

Radiale Kreiselpumpen

Wolfgang Wesche

Radiale Kreiselpumpen

Berechnung und Konstruktion der
hydrodynamischen Komponenten



Springer

Wolfgang Wesche
Vogelhohle 1
76646 Bruchsal
Deutschland
wesche.wolfgang@t-online.de

ISBN 978-3-642-19336-1 e-ISBN 978-3-642-19337-8
DOI 10.1007/978-3-642-19337-8
Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Das Buch ist gedacht als Leitfaden für den Praktiker, aber auch für den Studierenden. Es spiegelt den Erfahrungsschatz aus langjähriger Tätigkeit auf dem Gebiet der Hydrodynamik von Kreiselpumpen wider und ist ausgerichtet auf die Auslegung und Gestaltung der hydrodynamischen Komponenten Laufrad, Leitrad, Spiralgehäuse. Da die Auslegung dieser Komponenten zunehmend mit käuflichen CAD-Programmen durchgeführt wird, besteht die Tendenz, dass der Anwender immer weniger die alten Konstruktionstechniken beherrscht und das Gefühl für die Zusammenhänge verliert. Dem soll hier entgegengewirkt werden.

Die vermittelten Grundlagen sind universell, so dass sie auch auf Sonderbauformen, wie sie z. B. zur Förderung von feststoffbeladenen Flüssigkeiten zum Einsatz kommen, anwendbar sind. Frühere Berechnungsmethoden waren für diese Art von Pumpen in mancher Hinsicht unzulänglich, weshalb neue, allgemein gültige Methoden entwickelt wurden, die diese Sonderbauformen nicht als Randgebiet behandeln, sondern sie einschließen. Das Hauptgewicht des vorliegenden Buches konzentriert sich auf das weite Anwendungsgebiet der „radialen“ Bauformen. Axialpumpen werden wegen ihrer gesonderten Berechnungsverfahren nur am Rande erwähnt.

Wenngleich sich die Komponenten von Pumpen, die zur Förderung von nicht-NEWTON'schen Flüssigkeiten eingesetzt werden, optisch oft erheblich von denen für die Förderung reiner Flüssigkeiten unterscheiden, basiert ihre hydrodynamische Berechnung aber dennoch auf den gleichen strömungstechnischen Grundlagen. Das bedeutet, sie werden für homogene, niedrigviskose Flüssigkeiten, also Wasser, das noch weitgehend der idealen Flüssigkeit entspricht, berechnet. Das Fließverhalten realer Fördermedien höherer Viskosität bzw. hoher Heterogenität wird meist nach wie vor durch empirisch gewonnene Parameter berücksichtigt, die sich dann auf die Ausgestaltung der einzelnen Komponenten auswirken. Hierauf wird jedoch im vorliegenden Buch nicht weiter eingegangen; es sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. Die Themengebiete Rotordynamik und Werkstoffe werden in diesem Buch ebenfalls nicht behandelt; sie würden den gesteckten Rahmen sprengen.

In der Kreiselpumpenpraxis hat sich aus dem Technischen Maßsystem der Begriff der Energiehöhen (z. B. die Förderhöhe H) mit der Einheit [m] wegen seiner Anschaulichkeit weitgehend erhalten. Die Energiehöhe ist dabei eine auf die Gewichtskraft der geförderten Flüssigkeit bei der Normalfallbeschleunigung

$g=9,80665 \text{ m/s}^2$ bezogene Energie. Ihr Betrag würde sich also in einer Rakete oder auf dem Mond von demjenigen auf der Erde unterscheiden. Deshalb wurde der Begriff der spezifischen Arbeit (z. B. die spezifische Förderarbeit Y) mit der Einheit $[\text{m}^2/\text{s}^2]$ eingeführt, die von der Fallbeschleunigung unabhängig ist, da bei ihr die Energie auf die Masse bezogen ist. In der Praxis des Pumpenbaus hat sich der Begriff der spezifischen Arbeit jedoch noch nicht durchgesetzt, so dass in diesem Buch vorzugsweise der Begriff der Energiehöhe verwendet wird. Die Formel für die Umrechnung von Energiehöhe auf spezifische Arbeit lautet $Y=g \cdot H$.

Bei der Übernahme von in diesem Buch dargebrachten Informationen muss stets die individuelle Vorgehensweise bedacht werden. Diese hängt sowohl vom Geschick des Anwenders als besonders auch vom Herstellungsprozess der jeweiligen Bauteile mit seinen spezifischen Ungenauigkeiten ab und hat daher gewisse unvermeidbare Abweichungen zur Folge. Ein großer Teil der Informationen entstammt zudem der praktischen Erfahrung und kann nicht in jedem Falle bedenkenlos verallgemeinert werden. Daher kann keine Haftung für direkte oder indirekte Schäden, die aus der Anwendung der dargebrachten Informationen resultieren, übernommen werden.

Der Sulzer Pumpen Deutschland GmbH, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. M. Streicher, danke ich für den Zuspruch zur Erstellung des vorliegenden Buches und für die Zustimmung zur Überlassung von Zeichnungen und Forschungsergebnissen.

Herrn Dr.-Ing. W. Düchting, Düchting Pumpen GmbH, danke ich für die bereitwillige Überlassung von Zeichnungen und Bildmaterial.

Herrn B. Sc. W. H. Faragallah danke ich für die großzügige Einwilligung zur teilweisen Übernahme meines Beitrags aus dem von ihm herausgegebenen Buch „Pumpen als Turbinen“.

Mein Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. G. Zies für die interessanten Diskussionen und für tatkräftige Hilfe bei zahlreichen Computerproblemen.

Nicht zuletzt möchte ich dem Springer-Verlag für die angenehme und hilfsbereite Zusammenarbeit danken.

Bruchsal
im Frühjahr 2011

Wolfgang Wesche

Inhalt

1	Einführung	1
2	Strömungstechnische Grundlagen	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Der Strömungsmechanismus in der Kreiselpumpe	9
2.3	Eindimensionale Stromfadentheorie	15
2.4	Absolut- und Relativströmung	16
2.5	Die theoretische Förderhöhe	19
2.6	Spaltdruck, Reaktionsgrad und Druckziffer	23
2.7	Die Minderleistung	28
2.8	Die Radseitenraumströmung	37
2.9	Düsen und Diffusoren	45
2.9.1	Düsenströmung	46
2.9.2	Diffusorströmung	46
	Literatur	59
3	Grundlagen für die Berechnung und Konstruktion der hydrodynamischen Komponenten	61
3.1	Allgemeines	61
3.2	Verluste und Wirkungsgrade	61
3.3	Die Entstehung der Drosselkurven	67
3.3.1	Zusammenhänge	67
3.3.2	Erstellung von Projektkennlinien	70
3.4	Netto-Energiehöhe (NPSH) und Kavitation	77
3.5	Die spezifische Drehzahl	89
3.6	Erreichbarer Wirkungsgrad	92
3.7	Affinitätsgesetz, geometrische Ähnlichkeit, Aufwertung	99
3.8	Einfluss der Verluste auf die Lage des Bestpunktes	103
3.9	Entwurf des Laufrades	113
3.9.1	Allgemeines	113
3.9.2	Anwendungsbedingte Anforderungen	113
3.9.3	Auslegungsparameter	116

3.10	Entwurf der Leitvorrichtung	135
3.10.1	Allgemeines	135
3.10.2	Spiralgehäuse	140
3.10.3	Beschaufeltes Leitrad	154
3.10.4	Schaufelloser Diffusor	162
3.10.5	Rückführschaufeln	163
3.11	Entwurf des Eintrittsgehäuses	165
3.12	Spaltverluste	170
3.13	Scheibenreibungsverluste	177
3.13.1	Scheibe im unbegrenzten Raum	178
3.13.2	Scheibe im Gehäuse	179
3.14	Axialkraft und Axialkraftausgleich	187
3.15	Radialkraft (Radialschub)	196
3.16	Grafische Darstellung räumlich gekrümmter Schaufelflächen (Erstellung von Schaufelplänen)	204
3.17	Eintrittsquerschnitt bei räumlich gekrümmten Schaufeln	213
3.18	Vereinfachte Berechnung von Drosseln	217
	Literatur	225
4	Berechnungs- und Entwurfsbeispiele	229
4.1	Normallauftrad	229
4.2	Spiralgehäuse	242
4.3	Beschaufeltes Leitrad mit Umführung	248
4.4	Eintrittsgehäuse	256
4.5	Sonderlauftrad	259
5	Betrieb von Kreiselpumpen	273
5.1	Regelung	273
5.1.1	Änderung der Anlagenkennlinie	273
5.1.2	Änderung der Pumpenkennlinie	275
5.1.3	Parallel- und Reihenschaltung	278
5.2	Anpassung der Pumpencharakteristik an vorgegebene Betriebsdaten	280
5.2.1	Korrektur am Laufradaustritt	282
5.2.2	Korrektur am Laufradeintritt	288
5.2.3	Korrektur an der Leitvorrichtung	289
5.3	Einsatz von Pumpen als Turbinen	290
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	290
5.3.2	Bestimmung der Turbinenkennlinien aus der Pumpencharakteristik	299
5.3.3	Regelung durch Drehzahländerung	304
	Literatur	306
	Sachverzeichnis	309

Formelzeichen, Kopf- und Fußzeichen

A. Formelzeichen mit hydrodynamischer Bedeutung

A	Atmosphärendruckhöhe (m)
A	Gütezahl
C	Konstante
c	Absolutgeschwindigkeit (m/s)
F	Kraft (N ; mg/s^2)
g	Gravitationskonstante ($=9,80665 m/s^2$) (m/s^2)
$H = Y/g$	Höhe, Druckhöhe, Förderhöhe (m)
h	Enthalpie (m^2/s^2)
K	Drallkonstante (Drallziffer) (m^2/s)
k	Kugeldurchgang; Korngröße (mm)
m	Masse (kg)
$NPSH$	Haltedruckhöhe, Netto-Energiehöhe (Net Positiv Suction Head) (m)
n	Drehzahl (U/min)
n_q	spezifische Drehzahl (U/min)
P	Leistung (W ; kW ; J/s ; kJ/s)
Re	Reynolds-Zahl
r	Reaktionsgrad
S	Saugzahl (U/min)
S	Sicherheitsbeiwert
s	Entropie (J/K ; kJ/K)
T	Temperatur (K ; $^{\circ}C$)
V	Volumenstrom, Förderstrom ¹ (m^3/s ; m^3/h)
$Y = g \cdot H$	spezifische Förderarbeit (m^2/s^2)
Z	Verlustenergiehöhe (m)
p	Druck (bar)
$q = V/V_{opt}$	Fördergrad
u	Umfangsgeschwindigkeit (m/s)

¹ Es wird davon abgesehen, den Volumenstrom als zeitliche Ableitung des Volumens mit \dot{V} zu kennzeichnen

w	Relativgeschwindigkeit (m/s)
α	Strömungswinkel im Absolutsystem auf einer Stromfläche ($Grad; ^\circ$)
β	Strömungswinkel im Relativsystem auf einer Stromfläche ($Grad; ^\circ$)
ζ	Geschwindigkeitskennziffer (bezogen auf u_2)
ζ_{3m}	Lieferziffer
ζ	Verlustbeiwert
ε	hydrodynamische Schaufelbelastung (Auftriebsbeiwert)
η	Wirkungsgrad
η_h	hydrodynamischer (hydraulischer) Wirkungsgrad
λ	Unterdruckbeiwert
λ	Leistungsziffer
λ	Reibungszahl (Reibbeiwert)
σ	Kavitationsbeiwert
Ψ	Druckziffer
ρ	Dichte (kg/m^3)
$\omega = \pi \cdot n / 30$	Winkelgeschwindigkeit ($1/s; rad/s$)

B. Formelzeichen mit geometrischer Bedeutung

A	Fläche ($m^2; cm^2$)
a	Lichtweite in Strömungskanälen (Schaufelkanal; Diffusor) (mm)
B	Stufenschritt ($m; mm$)
b	Breite ($m; mm$)
$D; d$	Durchmesser ($m; mm$)
E	Exzentrizität ($m; mm$)
e	Stromlinienlänge (mm)
i	Stufenzahl
k	Kugeldurchgang, Korngröße (mm)
L	Länge ($m; mm$)
R	Radius, auf Pumpenachse bezogen ($m; mm$)
r	Radius ($m; mm$)
s	Schaufelstärke; Materialstärke, Länge (mm)
t	Schaufelteilung (mm)
t	Faktor
U	Umfang ($m; mm$)
z	geodätische Höhe (m)
z	Anzahl (Schaufeln; Spiralzungen)
z_U	Schaufelzahl im Laufrad
z_L	Schaufelzahl im Leitapparat (Leitrad)
α	Schaufelwinkel im Absolutsystem auf einer Stromfläche ($Grad; ^\circ$)
α	Erweiterungswinkel im Diffusor in radialer Ebene ($Grad; ^\circ$)
β	Schaufelwinkel im Relativsystem auf einer Stromfläche ($Grad; ^\circ$)

β	Erweiterungswinkel im Diffusor in der Breite (<i>Grad</i> ; °)
γ	Erweiterungswinkel von konischen Diffusoren (<i>Grad</i> ; °)
γ	Winkel zwischen Stromfläche und Radialschnitt (<i>Grad</i> ; °)
ε	äquivalenter Erweiterungswinkel im Diffusor (<i>Grad</i> ; °)
ε	Versatzwinkel im Sauggehäuse (<i>Grad</i> ; °)
ε	Rauheitserhebung (Oberfläche) (μm)
λ	Maßstabsfaktor
ρ	Krümmungsradius (<i>m</i> ; <i>mm</i>)
σ	Schaufelstärke auf Stromfläche, gemessen auf Parallelkreis (<i>mm</i>)
κ	Winkel zwischen Schaufelfläche und Zylinderschnitt („Rake“) (<i>Grad</i> ; °)
φ	Entwicklungswinkel (Zentriwinkel) (<i>Grad</i> ; °)

C. Kopfzeichen

*	vorläufig; Richtwert
*	auf Flächenschwerpunkt bezogen
'	theoretischer, ideeller Wert
–	Mittelwert

D. Fußzeichen

<i>A</i>	Atmosphäre, Umgebung
<i>A</i>	die Pumpenanlage betreffend
<i>a</i>	die Austauschvorgänge betreffend
<i>av</i>	verfügbar (available)
<i>a</i>	äußere Stromlinie
<i>e</i>	mittlere Stromlinie
<i>j</i>	innere Stromlinie
<i>E</i>	Pumpeneintritt (Saugstutzen)
<i>D</i>	Pumpenausritt (Druckstutzen)
<i>D</i>	Diffusor
<i>d</i>	auf Schaufeldruckfläche bezogen
<i>G</i>	Gehäuse
<i>N</i>	die Laufradnabe betreffend
<i>i</i>	die innere Arbeit (Leistung) betreffend
<i>h</i>	hydrodynamisch (hydraulisch)
<i>L</i>	auf Leitapparat bezogen
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>m</i>	mechanisch
<i>m</i>	auf Meridianebene bezogen
<i>n</i>	Zählgröße
<i>N</i>	Nenn(drehzahl)

<i>opt</i>	im Bestpunkt
<i>P</i>	auf Pumpe bezogen
<i>p</i>	auf „Spalt“ (Stelle zwischen Laufrad und Leitapparat am Laufraddurchmesser) bezogen
<i>R</i>	In radialer Richtung
<i>R</i>	die Rückführung betreffend
<i>R</i>	Reibung
<i>s</i>	Laufradsaugmund
<i>s</i>	auf Schaufelsaugfläche bezogen
<i>S</i>	Schwerpunkt (einer Flächen)
<i>Sch</i>	Schaufel (Y_{Sch})
<i>Sk</i>	Skelettfläche; Skelettlinie
<i>Sp</i>	Spirale
<i>Sp</i>	Spalt
<i>St</i>	Staupunkt am Schaufeleintritt bzw. an der Spiralzunge
<i>st</i>	unter Stoß
<i>stfr</i>	stoßfrei
<i>T</i>	auf Turbine bezogen
<i>t</i>	Temperatur
<i>th</i>	theoretisch
<i>U</i>	auf Laufrad bezogen (umlaufend)
<i>u</i>	auf Umfang bezogen
<i>V</i>	Verlust
<i>Z</i>	auf hydrodynamische Verluste bezogen
<i>v</i>	volumetrisch
<i>x</i>	veränderlicher Wert
0	bei Nullförderung ($V=0$)
0	Stelle der ungestört gedachten Strömung unmittelbar vor Schaufelsaugkante
1	Stelle der schaufelkongruenten Strömung im Schaufelkanal unmittelbar hinter der Schaufelsaugkante des Laufrades
2	Stelle der schaufelkongruenten Strömung im Schaufelkanal unmittelbar vor der Schaufeldruckkante des Laufrades
3	Stelle der ungestört gedachten Strömung unmittelbar hinter der Schaufeldruckkante des Laufrades
4	Stelle am Leitapparateintritt (Leitschaufel oder Spiralzunge)
5	Stelle am Leitradiffusor unmittelbar vor der Austrittskante
6	Stelle am Leitradiffusor unmittelbar hinter der Austrittskante
7	Stelle der ungestört gedachten Strömung unmittelbar vor der Rückführbeschaufelung
8	Stelle unmittelbar hinter dem Rückführschaufelkanal-Eintritt
9	Stelle am Rückführschaufelkanal-Austritt
∞	bei gedachter unendlich großer Schaufelzahl
∞	Mittelwert (Relativströmung)

Weitere Symbole und Indices von lokaler Bedeutung werden an entsprechender Stelle erklärt