, M. Guggenberger, F. Senn, und H. Jaberg, „Endbericht FFG-Programm: Bridge, PT Instability. FFG Projektnummer 846059“, 2014.
- [4] M. Guggenberger, F. Senn, und S. Leithner, „Experimental investigation of a pump turbine model in pump mode - Conception, preliminary measurements, high-speed visualisations and modifications for laser-optical measurements“, 2015.
- [5] M. Guggenberger, „Experimentelle Untersuchung der Strömungsmuster eines Francis-Pumpturbinenmodells im Teillastbetrieb des Pumpenquadranten“, Dissertation. TU Graz, 2018.
- [6] H. Sigloch, *Strömungsmaschinen Grundlagen und Anwendung*, 2. Auflage. München, Wien, Hanser: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [7] O. Jansen und T. Schöner, „Pumpspeicherkraftwerke - Vergleich unterschiedlicher Konzepte den Regelbedarf der Zukunft zu sichern“, *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, S. 41–54, 2011.
- [8] J. Kepler, M. Guggenberger, F. Senn, und H. Jaberg, „Projektbeschreibung FFG-Programm: Bridge, PT Instability. FFG Projektnummer 846059“, 2014.
- [9] J. F. Gülich, *Kreiselpumpen*, 4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [10] L. Prandtl, K. Oswatitsch, und K. Wieghardt, *Führer durch die Strömungslehre*, 9. Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1990.
- [11] J. Raabe und W. Knapp, „Instabilitäten der Drosselkurve bei Francis-pumpen mit beschaufelten Diffusoren; Untersuchung der Einflussgrößen“, 1988.
- [12] C. Pfleiderer und H. Petermann, *Strömungsmaschinen*, 4. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1972.
- [13] „Spezifische Drehzahl | KSB“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/spezifische-drehzahl/186490/>. [Zugegriffen: 19-Dez-2018].
- [14] E. Truckenbrodt, *Fluidmechanik - Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide*, Vierte, Er. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [15] N. A. Adams, *Fluidmechanik II - Einführung in die Dynamik der Fluide Skript*. Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik TU München.
- [16] H. Sigloch, *Technische Fluidmechanik*, 6. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [17] E. Truckenbrodt, *Fluidmechanik - Band 2: Elementare Strömungsvorgänge dichteveränderlicher Fluide sowie Potential- und Grenzschichtströmungen*, Vierte, Er. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [18] W. Meile, *Aerodynamik Skript*. TU Graz.
- [19] V. Holm, „Methods for Vortex Identification“, Lunds Universitet, 2012.
- [20] V. Kolář, „Vortex identification: New requirements and limitations“, *Int. J. Heat Fluid Flow*, Bd. 28, Nr. 4, S. 638–652, 2007.
- [21] M. Manhart, *Hydromechanik Skript*. TU München.
- [22] J. C. R. Hunt, A. A. Wray, und P. Moin, „Eddies, Streams, and Convergence Zones in Turbulent Flows“, 1988.
- [23] U. Dallmann, „Topological structures of three-dimensional flow separation“, *DFVLR-*

- IB Rep.*, Bd. No. 221-82, 1983.
- [24] H. Vollmers, H.-P. Kreplin, und H. U. Meier, „Separation and vortical- type flow around a prolate spheroid – Evaluation of relevant parameters“, in *Proc. of the AGARD Symposium on Aerodynamics of Vortical Type Flows in Three Dimensions*, 1983, S. AGARD-CP-342 14-1–14-14.
- [25] M. S. Chong, A. E. Perry, und B. J. Cantwell, „A general classification of three-dimensional flow fields“, *Phys. Fluids A*, Bd. 2, Nr. 5, S. 765–777, 1990.
- [26] J. Zhou, S. Balachandar, und R. J. Adrian, „Mechanisms for Generating Coherent Packet of Hairpin Vortices in Near-Wall Turbulence“, *J. Fluid Mech.*, Bd. 387, S. 353–396, 1999.
- [27] J. Jeong und F. Hussain, „On the identification of a vortex“, *J. Fluid Mech.*, Bd. 285, S. 69–94, 1995.
- [28] R. J. Adrian, „Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics“, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Bd. 23, Nr. 1, S. 261–304, 1991.
- [29] J. Woisetschläger, *Laser in der Schwingungs- und Strömungsmesstechnik Skript, Kapitel Lichtschnitt*. TU Graz, 2015.
- [30] D. D. A/S, *FlowManager software and Introduction to PIV Instrumentation*, 5th Editio. Skovlunde: Dantec Dynamics A/S, 2002.
- [31] Dr. Andreas Schröder, „DLR - Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik - Particle Image Velocimetry (PIV)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/as/en/desktopdefault.aspx/tabid-183/251_read-12796/. [Zugegriffen: 18-Juli-2018].
- [32] P. Z. Sterzinger, „Stromungsvisualisierung in einer Modell-Pumpturbine“, Diplomarbeit. Technische Universität Graz, 2016.
- [33] J. Woisetschläger, *Laser in der Schwingungs- und Strömungsmesstechnik Skript, Kapitel Streuung*. TU Graz, 2015.
- [34] LaVision, „Mie Scattering“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lavision.de/en/techniques/mie-rayleigh-raman/>. [Zugegriffen: 18-Juli-2018].
- [35] E. Hecht, *Optik*, 3., Vollst. München, Wien, Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2001.
- [36] J. Woisetschläger, *Laser in der Schwingungs- und Strömungsmesstechnik Skript, Kapitel Laser*. TU Graz, 2015.
- [37] W. Thielicke und E. J. Stamhuis, „PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB“, *J. Open Res. Softw.*, Bd. 2, 2014.
- [38] U. Shavit, R. J. Lowe, und J. V. Steinbuck, „Intensity Capping: A simple method to improve cross-correlation PIV results“, *Exp. Fluids*, Bd. 42, Nr. 2, S. 225–240, 2007.
- [39] N. Fliege, *Systemtheorie*, Erste Ausg. Stuttgart: B. G. Teubner, 1991.
- [40] J. Kepler, M. Guggenberger, F. Senn, und H. Jaberg, „Zwischenbericht FFG-Programm: Bridge, PT Instability. FFG Projektnummer 846059“, S. 1–15, 2015.
- [41] M. Guggenberger und F. Senn, „Experimental investigation of a pump turbine model in pump mode - Implementation , calibration and measurement campaign of laser-optical measurements“, 2017.
- [42] „Cell array - MATLAB - MathWorks Deutschland“. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/cell.html>. [Zugegriffen: 13-Okt-2018].
- [43] W. Thielicke, *The flapping flight of birds: Analysis and application*. Gronigen: Dissertation. University of Gronigen, 2014.
- [44] P. Hergt, H. Jaberg, und Frankenthal, „Die Abströmung von Radiallaufrädern bei Teillast und ihr Zusammenhang mit der Volllastinstabilität“. S. 11, 1989.

8 Anhang

A1 Programmaufbau

Code zur Erstellung von Speicherort-Listen zu den Rohdateien:

- V_Task_Creator_Main.m

Code zur Identifizierung von Wirbeln:

- Vorty_Main.m
 - import_file.m
 - mirror.m
 - masking.m
 - slice_up.m
 - refine.m
 - isolate_eddy.m
 - position_correction.m
 - cubic_interp.m
 - locate_fine.m

Code für Histogrammerstellung, Berechnung der Wirbelgrößen und der Zirkulationswerte:

- Vorty_Evaluate_Main.m
 - v_eval_get_adress.m
 - v_eval_get_position.m
 - v_eval_get_vorticity.m
 - v_eval_get_size_and_circulation.m
 - v_eval_get_timestamp.m
 - v_eval_refined_hist.m

A2 Matlab-Code

V_Task_Creator_Main.m

```
1 % Programm erstellt eine Liste aller Verzeichnisse, in denen die große
2 % Menge an Rohdaten hinterlegt ist. Diese Liste wird als .mat-File
3 % gespeichert und dient dem Auswerteprogramm als abarbeitbare Liste.
4
5 clear all; clc;
6 task_list={}; % Dateiliste
7
8 for k=1:21
9
10 directory = uigetdir; % Filespeicherort festlegen
11 disp(directory);
12
13 if directory ==0
14 disp(['Eingabe abgebrochen, aber das ist okay.']);
15 break
16
17 else
18
19 suffix='*.txt'; % Legt fest, welcher Dateityp aufgelistet werden soll
20 direc = dir([directory,filesep,suffix]); % Struct mit allen Dateinfos
21 [filenames_loop{1:length(direc),1}] = deal(direc.name); % auslesen aller Dateinamen
22
23 for m=1:length(filenames_loop)
24 filenames_loop{m,2} = directory; % alle Dateinamen bekommen ihr Verzeichnis
25 end
26
27 task_list{end+1,1}=filenames_loop;
28
29 end
30 end
```

Vorty_Main.m

```
1 clc, clear all, close all;
2
3 %% I. Datenimport
4
5 disp('Task-File auswählen'); % Aufforderung zur Task-Datei-Angabe
6 uiopen('*.mat'); % Die Mithilfe von V_Task_Creator_Main.m erstellte
7 % .mat-Datei auswählen
8 for u=1:size(task_list,1)
9
10 filenames = task_list{u,1}; % Entnehme einen Task und lade dessen Liste
11 % mit Verzeichnis und Dateinamen.
12
13 Results_F = cell(1,8);
14 %% II. Ausfuehrung
15 alpha = 0.8; % Verhaeltnisparameter
16 eddy_type = 2; % -1: negative Wirbelstaerken
17 % 1: positive Wirbelstearken
18 % 2: beide Vorzeichen
19
20 %% III. ALPHA KONSTANT
21 % Der vorgegebene Verhaeltnisparameter wird fuer eine Vorberechnung
22 % verwendet.
23
24 for k = 1:size(filenames,1)
25
26 directory = filenames{k,2}; % Entnehme das Verzeichnis des ausgewaehlten Tasks
27 filename = filenames{k,1}; % Entnehme einen Dateinamen
28 disp(filenames{k,1}); % Information fuer User
29
30 [F,alpha_neu,A,timestamp] = vorty_mod_alphakonstant(filename,directory,alpha,eddy_type);
31 % Uebergabe der Daten ins Kernprogramm, Erhalt der Ergebnis-Cell F
32
33 minimum_value_vorticity = zeros(size(F,1),1);
34 maximum_value_vorticity = zeros(size(F,1),1);
35
36 % Zuweisung der groessten und kleinsten Vorticity-Werte aller Wirbel
37 for l = 1:size(F,1)
38 minimum_value_vorticity(l,1)=F{l,5};
39 maximum_value_vorticity(l,1)=F{l,6};
40 end
```

```

41 % Zusammenbau der Ergebnis-Cell:
42 Results_F{k,1} = filenames{k}; % Zur Nachverfolgung der Rohdatei
43 Results_F{k,2} = F; % Alle Ergebnisse aus dem Kernprogramm
44 % werden hier pro Datei abgelegt
45 Results_F{k,3} = alpha_neu; % Uebergebener Verhaeltnisparameter aus
46 % dem Kernprogramm
47 Results_F{k,4} = A; % Das importierte Vorticity-Feld aus Dantec
48 % zur Nachverfolgung
49 Results_F{k,5} = min(minimum_value_vorticity); % Absolut niedrigste
50 % Wirbelstaerke der Datei
51 Results_F{k,6} = max(maximum_value_vorticity); % Absolut hoechste
52 % Wirbelstaerke der Datei
53 Results_F{k,7} = timestamp; % Zeitstempel aus der Textdatei
54 % (nicht weiter verwendet)
55 end
56
57 %% IV. ANALYSE
58 % Mit den gewonnenen Daten wird eine Vergleichbarkeit hergestellt:
59
60 % Gewichtung: Relativer Verhaeltnisparameter
61 vec_alpha = zeros(size(Results_F,1),1); % Instanzierung
62 vec_vort_max = zeros(size(Results_F,1),1);
63 vec_vort_min = zeros(size(Results_F,1),1);
64
65 for m = 1:size(Results_F,1) % Auslesen der benoetigten Werte
66 vec_alpha(m,1) = Results_F{m,3}; % Verhaeltnisparameter
67 vec_vort_max(m,1) = Results_F{m,6}; % groesste Wirbelstaerke
68 vec_vort_min(m,1) = Results_F{m,5}; % kleinste Wirbelstaerke
69 end
70
71 vort_max_tot = max(vec_vort_max); % Erfassung der absolut groessten und
72 vort_min_tot = min(vec_vort_min); % kleinsten Wirbelstaerke
73
74 for n = 1:size(Results_F,1)
75 g = Results_F{n,6} / vort_max_tot; % Gewichtung g
76 h = Results_F{n,5} / vort_min_tot; % Gewichtung h
77
78 if abs(vort_max_tot) >= abs(vort_min_tot)
79 Results_F{n,8} = 1/g * Results_F{n,3};
80 % gewichteter Verhaeltnisparameter, welcher die groesste
81 % Vorticity beruecksichtigt
82 elseif abs(vort_min_tot) >= abs(vort_max_tot)
83 Results_F{n,8} = 1/h * Results_F{n,3};
84 % gewichteter Verhaeltnisparameter, welcher die kleinste
85 % Vorticity beruecksichtigt
86 end
87
88
89 if Results_F{n,8} >= 1 % Quotienten groesser 1 werden zu 1 gesetzt
90 Results_F{n,8} = 1;
91 elseif Results_F{n,8} == -Inf % Programmstabilitaet: Wenn kein
92 % Wirbel in der Datei vorliegt
93 Results_F{n,8} = 1; % setze zu 1
94 elseif Results_F{n,8} == Inf
95 Results_F{n,8} = 1;
96 else
97 % left blank
98 end
99 end
100
101 %% V. Berechnung mit dem nun bekannten absoluten Alpha
102 % Neudurchlauf aller Dateien
103 for k = 1:size(filenames,1)
104 directory = filenames{k,2}; % Aufrufen des betroffenen Verzeichnisses
105 filename = filenames{k,1}; % Aufrufen der betroffenen Datei
106 disp(filename); % Fortschritt-Information fuer User
107
108 if Results_F{k,8} == 0 % Zur Programmstabilitaet
109 % left blank
110 else
111
112 [F,alpha_neu,A,timestamp] = vorty_mod_alphakonstant(filename,directory,Results_F{k,8},
eddy_type);
113 % Uebergabe der Daten ins Kernprogramm, Erhalt der Ergebnis-Cell F
114 % Neue Eingabe: Absoluter Verhaeltnisparameter aus der Vorberechnung
115
116 minimum_value_vorticity = zeros(size(F,1),1);
117 maximum_value_vorticity = zeros(size(F,1),1);

```

```

118
119 % Ausgabe der groessten und kleinsten Wirbelstaerken
120 for l = 1:size(F,1)
121 minimum_value_vorticity(l,1)=F{1,5};
122 maximum_value_vorticity(l,1)=F{1,6};
123 end
124
125 % (erneuter) Zusammenbau der Ergebnis-Cell:
126 Results_F{k,1} = filename; % Zur Nachverfolgung der Datei
127 Results_F{k,2} = F; % Alle Ergebnisse aus dem Kernprogramm
128 % werden hier pro Datei abgelegt
129 Results_F{k,3} = alpha_neu; % Uebergebener Verhaeltnisparameter
130 % aus der Berechnung
131 Results_F{k,4} = A; % Das importierte Vorticity-Feld aus Dantec
132 % zur Nachverfolgung
133 Results_F{k,5} = min(minimum_value_vorticity); % Absolut niedrigste
134 % Wirbelstaerke der Datei
135 Results_F{k,6} = max(maximum_value_vorticity); % Absolut hoechste
136 % Wirbelstaerke der Datei
137 Results_F{k,7} = timestamp; % Zeitstempel aus der Textdatei
138 % (nicht weiter verwendet)
139 end
140
141 end
142
143 %% VI. Export der Daten
144 % Datencontainer mit den gesammelten Input-Parametern zur spaeteren
145 % Nachverfolgung
146
147 directory = filenames{k,2}; % muss fuer den Zweitudurchlauf neu definiert werden
148 Input = cell(1,6);
149
150 Input{1,1} = directory;
151 Input{1,2} = {filenames(:,1)};
152 Input{1,3} = 'Alpha=konstant';
153 Input{1,5} = eddy_type;
154 Input{1,6} = alpha; % Verhaeltnisparameter, mit dem die Auswertung
155 % gestartet wurde
156
157 % Export von Results und Input:
158 namenlaenge = 32; % Nehme die ersten 32 Buchstaben des
159 % Verzeichnisses als Dateinamen
160 identifier = directory(length(directory)-namenlaenge:length(directory));
161 file = strcat(directory, '.mat'); % Generiere Dateinamen
162
163 save(file); % Speichert den Workspace
164 disp(directory);
165
166 disp('fertig!'); % Information fuer User
167 beep on; % Tonausgabe
168 beep;
169 end
170
171 disp('Berechnungsvorgang beendet. Die Daten sind in den jeweiligen Ordnern zu finden.');
```

vorty_mod_alphakonstant.m

```

1 function [ F , alpha_neu, A ,timestamp] = vorty_mod_alphakonstant( file,directory,alpha,
2 eddy_type )
3 %% I. Definition
4 alpha_neu = alpha; % Lokal verarbeiteter Verhaeltnisparameter
5 F = cell(1,9); % Instanzieren der lokalen Ergebniscell
6
7 %% II. Datenimport
8 [A,timestamp] = import_file(file,directory); % Import des Wirbelstaerken-
9 % Feldes
10
11 %% III. Auswerteparameter
12
13 % Aufstellung der globalen Groessen
14 max_global = max(A(:));
15 min_global = min(A(:));
16
17 % Betrachtungsfeldgroesse
18 size_cutter = 5; % Achtung: Nur ungerade Zahlen implementiert
19
20 % Verhaeltnisparameter
```



```
41 end
```

mirror.m

```
1 function [ A ] = mirror( Matrix, Achse )
2 % Spiegelt eine Matix zu Darstellungszwecken um die angegebene Achse.
3 % 1: Horizontale Achse
4 % 2: Vertikale Achse
5
6 M = Matrix;
7 [lin,col] = size(M);
8 A = zeros(lin,col);
9
10 if Achse == 1
11 for k=1:lin
12 A(k,:)=M((lin-(k-1)),:);
13 end
14 elseif Achse == 2
15 for k1=1:col
16 A(:,k1)=M(:,(col-(k1-1)));
17 end
18 else
19 left blank
20 disp('whoops!')
21 end
22 end
```

masking.m

```
1 function [ masked_A ] = masking( A )
2 % Die Matrix A ist bei axial25 der Druckseite 63x79 Eintraege gross.
3
4 load('MASKE_PS.mat'); % Maske M wird aus einer Matlab-Datei gelesen.
5 masked_A = A .* M;
6
7 end
```

slice_up.m

```
1 function [ B ] = slice_up(A,size_cutter)
2 % Unterteilt die Matix A in kleine Untermatizen mit der vorgegebenen
3 % Betrachtungsfeldgroesse ("cookies"). Es wird jeweils um eine Position weitergegangen.
4
5 % Funktion vergibt die Werte -1/(+1), falls der Wert in der Mitte der Matix auch
6 % der lokal niedrigste/(hoechste) Wert ist. Trifft beides nicht zu, wird
7 % die Matrix mit einer 0 versehen.
8
9 % Ausgabe-Cell B besitzt mehrere Spalten:
10 % 1:[laufende Nummerierung] 2:[x-Position] 3:[y-Position] 4:[Matrix D] 5:[local min]
11 % 6:[local max] 7:[reserviert fuer interpolierte Matrix] 8:[reserviert]
12 % 9:[max oder min]
13
14 % Pos. 8 und 7 benoetigen viel Rechenzeit. Hier wird der Platz
15 % nur reserviert, da eine Berechnung dieser Groessen nur fuer ausgewaehlte
16 % Matrizen von Interesse durchgefuehrt wird!
17
18 global number_cookies_x number_cookies_y number_cookies
19
20 number_cookies_x = size(A,2) - 2 * floor(size_cutter/2);
21 % Daten ganz rechts werden leider nicht verwendet
22 number_cookies_y = size(A,1) - 2 * floor(size_cutter/2);
23 % Daten ganz unten werden leider nicht verwendet.
24 number_cookies = number_cookies_x * number_cookies_y;
25
26 k3 = 1; % laufende Nummerierung
27 B = cell(number_cookies,9); % Spalten: No, x_C y_C D etc.
28
29 for k1 = 0:number_cookies_y-1 % y-Richtung
30
31 for k2 = 0:number_cookies_x-1 % x-Richtung
32 D = A((k1+1):(k1+size_cutter),(k2+1):(k2+size_cutter)); % "Cookies" ausstechen
33
34 if D(floor(size_cutter/2)+1,floor(size_cutter/2)+1) == max(D(:))
35 [B{k3,:}] = deal(k3,k2+1,k1+1,D,min(D(:)),max(D(:)),[],[],1);
36 % Maximum in der Mitte wird mit 1 versehen
37 elseif D(floor(size_cutter/2)+1,floor(size_cutter/2)+1) == min(D(:))
38 [B{k3,:}] = deal(k3,k2+1,k1+1,D,min(D(:)),max(D(:)),[],[],-1);
```

```

39 % Minimum in der Mitte wird mit -1 versehen
40 else
41 [B{k3,:}] = deal(k3,k2+1,k1+1,zeros(size_cutter),min(D(:)),max(D(:)),[],[],0);
42 % Nullmatrix und 0, wenn kein Extremum in der Mitte
43 end
44 k3 = k3 + 1;
45 end
46 end
47 end

```

refine.m

```

1 function [ E ] = refine( B, type )
2 % Funktion kuerzt B stark ein, indem nur der gewuenschte Extrematyp mit allen
3 % Infos und der urspruenglichen Nummerierung aufgelistet wird. D.h. alle
4 % Matrizen, die in der Funktion slice_up mit einer Null versehen wurden,
5 % werden ab hier nicht mehr beruecksichtigt.
6
7 line_no = 1;
8 E = cell(1,9); % Cell mit 9 Spalten und einer Zeile
9
10 if type == 1 % Filtern der positiven Wirbelstaerken
11
12 for k1 = 1:size(B,1)
13 if B{k1,9} == 1
14 [E{line_no,:}] = deal(B{k1,:});
15
16 line_no = line_no + 1;
17 else
18 % left blank
19 end
20 end
21
22 elseif type == -1 % Filtern der negativen Wirbelstaerken
23
24 for k2 = 1:size(B,1)
25 if B{k2,9} == -1
26 [E{line_no,:}] = deal(B{k2,:});
27
28 line_no = line_no + 1;
29 else
30 % left blank
31 end
32 end
33
34 elseif type == 2 % Filtern von beiden Wirbelstaerken
35
36 for k3 = 1:size(B,1)
37 if B{k3,9} == 1
38 [E{line_no,:}] = deal(B{k3,:});
39 line_no = line_no + 1;
40 elseif B{k3,9} == -1
41 [E{line_no,:}] = deal(B{k3,:});
42
43 line_no = line_no + 1;
44 else
45 % left blank
46 end
47 end
48 else
49 disp('Etwas ist schiefgelaufen! Funktion refine bekam schlechten Input')
50 end
51 end

```

isolate_eddy.m

```

1 function [ E ] = isolate_eddy( D , max_global , min_global, alpha, beta )
2 % Funktion untersucht mithilfe der vorgegebenen Schranken
3 % die Groesse der Wirbelstaerke und und scheidet zu kleine gefundene Werte aus.
4
5 pos_limit_vort = max_global * alpha; % je hoeher der Verhaeltnisparameter
6 % desto naeher am Max/Min
7 neg_limit_vort = min_global * beta; % beta = alpha
8
9 line_no = 1;
10 E = cell(1,9); % Instanzieren der Ausgabe-Cell
11
12 center = floor(size(D{1,4})/2)+1; % Mitte der Matrizen

```

```

13
14 for k = 1: size(D,1) % Unterscheidungen
15
16 if D{k,4}(center,center) <= neg_limit_vort
17 [E{line_no,:}] = deal(D{k,:});
18 line_no = line_no + 1; % naechste Zeile
19 elseif D{k,4}(center,center) >= pos_limit_vort
20 [E{line_no,:}] = deal(D{k,:});
21 line_no = line_no + 1; % naechste Zeile
22 else
23 % left blank
24 end
25 end
26 end

```

position_correction.m

```

1 function [ E_neu ] = position_correction(E, size_cutter)
2 % Rechnet von der Position der Cutter-Ecke um auf die mittlere Position
3 offset = floor(size_cutter/2);
4 for k = 1: size(E,1)
5
6 [E{k,2}] = deal(E{k,2}+offset); % x-Position
7 [E{k,3}] = deal(E{k,3}+offset-1); % y-Position, in der ersten Zeile der
8 % A-Matrix sind keine Werte vorhanden
9 end
10 E_neu = E;
11 end

```

cubic_interp.m

```

1 function [ E_out ] = cubic_interp( E, resolution)
2 % Parameter Interpolation:
3 [Xq,Yq] = meshgrid(1:resolution:(size(E{1,4})));
4
5 for k=1 : size(E,1)
6 Vc = interp2(E{k,4},Xq,Yq,'cubic'); % Kubische Interpolation
7 % der Wirbelstaerken-Werte
8 [E{k,7}] = deal(Vc); % Zuweisung der Interpolations-
9 % matrix auf Platz 7 der Cell
10 end
11 E_out = E;
12 end

```

locate_fine.m

```

1 function [Output] = locate_fine( F )
2 % Lineare Interpolation der Wirbelposition zwischen den Stützwerten und dem
3 % höchsten(niedrigsten) Wirbelstaerken-Wert
4
5 size_locator = 9; % zweiter Durchgang der Bestimmung der Wirbelmitte,
6 % erneut nur ung. Zahlen programmiert, nicht zu klein
7 % waehlen, Rechenzeit beachten. Guter Wert: 9
8
9 delta_xx = size(F{1,7},1)-1;
10 delta_xy = size(F{1,4},1)-1;
11 delta_yy = size(F{1,4},1)-1;
12 delta_yx = size(F{1,7},1)-1;
13
14 for k = 1:size(F,1)
15 % Mittenposition des ersten Durchganges
16 Pos1 = [F{k,2},F{k,3}];
17
18 % Mittenposition des zweiten Durchganges
19 A1 = F{k,7};
20 B1 = slice_up(A1,size_locator); % Aehnlicher Vorgang wie im Kernprogramm
21 C1 = refine(B1,F{k,9});
22 D1 = isolate_eddy(C1,max(A1(:)),min(A1(:)),1,1);
23 E1 = position_correction(D1,size_locator);
24 Pos2 = [E1{1,2},E1{1,3}];
25
26 x = ((E1{1,2}-1)/delta_xx) * delta_xy + (F{k,2}-floor(size(F{1,4},1)/2));
27 y = ((E1{1,3}-1)/delta_yx) * delta_yy + (F{k,3}-floor(size(F{1,4},1)/2));
28 Pos3 = [x,y];
29
30 [F{k,8}]=deal(Pos3); % Ergebniszuweisung
31 end

```

```

32 Output = F;
33 end

```

Vorty_Evaluate_Main.m

```

1 clc, clear all, close all;
2
3 %% Druck- oder Saugseite
4 location = 0; % 1: Druckseite
5 % 0: Saugseite
6
7 %% I. INSTANZIERUNG DER VARIABLEN
8 X_ges = [];
9 Y_ges = [];
10 V_ges = [];
11 S_ges = [];
12 C_ges = [];
13 T_ges = [];
14
15 %% Reihenfolge mit RSP40
16 %order = [1;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;2;16;17;18;19;20;21;3;4;5]; % richtige Reihenfolge,
17 % alphabetisch sortieren geht leider nicht vollstaendig
18
19 %% Reihenfolge OHNE RSP 40
20 order = [1;6;7;8;9;10;11;12;13;14;15;2;16;17;18;19;20;3;4;5];
21
22 %-----
23 % Dimension der Matrix A fuer Darstellung
24 if location == 0
25 % axial SS
26 dim_A_x = 83;
27 dim_A_y = 60;
28 elseif location == 1
29 % axial PS
30 dim_A_x = 79;
31 dim_A_y = 63;
32 else
33 % left blank
34 end
35 %-----
36 % Instanzierungen der Mittelwert-Variablen sowie der
37 % Standardabweichungs-Variablen
38 X_mean = zeros(size(order,1),1);
39 X_std = zeros(size(order,1),1);
40 Y_mean = zeros(size(order,1),1);
41 Y_std = zeros(size(order,1),1);
42 V_mean = zeros(size(order,1),1);
43 V_std = zeros(size(order,1),1);
44 S_mean = zeros(size(order,1),1);
45 S_std = zeros(size(order,1),1);
46 C_mean = zeros(size(order,1),1);
47 C_std = zeros(size(order,1),1);
48
49 %% II. ABFRAGE NACH DEM QUELLVERZEICHNIS UND AUFLISTUNG
50
51 disp('Quellverzeichnis wählen');
52 quellverzeichnis = uigetdir; % Fragt User nach Quellverzeichnis
53 suffix = '*.mat'; % Dateiendung, nach der gesucht wird
54 verzeichnis_info = dir([quellverzeichnis,filesep,suffix]);
55 % Struct mit allen Dateinfos die gesuchte Dateiendung betreffend
56
57 dateiliste = {}; % legt eine Dateiliste (Cell) an
58 [dateiliste{1:length(verzeichnis_info),1}] = deal(verzeichnis_info.name);
59 clear verzeichnis_info; % wird nicht mehr benoetigt
60 dateiliste = sortrows(dateiliste); % Sortierung
61
62 verzeichnisliste = cell(size(dateiliste,1),1);
63
64 for k=1:size(dateiliste,1) % Auflistung des vollen Dateipfades
65 [verzeichnisliste{k,1}] = deal(fullfile(quellverzeichnis,dateiliste{k}));
66 end
67
68
69 %% III. ERSTELLUNG DES ZIELVERZEICHNISSES
70 zielverzeichnis = quellverzeichnis; % Angabe des Pfades
71 myfolder = 'V_EVAL_Histogramme_size_V3_20181230'; % Zielordner
72 mkdir([zielverzeichnis,filesep,myfolder]); % erstelle Ordner
73 zielverzeichnis = [zielverzeichnis,filesep,myfolder];

```

```

74 % String, voller Dateipfad des Zielordners
75
76 %% IV. START VON VORTY_EVALUATE
77 for f = 1:size(verzeichnisliste,1)
78 load(verzeichnisliste{f,1});
79 clear alpha alpha_neu direc directory eddy_type F file filenames g identifier...
80 maximum_value_vorticity minimum_value_vorticity namenlaenge suffix timestamp...
81 vec_alpha vec_vort_min vort_max_tot vort_min_tot vec_vort_max l m n
82 true_index = order(f,1); % RSP-Positionen werden nicht sequenziell verarbeitet
83
84 % Ausgabe im Command Window fuer User
85 identifier = dateiliste{f,1};
86 info_string = [identifier, ' wird verarbeitet...'];
87 disp(info_string);
88
89 % Durchfuehrung der Untersuchungen
90 adress = v_eval_get_adress(Results_F); % Ueberprueft Results_F und
91 % gibt Laufvariablen an.
92 [X,Y] = v_eval_get_position(Results_F,adress);
93 V = v_eval_get_vorticity(Results_F,adress);
94 [S,C] = v_eval_get_size_and_circulation(Results_F,adress);
95 T = v_eval_get_timestamp(Results_F,adress);
96
97 % Statistik (Mittelwert und Standardabweichung pro RSP)
98 X_mean(true_index,1) = mean(X);
99 X_std(true_index,1) = std(X);
100 Y_mean(true_index,1) = mean(Y);
101 Y_std(true_index,1) = std(Y);
102 V_mean(true_index,1) = mean(abs(V)); % Betrag
103 V_std(true_index,1) = std(abs(V)); % Betrag
104 S_mean(true_index,1) = mean(S);
105 S_std(true_index,1) = std(S);
106 C_mean(true_index,1) = mean(abs(C)); % Betrag
107 C_std(true_index,1) = std(abs(C)); % Betrag
108
109 % Normierte Groesse (fuer Darstellung)
110 minVal = min(C);
111 maxVal = max(C);
112 minValV = min(V);
113 maxValV = max(V);
114
115 % C_norm = (C - minVal) / ( maxVal - minVal );
116 V_norm = (V - minValV) / ( maxValV - minValV );
117 C_norm = abs(C) .*10;
118 S_norm = S.*1000;
119
120 %% Achsenskalierung fuer relative Wirbelanzahl
121 rel_x = 0.6;
122 rel_y = 0.5;
123 file = strcat(zielverzeichnis,filesep,'V_Eval_V3_data_',identifier);
124 save(file); % Speichert den Workspace im Zielverzeichnis
125
126 end_X = size(X_ges,1);
127
128 for m=1:size(X,1)
129 X_ges(end_X+m,1) = X(m,1);
130 Y_ges(end_X+m,1) = Y(m,1);
131 V_ges(end_X+m,1) = V(m,1);
132 S_ges(end_X+m,1) = S(m,1);
133 C_ges(end_X+m,1) = C(m,1);
134 T_ges(end_X+m,1) = T(m,1);
135 end
136 end
137
138 file_ges = strcat(zielverzeichnis,filesep,'V_Eval_V3_data_ges','.mat');
139 save(file_ges);
140
141 %% TOTALHISTOGRAMME-----
142
143 % Scatterplot mit einem Histogramm pro Achse
144 histogram_total_S = v_eval_1D_hist_total(X_ges,Y_ges,S_ges,Results_F,adress,rel_x,
rel_y);
145 histogram_total_V = v_eval_1D_hist_total(X_ges,Y_ges,V_ges,Results_F,adress,rel_x,
rel_y);
146 histogram_total_C = v_eval_1D_hist_total(X_ges,Y_ges,C_ges,Results_F,adress,rel_x,
rel_y);
147
148 dateiname_Stot = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Stotal_',identifier,'.png']; %

```

```

Ausgabename
149 saveas(histogram_total_S,dateiname_Stot);
150 dateiname_Vtot = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Vtotal_',identifizier,'.png']; %
Ausgabename
151 saveas(histogram_total_V,dateiname_Vtot);
152 dateiname_Ctot = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Ctotal_',identifizier,'.png']; %
Ausgabename
153 saveas(histogram_total_C,dateiname_Ctot);
154
155 %% REFINED HISTOGRAMME-----
156 % pro Achse drei Histogramme
157
158 % Hist-Bereiche richten sich nach den Messpunkt (die 0 in der Funktion gibt
159 % das vor, default)
160 histogramm_refined_Sges = v_eval_refined_hist(X_ges,Y_ges,abs(S_ges),0.026,0.014,dim_A_x,
dim_A_y,1,rel_x,rel_y);
161 histogramm_refined_Vges = v_eval_refined_hist(X_ges,Y_ges,abs(V_ges),4200,1300,dim_A_x,
dim_A_y,1,rel_x,rel_y);
162 histogramm_refined_Cges = v_eval_refined_hist(X_ges,Y_ges,abs(C_ges),0.08,0.0045,dim_A_x,
dim_A_y,1,rel_x,rel_y);
163
164 dateiname_Sges = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Sges_',identifizier,'.png']; %
Ausgabename
165 saveas(histogramm_refined_Sges,dateiname_Sges);
166 dateiname_Vges = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Vges_',identifizier,'.png']; %
Ausgabename
167 saveas(histogramm_refined_Vges,dateiname_Vges);
168 dateiname_Cges = [zielverzeichnis,filesep,'Hist_Cges_',identifizier,'.png']; %
Ausgabename
169 saveas(histogramm_refined_Cges,dateiname_Cges);
170
171 close all
172
173 disp('Auswertung beendet. ');
174 disp('Histogramme und Variablen sind unter');
175 disp(zielverzeichnis);
176 disp('zu finden. ');

```

v_eval_get_adress.m

```

1 function [ adress_clean ] = v_eval_get_adress( Results_F )
2 % Aufgabe der Funktion ist das Auslesen aller Orte, an denen die
3 % relevanten Wirbel in der Ergebnis-Cell Results_F hinterlegt sind.
4
5 %% I. Auslesen aller Wirbelpositionen aus Results_F
6 % Instanzierung der Variablen:
7 line_no = 1;
8 all_positions = cell(1,1);
9 adress = zeros(1,2);
10 adress_clean = zeros(1,2);
11
12 for k=1:size(Results_F,1) % Abzeilen von Results_F
13
14 for m=1:size(Results_F{k,2},1) % Abzeilen von F
15
16 if isempty(Results_F{k,2}{m,8}) == 1 % wenn Cell F in Results_F leer (passiert ab und
zu)
17 disp('leer!')
18 break
19 elseif Results_F{k,2}{m,8} == 0 % wenn eine Null in Cell F (wie vorgesehen)
20 % disp('null!')
21 break
22 else % wenn Results_F gefuellt:
23 one_position(1,1) = Results_F{k,2}{m,8}(1); % x-Position
24 one_position(1,2) = Results_F{k,2}{m,8}(2); % y-Position
25 one_adress(1,1) = k; % Zuordnung zu Results_F
26 one_adress(1,2) = m; % Zuordnung zu Results_F
27 end
28
29 % Lueckenlose Auflistung durch line_no
30 [all_positions{line_no,1}] = one_position; % Schleifenvariable wird abgegeben
31 adress(line_no,:) = one_adress(1,:);
32
33 line_no = line_no + 1;
34 clear one_position; % Schleifenvariable wird geleert
35 end % m
36
37 end % k

```

```

38
39 %% II. Untersuchung der Positionen selbst auf leere Eintraege
40 %% und Erstellung der adress_clean-variable
41
42 line_no = 1; % Reset
43 for k=1:size(all_positions,1)
44 if isempty(all_positions{k,1}) % Position ist leer, ueberspringe
45 break
46 else
47 adress_clean(line_no,:) = adress(k,:);
48 line_no = line_no + 1;
49 end
50 end
51 end

```

v_eval_get_position.m

```

1 function [ X,Y ] = v_eval_get_position(Results_F,adress)
2 % Funktion holt sich an der vorgegebenen Cell-Position (aus adress)
3 % die Koordinaten der Wirbel heraus
4
5 % Instanzieren der Variablen
6 X = zeros(size(adress,1),1);
7 Y = zeros(size(adress,1),1);
8 for k=1:size(adress,1)
9 zeile = adress(k,1);
10 F_zeile = adress(k,2);
11 X(k,1) = Results_F{zeile,2}{F_zeile,8}(1);
12 Y(k,1) = Results_F{zeile,2}{F_zeile,8}(2);
13 end
14 end

```

v_eval_get_vorticity.m

```

1 function [ V ] = v_eval_get_vorticity(Results_F,adress)
2 % Funktion nimmt adress und liest, abhaengig vom Wirbeltyp, die groesste
3 % Vorticity aus.
4
5 % Instanzieren der Variablen
6 V = zeros(size(adress,1),1);
7 for k=1:size(adress,1)
8 zeile = adress(k,1);
9 F_zeile = adress(k,2);
10 eddy_type = Results_F{zeile,2}{F_zeile,9}; % Eddy-type fuer die richtige Wirbelstaerke
11 if eddy_type == 1 % positiver Wirbel
12 V(k,1) = Results_F{zeile,2}{F_zeile,6};
13 else % negativer Wirbel
14 V(k,1) = Results_F{zeile,2}{F_zeile,5};
15 end
16 end
17 end

```

v_eval_get_size_and_circulation.m

```

1 function [ S,C ] = v_eval_get_size_and_circulation(Results_F,adress)
2 % Funktion nimmt adress und liest, abhaengig vom Wirbeltyp, die Groesse des
3 % Wirbels in Prozent der Betrachtungsfeldgroesse aus.
4
5 % Instanzieren der Variablen
6 S = zeros(size(adress,1),1); % output
7 C = zeros(size(adress,1),1);
8
9 for k=1:size(adress,1)
10
11 zeile = adress(k,1);
12 F_zeile = adress(k,2);
13 eddy_type = Results_F{zeile,2}{F_zeile,9}; % Eddy-type fuer die richtige Flaechen
14
15 E = Results_F{zeile,2}{F_zeile,7}; % Interpoliertes Wirbelabbild
16 A = Results_F{zeile,4}; % Hauptmatrix der Datei
17 average_vorticity = mean(mean(A)); % Globales Level der Vorticity
18
19 % Unterscheidung fuer Groesse
20 count_high = 0;
21 count_low = 0;
22
23 for l=1:size(E,1) % Abzeilen, k-te Zeile

```

```

24 for m=1:size(E,2) % Spalte durchgehen, m-te Spalte
25 if E(l,m) > average_vorticity % Wirbelabbild wird mit Level verglichen
26 count_high = count_high + 1;
27 else
28 count_low = count_low + 1;
29 end
30 end
31 end
32
33 %% MODELL EINES RANKINE-WIRBELS
34
35 dimension = size(E,1);
36 N = zeros(dimension); % gleich grosse Nullmatrix wie E
37 size_Feld = 4.376 * 1.0e-3; % Wirbelabbild besitzt in mm Kantenlaenge
38 % Saugseite: Kantenlaenge 6.324*1.0e-3
39 % Druckseite: Kantenlaenge 4.376*1.0e-3
40 % Basierend auf den Scalefaktoren DS 12.6 und SS 18.5 Px/mm
41 area_Feld = size_Feld^2;
42
43 size_mini = size_Feld / dimension;
44 area_mini = size_mini^2; % Kleines Flaechenteilchen
45
46 if eddy_type == 1
47 area_ratio = count_high / (count_high + count_low);
48 else
49 area_ratio = count_low / (count_high + count_low);
50 end
51
52 if eddy_type == 1 % Flaechen eines positiven Wirbels
53
54 for l=1:size(E,1)
55 for m=1:size(E,2)
56 if E(l,m) > average_vorticity
57 N(l,m) = 1;
58 else
59 % left blank
60 end
61 end
62 end
63
64 else % Flaechen eines negativen Wirbels
65
66 for l=1:size(E,1)
67 for m=1:size(E,2)
68 if E(l,m) < average_vorticity
69 N(l,m) = 1;
70 else
71 % left blank
72 end
73 end
74 end
75 end
76 area_wirbel = area_ratio * area_Feld;
77
78 % Diskretes Summieren der Wirbelstaerken und Flaechenteilchen zur Zirkulation
79 N = N .* area_mini;
80 R = N .* E; % Komponentenweise Multiplikation
81 circulation = sum(sum(R));
82
83 % Wirbelmodell
84 r0 = (area_wirbel / pi).^(0.5);
85 omega = circulation/(2*pi*r0^2);
86 v_phi_r0 = r0*omega;
87 v_phi_limit = v_phi_r0 * 0.25;
88 r_limit = (v_phi_r0 * r0) / v_phi_limit;
89 area_gesamt = r_limit^2*pi;
90
91 S(k,1) = r_limit*2; % "Wirbel"durchmesser
92 C(k,1) = circulation; % Zirkulation
93 end
94 end

```

v_eval_get_timestamp.m

```

1 function [ T ] = v_eval_get_timestamp(Results_F,address)
2 % Funktion nimmt adress und liest den Zeitstempel aus.
3 % Instanzieren der Variablen
4 T = zeros(size(address,1),1);

```

```

5 for k=1:size(address,1)
6 zeile = address(k,1);
7 F_zeile = address(k,2);
8 T(k,1) = Results_F{zeile,7};
9 end
10 end

```

v_eval_refined_hist.m

```

1 function [ h1,h2,h3,h4,h5,h6 ] = v_eval_refined_hist( X,Y,G,Gmax,Gmin,size_x,size_y,
bereich,rel_x,rel_y)
2 % h1=0; h2=0; h3=0; h4=0; h5=0; h6=0;
3 % Funktion klassifiziert eine angegebene Groesse G in n Kategorien.
4 % Abhaengig von der Position X, Y werden somit n Histogramme ueber-
5 % einandergelegt, welche mehr Information liefern als ein Histogramm
6 % allein.
7
8 % Funktion ist fuer eine RSP und auch fuer einen Messpunkt anwendbar.
9 % max und min geben bereits bekannte Grenzen fuer die Histogramme vor.
10 % Wenn das nicht gewuenscht ist, muss als max und min-Wert NaN vorgegeben
11 % werden.
12
13 %% I. INSTANZIERUNG DER VARIABLEN
14 n = 3;
15 X1 = zeros(1,1);
16 Y1 = zeros(1,1);
17 G1 = zeros(1,1);
18
19 X2 = zeros(1,1);
20 Y2 = zeros(1,1);
21 G2 = zeros(1,1);
22
23 X3 = zeros(1,1);
24 Y3 = zeros(1,1);
25 G3 = zeros(1,1);
26
27 %% II. UNTERSCHIEDUNG
28
29 if bereich == 0 % Skalierungen der Groessen richten sich nach Messpunkt
30 max_val_G = max(G);
31 min_val_G = min(G);
32 span = (max_val_G - min_val_G) / n;
33
34 n1 = min_val_G + span;
35 n2 = n1 + span;
36
37 count_1 = 1;
38 count_2 = 1;
39 count_3 = 1;
40
41 for k=1:size(G,1)
42
43 if (n2 < G(k,1)) && (G(k,1) <= max_val_G) % oberer Bereich
44 X1(count_1,1) = X(k,1);
45 Y1(count_1,1) = Y(k,1);
46 G1(count_1,1) = G(k,1);
47 count_1 = count_1 + 1;
48
49 elseif (n1 < G(k,1)) && (G(k,1) <= n2) % mittlerer Bereich
50 X2(count_2,1) = X(k,1);
51 Y2(count_2,1) = Y(k,1);
52 G2(count_2,1) = G(k,1);
53 count_2 = count_2 + 1;
54
55 elseif (min_val_G <= G(k,1)) && (G(k,1) <= n1) % unterer Bereich
56 X3(count_3,1) = X(k,1);
57 Y3(count_3,1) = Y(k,1);
58 G3(count_3,1) = G(k,1);
59 count_3 = count_3 + 1;
60
61 else
62 disp('Es ist etwas fuerchtbar, fuerchtbar schief gelaufen.')
63 end
64
65 end
66
67 %% III. Darstellung
68 figure

```

```

69
70 %% Scatterplot
71 subplot(2,2,4); % Position unten rechts im Subplot
72 sz = 5;
73
74 scatter(X,Y,sz,G,'filled')
75 xlim([0 size_x]) % Begrenzung der X-Achse: Messebenenlaenge
76 ylim([0 size_y]) % Begrenzung der Y-Achse: Messebenenhoehe
77 xlabel('x-Koordinate');
78 ylabel('y-Koordinate');
79 caxis([Gmin Gmax]); % muss im Fkt.-Header immer vorgegeben werden
80 grid on
81
82 %% Colorbar
83 subplot(2,2,1); % Position unten rechts im Subplot
84 sz = 5;
85 scatter(X,Y,sz,G,'filled')
86 xlim([0 size_x]) % Begrenzung der X-Achse: Messebenenlaenge
87 ylim([0 size_y]) % Begrenzung der Y-Achse: Messebenenhoehe
88
89 ylabel('Bezeichnung [Einheit]');
90 grid on
91
92 colormap(jet); % Farbschema jet sehr gut geeignet
93 colorbar('eastoutside');
94 caxis([Gmin Gmax]); % muss im Fkt.-Header immer vorgegeben werden
95
96 %% Histogramm x
97 subplot(2,2,2); % Histogramme in X-Richtung
98
99 if X1(1,1) == 0;
100 h1 = histogram([]);
101 hold on
102 % nichts unternehmen, denn X1 ist unbefuehlt.
103 else
104 h1 = histogram(X1, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.31 0.5 0.9], 'FaceAlpha', 0.5);
105 h1.Normalization = 'probability';
106 hold on
107 end
108
109 if X2(1,1) == 0;
110 h2 = histogram([]);
111 hold on
112 % nichts unternehmen, denn X2 ist unbefuehlt.
113 else
114 h2 = histogram(X2, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.75 0.31 0.3], 'FaceAlpha', 0.5);
115 h2.Normalization = 'probability';
116 hold on
117 end
118
119 h3 = histogram(X3, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.85 0.486 0], 'FaceAlpha', 0.5);
120 h3.Normalization = 'probability';
121
122 hold on
123 grid on
124 xlim([0 size_x])
125 ylim([0 rel_x])
126 % xlabel('x-Koordinate');
127 ylabel('relative Wirbelanzahl');
128 % legend('Bereich L', 'Bereich M', 'Bereich S'); %wird im Nachhinein
129 % eingefuegt
130 hold off
131
132 %% Histogramm y
133 subplot(2,2,3); % Histogramme in Y-Richtung
134
135 if Y1(1,1) == 0
136 h4 = histogram([]);
137 hold on
138 % nichts unternehmen, denn Y1 ist unbefuehlt.
139 else
140 h4 = histogram(Y1, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.31 0.5 0.9], 'FaceAlpha', 0.5);
141 h4.Normalization = 'probability';
142 view(-90,90);
143 hold on
144 end
145
146 if Y2(1,1) == 0

```

```

147 h5 = histogram([]);
148 hold on
149 % nichts unternehmen, denn Y2 ist unbefuelllt.
150 else
151 h5 = histogram(Y2, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.75 0.31 0.3], 'FaceAlpha', 0.5);
152 h5.Normalization = 'probability';
153 view(-90,90);
154 hold on
155 end
156
157 h6 = histogram(Y3, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.85 0.486 0], 'FaceAlpha', 0.5);
158 h6.Normalization = 'probability';
159
160 view(-90,90);
161 hold on
162 grid on
163 xlim([0 size_y]) % Achse ist verdreht, darum size_y
164 ylim([0 rel_y])
165 ylabel('relative Wirbelanzahl');
166 % Legende wird im Nachhinein eingefuegt
167 hold off
168
169 else % Der Fall, dass die Skalierung der Groessen im Fkt.-Header vorgeg. sind.
170 max_val_G = Gmax; % wird im Header vorgegeben
171 min_val_G = Gmin; % wird im Header vorgegeben
172 span = (max_val_G - min_val_G) / n;
173
174 n1 = min_val_G + span;
175 n2 = n1 + span;
176
177 count_1 = 1;
178 count_2 = 1;
179 count_3 = 1;
180
181 for k=1:size(G,1)
182
183 if (n2 < G(k,1)) && (G(k,1) <= max_val_G)
184 X1(count_1,1) = X(k,1);
185 Y1(count_1,1) = Y(k,1);
186 G1(count_1,1) = G(k,1);
187 count_1 = count_1 + 1;
188
189 elseif (n1 < G(k,1)) && (G(k,1) <= n2)
190 X2(count_2,1) = X(k,1);
191 Y2(count_2,1) = Y(k,1);
192 G2(count_2,1) = G(k,1);
193 count_2 = count_2 + 1;
194
195 elseif (min_val_G <= G(k,1)) && (G(k,1) <= n1)
196 X3(count_3,1) = X(k,1);
197 Y3(count_3,1) = Y(k,1);
198 G3(count_3,1) = G(k,1);
199 count_3 = count_3 + 1;
200
201 else
202 % left blank -> Werte, die die oberen Bedingungen nicht
203 % erfuellen, fallen hier in diese Kategorie. Eine Handlung ist
204 % nicht erforderlich.
205 end
206 end
207 figure
208
209 %% Scatterplot
210 subplot(2,2,4); % Position unten rechts im Subplot
211 sz = 5;
212
213 scatter(X,Y,sz,G,'filled')
214 xlim([0 size_x]) % Begrenzung der X-Achse: Messebenenlaenge
215 ylim([0 size_y]) % Begrenzung der Y-Achse: Messebenenhoehe
216 xlabel('x-Koordinate');
217 ylabel('y-Koordinate');
218 caxis([Gmin Gmax]);
219 grid on
220
221 %% Colorbar
222 subplot(2,2,1); % Position unten rechts im Subplot
223 sz = 5;
224 scatter(X,Y,sz,G,'filled')

```

```

225 xlim([0 size_x]) % Begrenzung der X-Achse: Messebenenlaenge
226 ylim([0 size_y]) % Begrenzung der Y-Achse: Messebenenhoehe
227
228 xlabel('Bezeichnung [Einheit]');
229 grid on
230
231 colormap(jet);
232 colorbar('eastoutside');
233 caxis([Gmin Gmax]);
234
235 %% Histogramm x
236 subplot(2,2,2); % Histogramme in X-Richtung
237
238 if X1(1,1) == 0;
239 h1 = histogram([]);
240 hold on
241 % nichts unternehmen, denn X1 ist unbefuellt.
242 else
243 h1 = histogram(X1, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.31 0.5 0.9], 'FaceAlpha', 0.5);
244 h1.Normalization = 'probability';
245 hold on
246 end
247
248 if X2(1,1) == 0;
249 h2 = histogram([]);
250 hold on
251 % nichts unternehmen, denn Y1 ist unbefuellt.
252 else
253 h2 = histogram(X2, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.75 0.31 0.3], 'FaceAlpha', 0.5);
254 h2.Normalization = 'probability';
255 hold on
256 end
257
258 h3 = histogram(X3, ([0:4:size_x]), 'FaceColor', [0.85 0.486 0], 'FaceAlpha', 0.5);
259 h3.Normalization = 'probability';
260
261 hold on
262 grid on
263 xlim([0 size_x])
264 ylim([0 rel_x])
265 % xlabel('x-Koordinate');
266 ylabel('relative Wirbelanzahl');
267
268 hold off
269
270 %% Histogramm y
271 subplot(2,2,3); % Histogramme in Y-Richtung
272
273 if Y1(1,1) == 0
274 h4 = histogram([]);
275 hold on
276 % nichts unternehmen, denn Y1 ist unbefuellt.
277 else
278 h4 = histogram(Y1, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.31 0.5 0.9], 'FaceAlpha', 0.5);
279 h4.Normalization = 'probability';
280 view(-90,90);
281 hold on
282 end
283
284 if Y2(1,1) == 0
285 h5 = histogram([]);
286 hold on
287 % nichts unternehmen, denn Y2 ist unbefuellt.
288 else
289 h5 = histogram(Y2, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.75 0.31 0.3], 'FaceAlpha', 0.5);
290 h5.Normalization = 'probability';
291 view(-90,90);
292 hold on
293 end
294
295 h6 = histogram(Y3, ([0:4:size_y]), 'FaceColor', [0.85 0.486 0], 'FaceAlpha', 0.5);
296 h6.Normalization = 'probability';
297
298 view(-90,90);
299 hold on
300 grid on
301 xlim([0 size_y]) % Achse ist verdreht, darum size_y
302 ylim([0 rel_y])

```


A4 Pumpenkennlinie mit eingezeichneten PIV-Messpunkten

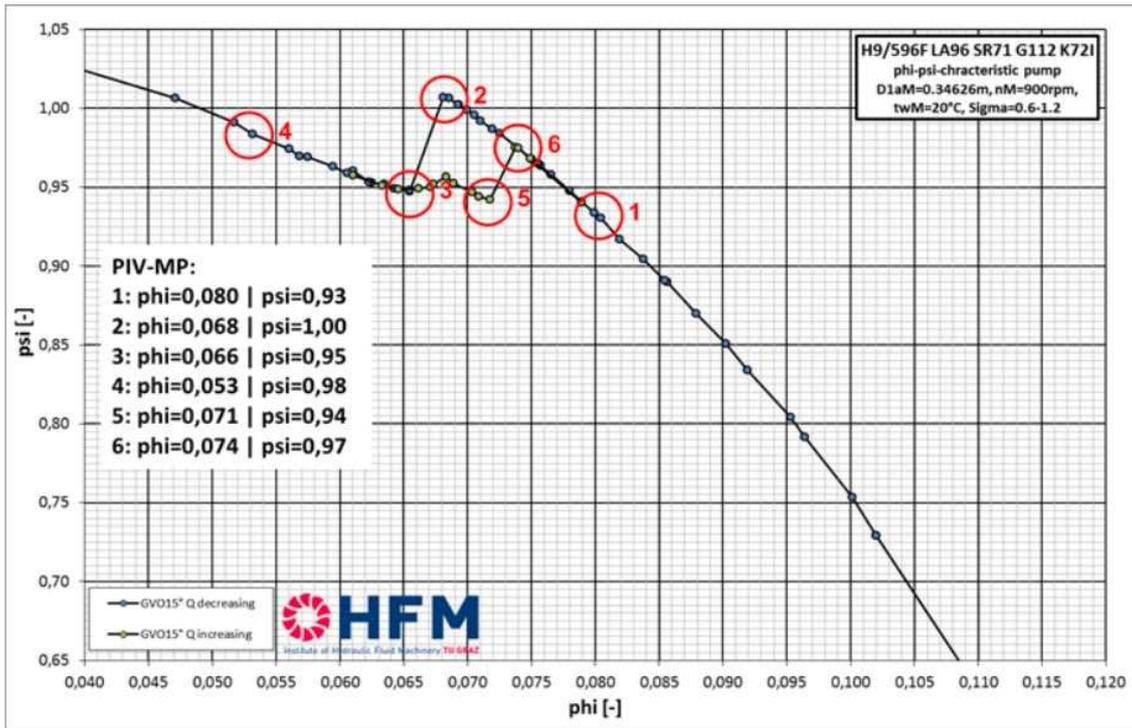


Abbildung A4: Pumpenkennlinie GVO 15° Laufrad 1