

Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 15

Axel Knapp

**Numerische und experimentelle
Untersuchung der Auswirkungen
von Auslegungsmethoden für
Spiralgehäuse auf die Performance
einer Kreiselpumpe**

**Numerische und experimentelle Untersuchung
der Auswirkungen von Auslegungsmethoden
für Spiralgehäuse auf die Performance
einer Kreiselpumpe**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Axel Knapp

geb. in Meisenheim

Tag der mündlichen Prüfung:	01.04.2019
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Vorsitzender:	Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm

SAM-Fortschrittsberichte

Band 15

Axel Knapp

**Numerische und experimentelle Untersuchung
der Auswirkungen von Auslegungsmethoden für
Spiralgehäuse auf die Performance einer Kreiselpumpe**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6688-3

ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der Technischen Universität Kaiserslautern (TUK).

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle, dem Leiter des Lehrstuhls SAM für die Möglichkeit diese Arbeit anzufertigen und für die Unterstützung während meiner Zeit am Lehrstuhl.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank-Hendrik Wurm für seine Tätigkeit als zweiter Berichterstatter und bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Roland Ulber für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM), die ich während meiner Zeit am SAM kennenlernen durfte, für ihre stete Hilfsbereitschaft, die hervorragende Zusammenarbeit und die zahllosen fachlichen Diskussionen in guter Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem ehemaligen Kollegen und langjährigen Weggefährten Dr.-Ing. Christian Licht. An dieser Stelle danke ich ebenfalls Herrn Dr.-Ing. Nils Schumann für seine Loyalität und sein Engagement während seiner Zeit am SAM und darüber hinaus.

Weiterhin danke ich allen studentischen Hilfskräften sowie meinen Studien-, Bachelor- und Diplomarbeitern, die ihren Beitrag zu der vorliegenden Arbeit geleistet haben. Ohne ihren Einsatz und ihre Motivation wäre diese Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Ich danke ganz besonders meinen Eltern, die meine beiden Brüder und mich während unserer ganzen Entwicklung stets unterstützt und dafür große Opfer gebracht haben. Nicht zuletzt danke ich meiner Frau Helena und unseren beiden Töchtern Vanessa und Lisa für ihre unermessliche Unterstützung und ihr großes Verständnis.

Kaiserslautern, im April 2019

Axel Knapp

Ich widme diese Arbeit
meinem Schwiegervater

Adam Bierwagen †,

der die Fertigstellung
leider nicht mehr
miterleben durfte.

Я никогда тебя не забуду.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVII
Kurzfassung	XIX
Abstract	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Geometrieparameter	4
1.2.2 Radialkraft	10
1.3 Zielsetzungen	12
2 Theoretische Grundlagen	13
2.1 Pumpen	13
2.2 Klassifizierung von Pumpen	13
2.2.1 Verdrängerpumpen	15
2.2.2 Kreiselpumpen	16
2.2.3 Kennwerte einer Kreiselpumpe	18
2.2.4 Kennlinien und Regelung	20
2.3 Spiralgehäuse	23
2.3.1 Hauptabmessungen	23
2.3.2 Auslegungsverfahren	25
2.4 Dimensionslose Kennzahlen	31
3 Experimentelle Untersuchungen	35
3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus	35
3.2 Gehäusevarianten	38

3.3	Beschreibung der Versuchsdurchführung	40
4	Numerische Untersuchungen	43
4.1	Vernetzung	44
4.2	Rechengebiet und Randbedingungen	45
4.3	Netzstudie	47
4.3.1	Simulationsmatrix und Nomenklatur	47
4.3.2	Auswertung und Wahl des Rechnetzes	48
4.4	Turbulenzmodellstudie	51
4.5	Numerische Voruntersuchungen	52
4.6	Berechnung der Zielgrößen	54
5	Ergebnisdiskussion	55
5.1	Validierung CFD	55
5.2	Kennlinienvergleich Varianten	65
5.3	Einfluss Spiralenendquerschnittsfläche	69
5.4	Strömung in der Volute	71
5.4.1	Definition der Auswerteebenen	71
5.4.2	Einfluss der Schaufelstellung	72
5.4.3	Einfluss der Förderrate	73
5.4.4	Strömungsverhältnisse im Punkt besten Wirkungsgrades	90
5.5	Einfluss der Volute auf die Strömung in der Pumpe	95
5.6	Radialkraftverlauf	98
6	Fehlerbetrachtung	99
6.1	Experiment	99
6.1.1	Zufällige Messunsicherheit	99
6.1.2	Systematische Unsicherheiten	100
6.1.3	Gesamtunsicherheit	100
6.2	CFD	103
6.2.1	Fehlerbeschreibung	104
7	Zusammenfassung	107
8	Ausblick	111
	Literaturverzeichnis	113

Nomenklatur	121
A Entwicklung der Auswertegrößen in Abhängigkeit der Förderrate	127
B Untersuchungen zu den fünf Geometrieparametern eines Spiralgehäuses	163
Betreute Arbeiten	169
Lebenslauf	171

Abbildungsverzeichnis

1.1	YANG et al. 2011 [71] Auslegungsverfahren	3
1.2	KRISAM 1952 [41] A_{\max}	5
1.3	YANG et al. 2011 [71] A_{\max}	6
1.4	YANG et al. 2011 [71] Querschnittsform	7
1.5	MISHINA und GYOBU 1978 [48] radiale Position	8
1.6	AGOSTINELLI 1960 [1] Radialkraftkoeffizient	11
2.1	Pumpenklassifizierung	15
2.2	Energiebilanz auf dem Weg durch eine Drallpumpe nach WESCHE [67]	17
2.3	Exemplarische Pumpen- und Anlagenkenmlinien	21
2.4	Vergleich unterschiedlicher Spiralentypen	23
2.5	Allgemeines Konstruktionsprinzip einer Volute	25
2.6	Definierter Spiralenwinkel über Umschlingungswinkel	26
2.7	Konstruktionsprinzip Volute Alpha	27
2.8	Nomenklatur Spiralgähuse nach PFLEIDERER [56]	28
2.9	Spiralenkonstante nach STEPANOFF [63]	29
2.10	$(A_z R^{-1})$ -Verlauf	30
2.11	Querschnittsflächenverlauf nach KOWALIK [40]	31
2.12	Erreichbare Druckziffern nach GÜLICH [28]	32
3.1	R&I-Schema	35
3.2	3D-CAD-Modell des Pumpenloops	36
3.3	3D-CAD-Schnittmodell der Versuchspumpe	38
3.4	2D-Gegenüberstellung Varianten (Experiment)	39
4.1	2D-Gegenüberstellung Varianten (CFD)	43
4.2	Rechengebiet mit Randbedingungen	45
4.3	Variantenmatrix und Nomenklatur Netzstudie	48
4.4	Netzstudie - Teil 1	49

4.5	Netzstudie - Teil 2	50
4.6	Turbulenzmodellstudie	51
4.7	Numerische Untersuchungen zum Einschwingvorgang	52
4.8	Reduzierung der inneren Iterationsschritte	53
5.1	A: Druckziffer und Wirkungsgrad über Durchflussziffer	57
5.2	A: Leistungsziffer über Durchflussziffer	58
5.3	B: Druckziffer und Wirkungsgrad über Durchflussziffer	59
5.4	B: Leistungsziffer über Durchflussziffer	60
5.5	C: Druckziffer und Wirkungsgrad über Durchflussziffer	61
5.6	C: Leistungsziffer über Durchflussziffer	62
5.7	D: Druckziffer und Wirkungsgrad über Durchflussziffer	63
5.8	D: Leistungsziffer über Durchflussziffer	64
5.9	Druckziffer und Wirkungsgrad über Durchflussziffer	67
5.10	Leistungsziffer über Durchflussziffer	68
5.11	Vergleich untersuchter ($A_z R^{-1}$)-Verläufe	69
5.12	Kennlinienvergleich in Abhängigkeit von A_{\max}	70
5.13	Definition Auswertebenen	71
5.14	Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Schaufelstellung	72
5.15	Einfluss der Schaufelstellung auf c	73
5.16	Geschwindigkeitsänderung innerhalb der Volute (Diagramme)	77
5.17	Geschwindigkeitsänderung innerhalb der Volute (Contourplots)	78
5.18	Axialgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Diagramme)	79
5.19	Axialgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Contourplots)	80
5.20	Radialgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Diagramme)	81
5.21	Radialgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Contourplots)	82
5.22	Drallentwicklung innerhalb der Volute (Diagramme)	83
5.23	Drallentwicklung innerhalb der Volute (Contourplots)	84
5.24	Druckverlustkoeffizient innerhalb der Volute (Diagramme)	85
5.25	Druckverlustkoeffizient innerhalb der Volute (Contourplots)	86
5.26	Änderung der Druckziffer innerhalb der Volute (Diagramme)	87
5.27	Änderung der Druckziffer innerhalb der Volute (Contourplots)	88
5.28	Entwicklung der spezifischen Förderrate innerhalb der Volute	89
5.29	Auswertegrößen bei η_{\max} (Diagramme)	91
5.30	Δc auf Span0.5 bei η_{\max}	92
5.31	$c_{a,x}$ auf Span0.5 bei η_{\max}	92

5.32	c_t auf Span0.5 bei η_{\max}	93
5.33	$c_u r$ auf Span0.5 bei η_{\max}	93
5.34	c_p auf Span0.5 bei η_{\max}	94
5.35	$\Delta\psi$ auf Span0.5 bei η_{\max}	94
5.36	Radialströmung im hinteren Radseitenraum	97
5.37	Gegenüberstellung Radialkraftkoeffizient bei $n = 3000 \text{ min}^{-1}$	98
6.1	Gesamtunsicherheiten bei $n3000$	101
6.2	Gesamtunsicherheit in Abhängigkeit der Spiralgehäusevariante	102
6.3	Gesamtunsicherheit in Abhängigkeit der Drehzahl	103
A.1	Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Diagramme)	128
A.2	Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Contourplots)	129
A.3	Umfangsgeschwindigkeit innerhalb der Volute (Diagramme)	130
A.4	Dralländerung innerhalb der Volute (Diagramme)	131
A.5	Volumenstrom innerhalb der Volute (Diagramme)	132
A.6	Statische Druckänderung innerhalb der Volute (Diagramme)	133
A.7	Statische Druckänderung innerhalb der Volute (Contourplots)	134
A.8	p_t auf Span0.5 bei η_{\max}	135
A.9	c auf Span0.5 bei η_{\max}	135
A.10	A: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	136
A.11	B: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	137
A.12	C: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	138
A.13	D: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	139
A.14	F: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	140
A.15	G: Qualitative Geschwindigkeitsänderung in der Pumpe (Contourplots)	141
A.16	A: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	142
A.17	B: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	143
A.18	C: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	144
A.19	D: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	145
A.20	F: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	146
A.21	G: Qualitative Axialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	147
A.22	A: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	148
A.23	B: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	149
A.24	C: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	150
A.25	D: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	151

A.26 F: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	152
A.27 G: Qualitative Radialgeschwindigkeit in der Pumpe (Contourplots)	153
A.28 A: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	154
A.29 B: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	155
A.30 C: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	156
A.31 D: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	157
A.32 F: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	158
A.33 G: Qualitative Totaldruckänderung in der Pumpe (Contourplots)	159
A.34 A: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	160
A.35 C: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	160
A.36 D: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	161
A.37 G: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	161
A.38 B: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	162
A.39 F: Dimensionsloser Radialkraftverlauf	162
B.1 RÜTSCHI 1961 [61] Querschnittsfläche	163

Tabellenverzeichnis

3.1	Verbaute Sensorik und Aktorik	37
3.2	Übersicht über experimentell untersuchte Spiralgehäusevarianten	40
4.1	Übersicht über numerisch untersuchte Spiralgehäusevarianten	44
4.2	Netze mit Nodeanzahl in Millionen	48
5.1	Zielgrößen für η_{\max}	66
B.1	Literaturübersicht über Untersuchungen an Spiralgehäusen	164
B.1	Literaturübersicht über Untersuchungen an Spiralgehäusen (Fortsetzung) .	165
B.1	Literaturübersicht über Untersuchungen an Spiralgehäusen (Fortsetzung) .	166
B.1	Literaturübersicht über Untersuchungen an Spiralgehäusen (Fortsetzung) .	167
B.1	Literaturübersicht über Untersuchungen an Spiralgehäusen (Fortsetzung) .	168

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die numerische und experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Auslegungsmethoden für Spiralgehäuse auf die Performance einer einstufigen Kreiselpumpe. Die Primäraufgabe des Spiralgehäuses ist die vom Laufrad produzierte kinetische Energie möglichst verlustfrei in potentielle Energie umzuwandeln. In der Literatur werden verschiedene Auslegungsmethoden für ein Spiralgehäuse genannt. Die beiden am verbreitetsten Auslegungsmethoden sind die Konstruktion des Spiralgehäuses nach dem Prinzip des konstanten Dralls sowie nach dem Prinzip der konstanten Geschwindigkeit. In der vorliegenden Arbeit werden diese beiden Auslegungsmethoden zwei weiteren Auslegungsmethoden gegenübergestellt. Diese sind ein linearer Verlauf des Verhältnisses aus Querschnittsfläche und deren Schwerpunktradius sowie ein quadratischer Verlauf des Spiralenwinkels. Die Berechnung der Spiralgehäusekonturen erfolgte für eine spezifische Drehzahl von $n_q = 39 \text{ min}^{-1}$. Die Querschnittsflächen der Spiralgehäusevarianten sind jeweils kreisförmig. Die Untersuchungen erfolgten sowohl numerisch als auch experimentell mit der gleichen Laufradgeometrie.

Alle numerischen Berechnungen wurden mit der kommerziellen CFD-Software Ansys CFX 17.2 durchgeführt. Die Validierung der CFD-Modelle erfolgte anhand von experimentell ermittelten Kennlinien. Diese dienen zudem zu einer Bewertung der Performance, die die einstufige Kreiselpumpen mit den verschiedenen Spiralgehäusevarianten erzielt. Für die experimentellen Untersuchungen wurde eine Versuchspumpe in Modularbauweise konstruiert und in einen Pumpenloop integriert.

Nach der erfolgreichen Validierung der CFD-Modelle erfolgte eine Analyse der Strömungsverhältnisse innerhalb der Volute sowie der gesamten Pumpenstufe. Besondere Beachtung erhalten dabei die Visualisierung und Lokalisierung von Geschwindigkeitsänderungen sowie Totaldruckverlusten im Spiralgehäuse. Die Analyse erfolgte in Abhängigkeit der Förderrate und des Auslegungsverfahrens, sodass in der vorliegenden Arbeit ein detailliertes Bild über die Entwicklung der Strömungsverhältnisse innerhalb des jeweiligen Spiralgehäuses von Teil- nach Nenn- in Überlast präsentiert werden kann.

Abstract

In this thesis the effects of design methods for a volute casing of a single-staged centrifugal pump are investigated numerically as well as experimentally. The primary task of a volute casing is to transform the kinetic energy, which was produced by the impeller, into potential energy. Several design methods for volute casings are known from the literature. The two most common ones are to calculate the volute shape according to the principle of the conservation of momentum and according to the principle of the conservation of kinetic energy. In the presented work these two design methods are compared to two other design methods. These are a linear ratio of the cross-section area and the radius of its emphasis and a quadratic course of the volute angle. The volute shapes have been calculated with regard to a specific speed of $n_q = 39 \text{ min}^{-1}$. Each calculated cross section has a circular shape. The investigations have been done numerically and experimentally with the same impeller geometry.

All numerical calculations have been carried out using the commercial CFD code Ansys CFX 17.2. To obtain reliable CFD results, it is necessary to compare the numerical results to experimental data. For validation, characteristic curves obtained experimentally were used. In addition, the characteristic curves serve to evaluate the performance of the single-staged centrifugal pump carried out with the different volute casings. A test pump has been designed modularly and integrated into a pump loop for experimental investigations. After the validation of the CFD model, an analysis was made of the flow conditions inside the volute as well as the whole pump stage. Particular attention is paid to the visualization and localization of changes in velocity plus losses in total pressure at the volute. The analysis has been done depending on the flow rate and the design method. This leads to a detailed picture of the evolution of the flow conditions inside the volute casing at partial, nominal and overload load conditions.