

Radiale Kreiselpumpen

Wolfgang Wesche

Radiale Kreiselpumpen

Berechnung und Konstruktion der
hydrodynamischen Komponenten

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

 Springer Vieweg

Wolfgang Wesche
Bruchsal, Deutschland

ISBN 978-3-662-48911-6 ISBN 978-3-662-48912-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-48912-3

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2012, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 2. Auflage

Die bisherige Fassung des Buches wurde einer gründlichen Überarbeitung unterzogen. Dabei wurden einige Kapitel korrigiert bzw. ergänzt und vertieft. Zur Abrundung des bisher behandelten Stoffes wurden sieben weitere Kapitel hinzugefügt, in denen einige Randthemen behandelt werden, die im Allgemeinen weniger Beachtung finden, gleichwohl aber für das Verständnis der Kreiselpumpenhydrodynamik bzw. für den Konstrukteur in der Praxis von Bedeutung sind. Es handelt sich dabei um das interessante Randgebiet der Hilfsschaufeln bzw. der hydrodynamischen Dichtungen, der nicht zu unterschätzenden Reibungsverluste in Spaltdichtungen, der Berechnung von Sammelentlastungen und schließlich des Einschaufelrades, das eine hydrodynamische Sonderstellung einnimmt. Zur Konzeption von Rohrleitungen und offenen Pumpeneinläufen werden einige grundsätzliche Richtlinien gegeben, deren Nichtbeachtung leicht zu nachträglich oft kaum behebbaren Problemen führen kann. Des Weiteren wurden fünf Berechnungsbeispiele hinzugefügt, zum Teil bezogen auf die neu hinzugekommenen Kapitel. Die Berechnungsbeispiele sollen einen praktischen Bezug zu den zuvor behandelten Grundlagen herstellen und werden sehr detailliert durchgeführt, um dem weniger Versierten die Zusammenhänge deutlicher und verständlicher darzustellen.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. G. Zies für die gute Zusammenarbeit, verbunden mit fruchtbaren Diskussionen und vielfältiger Hilfe bei allfälligen Computerproblemen.

Frau A. Link danke ich für die bereitwillige Durchsicht des Textes und für diverse Tipps und Hinweise zur Gestaltung.

Zum Schluss möchte ich dem Springer-Verlag danken für die stets angenehme Zusammenarbeit und das Entgegenkommen bei der Verwirklichung der zahlreichen Änderungswünsche.

Bruchsal, Deutschland
im Frühjahr 2017

Wolfgang Wesche

Vorwort zur 1. Auflage

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 [m^2/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	10
2.3	Eindimensionale Stromfadentheorie	16
2.4	Absolut- und Relativströmung	17
2.5	Die theoretische Förderhöhe	20
2.6	Spaltdruck, Reaktionsgrad und Druckziffer	24
2.7	Die Minderleistung	28
2.8	Die Radseitenraumströmung	39
2.9	Düsen und Diffusoren	47
2.9.1	Düsenströmung	48
2.9.2	Diffusorströmung	48
	Literatur	62
3	Grundlagen für die Berechnung und Konstruktion der hydrodynamischen Komponenten	63
3.1	Allgemeines	63
3.2	Verluste und Wirkungsgrade	63
3.3	Die Entstehung der Drosselkurven	69
3.3.1	Zusammenhänge	69
3.3.2	Erstellung von Projektkennlinien	73
3.4	Netto-Energiehöhe (<i>NPSH</i>) und Kavitation	79
3.5	Die spezifische Drehzahl	92
3.6	Erreichbarer Wirkungsgrad	95
3.7	Affinitätsgesetz, geometrische Ähnlichkeit, Aufwertung	103
3.8	Einfluss der Verluste auf die Lage des Bestpunktes	107
3.9	Entwurf des Laufrades	117
3.9.1	Allgemeines	117
3.9.2	Anwendungsbedingte Anforderungen	117
3.9.3	Auslegungsparameter	122

3.10	Entwurf der Leitvorrichtung	140
3.10.1	Allgemeines	140
3.10.2	Spiralgehäuse	146
3.10.3	Beschaufeltes Leitrad	160
3.10.4	Schaufelloser Diffusor	168
3.10.5	Rückführschaufeln	169
3.11	Entwurf des Eintrittsgehäuses	171
3.12	Spaltverluste	177
3.13	Scheibenreibungsverluste	185
3.13.1	Scheibe im unbegrenzten Raum	186
3.13.2	Scheibe im Gehäuse	187
3.13.3	Anhang	198
3.14	Axialkraft und Axialkraftausgleich	200
3.15	Radialkraft (Radialschub)	211
3.16	Grafische Darstellung räumlich gekrümmter Schaufelflächen (Erstellung von Schaufelplänen)	219
3.17	Eintrittsquerschnitt bei räumlich gekrümmten Schaufeln	229
3.18	Vereinfachte Berechnung von Drosseln	232
3.19	Hydrodynamische Dichtungen	241
3.20	Reibung in zylindrischen Dichtspalten	247
3.21	Berechnung von Sammelentlastungen	254
3.22	Das Einschaufelrad	269
	Literatur	276
4	Berechnungs- und Entwurfsbeispiele	279
4.1	Normallaufrad	279
4.2	Spiralgehäuse	293
4.3	Beschaufeltes Leitrad mit Umführung	300
4.4	Eintrittsgehäuse	308
4.5	Sonderlauf rad	311
4.6	Spalt- und Reibungsverluste	324
4.7	Sammelentlastung	340
4.8	Erreichbarer Wirkungsgrad	344
4.9	Pumpe-Turbine	348
4.10	Rückenschaufeln und hydrodynamische Dichtung	352
5	Betrieb von Kreiselpumpen	363
5.1	Regelung	363
5.1.1	Änderung der Anlagenkennlinie	363
5.1.2	Änderung der Pumpenkennlinie	366
5.1.3	Parallel- und Reihenschaltung	369
5.2	Anpassung der Pumpencharakteristik an vorgegebene Betriebsdaten	370
5.2.1	Korrektur am Laufradaustritt	373
5.2.2	Korrektur am Laufradeintritt	378
5.2.3	Korrektur an der Leitvorrichtung	380

Inhalt	XI
5.3 Einsatz von Pumpen als Turbinen	381
5.3.1 Allgemeine Zusammenhänge	381
5.3.2 Bestimmung der Turbinenkennlinien aus der Pumpencharakteristik	390
5.3.3 Regelung durch Drehzahländerung	395
5.3.4 Änderung der Pumpencharakteristik mittels Turbine.	398
5.4 Rohrleitungen	400
Literatur	414
6 Stoffgrößen	415
Literatur	419
Sachverzeichnis	421

Formelzeichen, Kopf- und Fußzeichen

A. Formelzeichen mit hydrodynamischer Bedeutung

A	Atmosphärendruckhöhe (m)
A	Gütezahl
C	Konstante
c	Absolutgeschwindigkeit (m/s)
F	Kraft (N; mkg/s ²)
g	Gravitationskonstante (=9,80665) (m/s ²)
$H = Y/g$	Höhe, Druckhöhe, Förderhöhe (m)
h	Enthalpie (m ² /s ²)
K	Drallkonstante (Drallziffer) (m ² /s)
k	Verhältnis der Festkörperrotation im RSR zur Winkelgeschwindigkeit des Laufrades
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)
p	Druck (bar)
$q = V/V_{opt}$	Fördergrad
Re	Reynolds-Zahl
r	Reaktionsgrad
S	Saugzahl (U/min)
S	Sicherheitsbeiwert
s	Entropie (J/K; kJ/K)
T	Temperatur (K; °C)
u	Umfangsgeschwindigkeit (m/s)

V	Volumenstrom, Förderstrom ¹ (m ³ /s; m ³ /h)
w	Relativgeschwindigkeit (m/s)
$Y = g \cdot H$	spezifische Förderarbeit (m ² /s ²)
Z	Verlustenergiehöhe (m)
α	Strömungswinkel im Absolutsystem auf einer Stromfläche (Grad; °)
α	Kontraktionsziffer
β	Strömungswinkel im Relativsystem auf einer Stromfläche (Grad; °)
ζ	Geschwindigkeitskennziffer (bezogen auf u_2)
ζ_{3m}	Lieferziffer
ζ	Verlustbeiwert
ε	hydrodynamische Schaufelbelastung (Auftriebsbeiwert)
ν	kinematische Viskosität (m ² /s)
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)
e	Spaltweite (mm)
i	innenliegend
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)

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

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

C. Kopfzeichen

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

D. Fußzeichen

A	Atmosphäre, Umgebung
A	die Pumpenanlage betreffend
a	äußere Stromlinie
a	die Austauschvorgänge betreffend
av	verfügbar (available)
D	Diffusor
D	Pumpenausstritt (Druckstutzen)
d	auf Schaufeldruckfläche bezogen
DS	Deckscheibe

<i>E</i>	Pumpeneintritt (Saugstutzen)
<i>e</i>	mittlere Stromlinie
<i>EK</i>	Entlastungskolben
<i>ES</i>	Entlastungsscheibe
<i>FKW</i>	Festkörperwirbel
<i>G</i>	Gehäuse
<i>h</i>	hydrodynamisch (hydraulisch)
<i>i</i>	die innere Arbeit (Leistung) betreffend
<i>j</i>	innere Stromlinie
<i>L</i>	auf Leitapparat bezogen
<i>m</i>	auf Meridianebene bezogen
<i>m</i>	mechanisch
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>N</i>	die Laufradnabe betreffend
<i>N</i>	Nenn(drehzahl)
<i>n</i>	Zählgröße
<i>ND</i>	Nachdrossel
<i>opt</i>	im Bestpunkt
<i>P</i>	auf Pumpe bezogen
<i>p</i>	auf „Spalt“ (Stelle zwischen Laufrad und Leitapparat am Laufrad- durchmesser) bezogen
<i>R</i>	die Rückführung betreffend
<i>R</i>	In radialer Richtung
<i>R</i>	Reibung
<i>RSR</i>	Radseitenraum
<i>S</i>	Schwerpunkt (einer Flächen)
<i>s</i>	auf Schaufelsaugfläche bezogen
<i>s</i>	Laufradsaugmund
<i>Sch</i>	Schaufel (Y_{Sch})
<i>Sk</i>	Skelettfläche; Skelettlinie
<i>Sp</i>	Spalt
<i>Sp</i>	Spirale
<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>TS</i>	Tragscheibe
<i>U</i>	auf Laufrad bezogen (umlaufend)
<i>u</i>	auf Umfang bezogen
<i>V</i>	Verlust
<i>VD</i>	Vordrossel

x	veränderlicher Wert
Z	auf hydrodynamische Verluste bezogen
v	volumetrisch
0	bei Nullförderung ($V=0$)
0	Stelle der ungestört gedachten Strömung unmittelbar vor Schaufel- saugkante
1	Stelle der schaufelkongruenten Strömung im Schaufelkanal unmit- telbar hinter der Schaufelsaugkante des Laufrades
2	Stelle der schaufelkongruenten Strömung im Schaufelkanal unmit- telbar vor der Schaufeldruckkante des Laufrades
3	Stelle der ungestört gedachten Strömung unmittelbar hinter der Saufeldruckkante des Laufrades
4	Stelle am Leitapparateintritt (Leitschaufel oder Spiralzunge)
5	Stelle am Leitraddiffusor unmittelbar vor der Austrittskante
6	Stelle am Leitraddiffusor 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