

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XIX</b>
<b>Abstract</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	2
1.2.1 Geometrieparameter . . . . .	4
1.2.2 Radialkraft . . . . .	10
1.3 Zielsetzungen . . . . .	12
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>13</b>
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
<b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>35</b>
3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus . . . . .	35
3.2 Gehäusevarianten . . . . .	38

3.3	Beschreibung der Versuchsdurchführung . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Numerische Untersuchungen</b>	<b>43</b>
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
<b>5</b>	<b>Ergebnisdiskussion</b>	<b>55</b>
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
<b>6</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>99</b>
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
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>

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



# 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 $\eta_{\max}$ (Diagramme) . . . . .	91
5.30	$\Delta c$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	92
5.31	$c_{a,x}$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	92

5.32	$c_t$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	93
5.33	$c_u r$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	93
5.34	$c_p$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	94
5.35	$\Delta\psi$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	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 $\eta_{\max}$ . . . . .	135
A.9	$c$ auf Span0.5 bei $\eta_{\max}$ . . . . .	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 $\eta_{\max}$ . . . . .	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.