Wirkungsgradmodell rotierender Verdrängerpumpen auf Grundlage von Ähnlichkeitsbeziehungen

Christian Schänzle

Band 25

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

FLUID SYSTEM TECHNIK

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Wirkungsgradmodell rotierender Verdrängerpumpen auf Grundlage von Ähnlichkeitsbeziehungen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Philipp Schänzle

aus Esslingen am Neckar

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer
Tag der Einreichung:	13.10.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	16.12.2020

Darmstadt 2020

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 25

Christian Schänzle

Wirkungsgradmodell rotierender Verdrängerpumpen auf Grundlage von Ähnlichkeitsbeziehungen

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7970-8
ISSN 2194-9565

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 des Herausgebers

Kontext

Fluidenergiemaschinen ermöglichen Prozesse, deren Funktion durch Verben wie dosieren, versprühen oder fördern beschrieben wird. Die Funktion ist aber nur eine Seite der Medaille und ist heute tatsächlich nur eine zu erfüllende Restriktion. Die zweite Seite der Medaille ist die Qualität der Funktionserfüllung. Die Qualität wird durch das Adverb beschrieben. „Pulsationsfrei fördern“ vereint Funktion und Qualität.

Im Rahmen von Sustainable Systems Design ist die Qualität zu maximieren unter Beachtung der Restriktionen, die durch die geforderte Funktion, den Designraum sowie die physikalische Realität vorgegeben sind. Die Qualität wird durch den Aufwand, die Verfügbarkeit und die Akzeptanz beschrieben. Der Aufwand wiederum lässt sich in Energie- und Materialverbrauch - allgemein Kosten bemessen.

In der Arbeit von Herrn Schänzle steht die energetische Qualität der Funktion im Mittelpunkt. Die gesellschaftlichen Kosten hierfür sind erheblich, wenn man sich vor Augen führt, dass in etwa jedes vierte Windrad allein dem Antreiben von Fluidarbeitsmaschinen dient. Herr Schänzle hat sich in seiner Forschung mit rotierenden und translatorisch arbeitenden Verdrängerpumpen beschäftigt. Hier steht die rotierende Verdrängerpumpe im Mittelpunkt.

Notwendiges Physikalisches um Transparenz für Hersteller, Betreiber und Gesellschaft zu ermöglichen

Aus regelungstechnischer Sicht sind Fluidsysteme praktisch immer überaktuiert, d.h., sie zeigen im quasi-stationären Betrieb mit „Bremse“ und „Gaspedal“ mehr Aktoren als Freiheitsgrade. Eine reine Funktionsorientierung, die bisher vorherrschte, stellt dies nicht in Frage. Erst das oben angesprochene beschränkte Optimierungsproblem „minimiere den Energieverbrauch unter der Nebenbedingung, dass die spezifizierte Funktion erfolgt ist“ führt dazu, dass nicht nur die Pumpe, sondern auch das System betrachtet wird.

Derzeit betrachtet die Europäische Union im Eco-Design die energetische Qualität der Komponenten, die direkt von Elektromotoren angetriebenen werden. Dabei werden ordnungspolitische Instrumente genutzt, um den Markt zu beschränken. Diese Instrumente haben zumindest bei Kreiselpumpen mit der Ähnlichkeitstheorie ein physikalisches Fundament. Bei Verdrängerpumpen fehlte bisher ein analoges physikalisches Fundament.

Woran liegt dies? Eine Kreiselpumpe und ein Ventilator sind geometrisch und allgemein physikalisch ähnlicher als eine Zahnradpumpe und eine Schraubenpumpe. Die Funktion und Qualität von Kreiselpumpe und Ventilator lassen sich bei den relevanten großen Reynolds-Zahlen rein kinematisch beschreiben. Dies gelingt bei Verdrängermaschinen nicht, da die dynamische Größe Viskosität und damit das Fördermedium für die energetische Qualität relevant ist. Alle vergangenen Versuche einer einheitlichen energetischen Qualitätsbewertung von Verdrängermaschinen der vergangenen Dekaden sind daher als gescheitert zu bewerten.

Die Wissenschaft ist auf dem Weg immer feiner granular zu werden. Wenn es um Marktregulierung auf der einen Seite und die praktische Anwendbarkeit von wissenschaftlicher Erkenntnis auf der anderen geht, dann ist diese Richtung vom Groben zum Feinen nicht die passende Richtung.

Herr Schänzle geht den umgekehrten Weg. Er geht von Daten zur Erkenntnis und entwickelt eine „Brille“, die für möglichst viele Pumpentypen passt. Diese Brille ist – so die Erwartung – von Nutzen, um die energetische Qualität von Pumpen für die unterschiedlichen Stakeholder (i) Hersteller, (ii) Betreiber und (iii) Gesellschaft zu bewerten. Um Vertrauen in die Metrik zur Bewertung der energetischen Qualität von Funktionseinheiten zu gewährleisten, ist Nachvollziehbarkeit und wissenschaftliches Arbeiten Voraussetzung.

Methoden

Herr Schänzle nutzt in seiner Arbeit drei wissenschaftliche Methoden. Erstens, die Dimensionsanalyse und Ähnlichkeitstheorie, die schon Fourier nutzte und ihr axiomatisches Fundament durch Bridgman erhalten hat, der „die absolute Bedeutung relativer Größen“ als Axiom formulierte.

Verdrängerpumpen einer Baureihe sind nicht geometrisch ähnlich, d.h., sie haben unterschiedliche Gestalt. Herr Schänzle berücksichtigt dies. Unvollständige Ähnlichkeit in der Reynoldszahl oder Mach-Zahl ist bei Turbomaschinen bekannt. Bei Verdrängerpumpen dominiert die unvollständige Ähnlichkeit in der Gestalt selbst in einer Baureihe.

Herr Schänzle nutzt zweitens, die Unsicherheitsquantifizierung von Daten und Modellen. Es ist besonders positiv herauszustellen, dass Herr Schänzle nicht nur die Datenunsicherheit quantifiziert, sondern auch die Modellunsicherheit. Damit arbeitet Herr Schänzle im Umfeld des Sonderforschungsbereiches SFB 805 mit dem Thema „Beherrschen von Unsicherheit“.

Herr Schänzle nutzt drittens, die von ihm aufgenommenen experimentellen Daten von insgesamt acht Pumpen. Bei den Zahnradpumpen untersuchte er eine Baureihe. Um den Einfluss der Viskosität zu untersuchen, hat Herr

Schänzle vier verschiedene Öle bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Damit sind 32 verschiedene Versuchsaufbauten in zwei Kreisläufen mit vier Ölbehältern realisiert worden. Insgesamt hat Herr Schänzle 1250 Betriebspunkte aufgenommen, Wiederholungsmessungen nicht mitgerechnet.

Die Dimensionsanalyse und das Modell nutzt Herr Schänzle sehr geschickt „zur Befreiung vom Diktat des Partikulären“ [Prof. E. Becker, TU Darmstadt].

Fazit

Die wissenschaftliche Methode, die von Galilei eingeführt wurde, hat die Elemente

- Beobachtung der Natur [und Technik] in einem Laborexperiment
- Abstraktion und Konzentration auf Relevanz
- Modellbildung und Validierung im „Dialog mit der Natur [und der Technik]“ [Prigogine]

Als Sprache dient Galilei die Mathematik. Das Ergebnis von Wissenschaft ist Erkenntnis und Vertrauen in die Erkenntnis. Damit ist die Arbeit von Herrn Schänzle eine ingenieurwissenschaftliche Arbeit im eigentlichen Sinne. Das Ergebnis der Arbeit ist eine Brille, die für alle drei genannten Stakeholder (i) Hersteller, (ii) Betreiber und (iii) Gesellschaft von Nutzen sein wird.

Darmstadt, im Dezember 2020
Peter Pelz

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Während dieser Zeit habe ich die Unterstützung vieler Menschen erfahren, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz danke ich sehr herzlich für den Rückhalt und das Vertrauen, die er mir und meiner Arbeit entgegengebracht, und den Freiraum, den er mir für die Gestaltung meiner Forschungsaktivitäten ermöglicht hat. Seine inspirierende Sichtweise auf die Modellierung von Fluidsystemen gemäß den Prinzipien Einfachheit, Klarheit und Kreativität haben diese Arbeit maßgeblich geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Brümmer bin ich für die freundliche Übernahme des Koreferats und das Interesse an meiner Arbeit sehr dankbar. Herrn Dr.-Ing. Hannes Lünzmann danke ich für den freundschaftlichen Gedankenaustausch und den motivierenden Zuspruch für meine Forschung.

Allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Fluidsystemtechnik danke ich für die vielen unvergesslichen Momente während meiner Tätigkeit am Institut. Für die fachlichen Diskussionen und fruchtbaren Gespräche, die zum Gelingen dieser Arbeit wesentlich beigetragen haben, danke ich insbesondere den Herren Dr.-Ing. Gerhard Ludwig, Dr.-Ing. Ibrahim Budde, Dr.-Ing. Tobias Corneli, Maximilian Kuhr und Nils Preuß. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der Werkstatt, die mich beim Prüfstandsaufbau und den zahlreichen Umbauten unterstützt haben.

Den Studierenden Nils Strömer, Jan Lemmer, Kris Jost, Manuel Metzger, Jan Stifter und Martin Hock, die mich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten und Hiwi-Tätigkeiten mit größtem Engagement unterstützt haben, danke ich ebenfalls sehr herzlich.

Mein größter Dank richtet sich an meine Frau Christine und meine Eltern Jörg und Waltraud Schänzle, ohne deren Unterstützung und stetigen Rückhalt diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Diese Arbeit ist meinen Großeltern gewidmet.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Darmstadt, im Oktober 2020
Christian Schänzle

Kurzfassung

Der Wirkungsgrad von rotierenden Verdrängerpumpen wird im Rahmen der allgemeinen Bemühungen um Energieeffizienz zukünftig an Bedeutung gewinnen. Eine zentrale Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der Berechnung des Wirkungsgradverhaltens von rotierenden Verdrängerpumpen zu, sowohl hinsichtlich möglicher legislativer Anforderungen als auch durch Bestrebungen auf Anwenderseite, den Energieverbrauch von Verdrängerpumpen bei der Anlagenplanung zu berücksichtigen und zu optimieren. Dazu bedarf es physikalisch basierter und einfach anwendbarer Modelle. Darunter werden stationäre 0D-Modelle verstanden, die das Wirkungsgradverhalten mit algebraischen Gleichungen in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen beschreiben.

In diesem Kontext wird in dieser Arbeit die Frage nach Ähnlichkeitsbeziehungen gestellt, die sich für die Wirkungsgradmodellierung rotierender Verdrängerpumpen sinnvoll anwenden lassen. Zur Beantwortung werden sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen an den drei Pumpentypen dreispindlige Schraubenpumpe, Außenzahnradpumpe und zweiflügelige Drehkolbenpumpe durchgeführt.

Der Schwerpunkt der theoretischen Untersuchungen ist die Herleitung problemspezifischer dimensionsloser Größen mittels Dimensionsanalyse, anhand derer der Wirkungsgrad für die verschiedenen Pumpentypen einheitlich dargestellt werden kann. Ferner werden zwei semi-axiomatische Modelle für die volumetrischen und mechanisch-hydraulischen Verluste aufgestellt, auf deren Grundlage das Wirkungsgradverhalten bei quantifizierter Modellunsicherheit vorhergesagt werden kann.

Die Messung von stationären Kennfeldern an Baureihen von Schrauben- und Zahnradpumpen sowie an einer einzelnen Drehkolbenpumpe mit insgesamt vier unterschiedlichen Hydraulikölen stellen die experimentellen Untersuchungen dar. Im Rahmen der Modellvalidierung werden die Abweichungen der Modellvorhersagen anhand der experimentellen Vergleichsdaten sowie die Unsicherheit der Modellvorhersagen über ein Vertrauensintervall dargestellt, diskutiert und abschließend bewertet.

Abstract

The efficiency of rotary displacement pumps will become more important due to the ongoing efforts to reduce energy consumption. In this context, modeling the efficiency of these pumps is of central importance. This requires physically based, easily applicable and stationary 0D models describing the efficiency with algebraic equations considering the relevant influencing variables.

Against this background, this doctoral thesis investigates the similarity of rotary positive displacement pump and its application to efficiency modeling. Therefore, both theoretical and experimental investigations are carried out considering the following three pump types: three spindle screw pump, external gear pump and two rotor lobe pump.

The focus of the theoretical investigations lies on the derivation of problem-specific dimensionless quantities by means of dimensional analysis. These quantities serve a uniform description of the efficiency behavior of all pump types. In addition, two semi-axiomatic models are developed both for the volumetric and mechanical hydraulic losses. These models allow the efficiency prediction including a confidence interval.

The measurements of steady-state characteristic curves on a series each of screw pumps and gear pumps as well as on a single rotary lobe pump represent the experimental investigations. On this experimental database, the model predictions as well as their confidence intervals are discussed and validated.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Wirkungsgrad bei Verdrängerpumpen **11**
2.1 Wirkungsgraddefinition 12
2.2 Wirkungsgradmessung 25
2.3 Wirkungsgradmodelle 28
2.3.1 Axiomatische Modelle 29
2.3.2 Semi-axiomatische Modelle 31
2.3.3 Datengetriebene Modelle 36
2.4 Einordnung der Forschungsfrage 37

3 Wirkungsgradmodellierung auf Grundlage von Ähnlichkeitsbeziehungen **41**
3.1 Geometriebetrachung 44
3.2 Dimensionsanalyse 49
3.3 Physikalische Ähnlichkeit einzelner Pumpen 55
3.4 Wirkungsgradmodell 67
3.4.1 Volumetrische Verluste 67
3.4.2 Mechanisch-hydraulische Verluste 71
3.5 Quantifizierung der Modellunsicherheit 78

4 Versuche **89**
4.1 Prüffeld 89
4.1.1 Aufbau 89
4.1.2 Messtechnik 93
4.2 Versuchsdurchführung 94
4.3 Quantifizierung der Messunsicherheiten 96

5 Validierung des Wirkungsgradmodells **103**
5.1 Schraubenpumpen 105
5.2 Zahnradpumpen 114
5.3 Drehkolbenpumpe 122

Zusammenfassung und Ausblick **133**

Literatur **141**

Anhang **141**

A Dimensionslose Darstellungen **143**

B Herleitung des Leckagemodells **151**

C Prüfstand **153**
C.1 Komponenten 153
C.2 Messsensorik 155

D Betriebsbereiche **157**

E Validierungsergebnisse **163**
E.1 Schraubenpumpen 163
E.2 Zahnradpumpen 167

Symbolverzeichnis

Die Symbole der ersten Spalte werden in der zweiten Spalte beschrieben. Die dritte Spalte, wenn vorhanden, gibt die Dimension als Monom mit den Basisgrößen Länge (L), Masse (M), Zeit (T) und Temperatur (Θ) an.

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Dimension
b	Breite eines Rotors	L
B_{G}	Breite eines Gleitlagers	L
d	Durchmesser eines Rotors	L
h	Steigung einer Schraubenspindel	L
h_{l}	Enthalpieverlust durch Dissipation	$\mathrm{L^2\ T^{-2}}$
h_{s}	massenspezifische isentrope Enthalpie	$\mathrm{L^2\ T^{-2}}$
H_{s}	isentrope Enthalpie	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
$H_{\mathrm{s,e}}$	effektive isentrope Enthalpie	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
h_{t}	massenspezifische Totalenthalpie	$\mathrm{L^2\ T^{-2}}$
$h_{\mathrm{t,s}}$	massenspezifische isentrope Totalenthalpie	$\mathrm{L^2\ T^{-2}}$
L	Modellparameter des Leckagemodells	
m	Exponent des Leckagemodells	
M	Maßstabsfaktor	
$\dot{m}$	Massenstrom	$\mathrm{M\ T^{-1}}$
M_{C}	druckabhängiges Reibmoment	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
M_{const}	betriebsgrößenunabhängiges und konstantes Reibmoment	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
m_{e}	effektiv geförderte Fluidmasse	M
m_{F}	geförderte Fluidmasse je Umdrehung	M
M_{hyd}	hydraulisches Moment	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
M_{μ}	Reibmoment durch viskose Reibung	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
$m_{\mathrm{Q-n}}$	Steigung der Ausgleichgeraden zwischen Volumenstrom und Drehzahl	$\mathrm{L^3}$
M_{S}	Wellenmoment	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
M_{ϱ}	Reibmoment durch Trägheitsverluste	$\mathrm{M\ L^2\ T^{-2}}$
m_{tot}	Fluidmasse im Totvolumen	M
n	Drehzahl	$\mathrm{T^{-1}}$
N	Anzahl von Messungen bzw. physikalischer Größen	

N_y	Anzahl von unabhängigen Messgrößen für abgeleitete Messgrößen	
N_M	Anzahl von Modellparametern	
p	statischer Druck	$\mathrm{M\ L^{-1}\ T^{-2}}$
$\bar{p}$	mittlerer Druck im Gleitlager	$\mathrm{M\ L^{-1}\ T^{-2}}$
P_{loss}	Verlustleistung durch Leckage und Reibung	$\mathrm{M\ L^{2}\ T^{-3}}$
P_{S}	Wellenleistung	$\mathrm{M\ L^{2}\ T^{-3}}$
p_{U}	Umgebungsdruck	$\mathrm{M\ L^{-1}\ T^{-2}}$
q	beliebige physikalische Größe	
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$\mathrm{M\ L^{2}\ T^{-3}}$
Q	gemessener Volumenstrom	$\mathrm{L^{3}\ T^{-1}}$
Q_{e}	effektiver Volumenstrom	$\mathrm{L^{3}\ T^{-1}}$
Q_{th}	theoretischer Volumenstrom	$\mathrm{L^{3}\ T^{-1}}$
r	Anzahl von Basisgrößen	
R_{C}	Modellparameter für Coulomb'sche Reibung	
R_{G}	Wellenradius im Gleitlager	L
R_{μ}	Modellparameter für viskose Reibung	
R_{ϱ}	Modellparameter für Trägheitsverluste	
RMSE	Modellfehler bzw. Root Mean Square Error	
s	empirische Standardabweichung	
$\bar{s}$	mittlere Spalthöhe	L
T	Temperatur	Θ
$t_{95\%}$	t-Faktor der Student'schen Verteilung für ein 95% Konfidenzintervall	
v	massenspezifisches Volumen	$\mathrm{L^{3}\ M^{-1}}$
V	experimentell bestimmtes Verdrängervolumen	$\mathrm{L^{3}}$
V_{e}	effektives Fördervolumen	$\mathrm{L^{3}}$
V_{g}	geometrisches Verdrängervolumen	$\mathrm{L^{3}}$
V_{gesamt}	gesamtes Volumen eines gefüllten Verdrängerraums	$\mathrm{L^{3}}$
V_{th}	theoretisches Verdrängervolumen	$\mathrm{L^{3}}$
V_{tot}	Totvolumen	$\mathrm{L^{3}}$
$V_{\mathrm{tot,e}}$	Differenz zwischen komprimiertem und entspanntem Totvolumen	$\mathrm{L^{3}}$
W	Reibungskraft im Gleitlager	$\mathrm{M\ L^{1}\ T^{-2}}$

Griechische Symbole

Symbol	**Beschreibung**	**Dimension**
δ	Messunsicherheit von der Dimension der Messgröße	
Δ	Differenz	
δV	Abweichung vom theoretischen Verdrängervolumen	L
Δp	statische Druckdifferenz	$M\ L^{-1}\ T^{-2}$
η	Wirkungsgrad	
κ	Nachgiebigkeit	$M^{-1}\ L^{1}\ T^{2}$
κ_{i}	Längenverhältnis	
μ	dynamische Viskosität	$M\ L^{-1}\ T^{-1}$
ν	kinematische Viskosität	$L^{2}\ T^{-1}$
Ω	Winkelgeschwindigkeit	T^{-1}
Π	dimensionsloses Produkt	
ϱ	Dichte	$M\ L^{-3}$
ψ_{G}	relatives Lagerspiel im Gleitlager	

Indices

Symbol	Beschreibung
1	Zustand 1, Eingang der Verdrängermaschine
2	Zustand 2, Ausgang der Verdrängermaschine
DP	Drehkolbenpumpe
kal	Kalibration
L	Leckage
max	maximal
mh	mechanisch-hydraulisch
min	minimal
ref	Referenz
S	Shaft (Welle)
SP	Schraubenpumpe
stat	statistisch
sys	systematisch
vol	volumetrisch
ZP	Zahnradpumpe

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
UKF	Umpump-Kühl-Filtereinheit
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement

Dimensionslose Kennzahlen

Symbol	**Beschreibung**
$M^{+}_{\mathrm{const}} := \dfrac{M_{\mathrm{const}}}{\Delta p V}$	dimensionsloser konstanter Reibmomentanteil
$M^{+}_{\mathrm{mh}} := \dfrac{M_{\mathrm{mh}}}{\Delta p V}$	spezifisches Reibmoment
$Q^{+}_{\mathrm{L}} := \dfrac{Q_{\mathrm{L}}}{\nu V^{1/3}}$	spezifische Leckage
$Re := \dfrac{n V^{2/3}}{\nu}$	Reynolds-Zahl
$So := \dfrac{\bar{p}}{\Omega \mu} \psi^{2}_{\mathrm{G}}$	Sommerfeld-Zahl eines Gleitlagers
$\Delta p^{+} := \dfrac{\Delta p V^{2/3}}{\nu^{2} \varrho}$	spezifischer Druck
$\kappa_{d_{\mathrm{ZP}}} := \dfrac{d_{\mathrm{ZP}}}{V^{1/3}}$	Längenverhältnis
$\mu_{\mathrm{G}} := \dfrac{W}{2 \bar{p} R_{\mathrm{G}} B_{\mathrm{G}}}$	Reibungszahl eines Gleitlagers
$\psi := \dfrac{\bar{s}}{V^{1/3}}$	relativer Spalt
$\psi := \dfrac{\bar{s}}{d_{\mathrm{ZP}}}$	relativer Spalt bei Zahnradpumpen