

Reihe 7

Strömungstechnik

Nr. 504

Stephan Uhkötter, M. Sc.,
Berlin

Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern

Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Stephan Uhkötter M.Sc.
aus Münster

Hamburg 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 2016

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Joos

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan aus der Wiesche

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 7

Strömungstechnik

Stephan Uhkötter, M. Sc.,
Berlin

Nr. 504

Untersuchung der
Strömungs- und
Vermischungsphänomene
in schnelllaufenden
hydrodynamischen
Turbinengleitlagern

VDI verlag

Uhkötter, Stephan

Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in schnelllaufenden hydrodynamischen Turbinengleitlagern

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7 Nr. 504. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

172 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-350407-7, ISSN 0178-9538,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

Für die Dokumentation: Turbinengleitlager – Radialgleitlager – Gleitlagertaschen – Strömungs- und Vermischungsphänomene – CFD-LES-Kavitation-Temperaturverhalten

Die vorliegende Arbeit zeigt eine detaillierte Untersuchung der Strömungs- und Vermischungsphänomene in Turbinengleitlagern. Der Fokus dieser Untersuchung liegt dabei auf den Gleitlagertaschen. Stand der bisherigen Forschung und Technik stellt die Schmierfilmtheorie mit empirischen Korrelationen dar. Diese Vereinfachungen der Schmierfilmtheorie werden in dieser Arbeit durch die Verwendung einer CFD-Berechnung vermieden. Es wird so ein höherer Detaillierungsgrad erreicht.

Fragestellungen im Gleitlager, wie nach dem Maximaltemperaturverhalten in Abhängigkeit vom Vermischungsverhalten in den vorgelagerten Ölvorsorgungstaschen, lassen sich somit numerisch beantworten. Die Anwendung der Methodik auf ein Turbinengleitlager und ein beispielhaftes Ergebnis werden detailliert gezeigt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9538

ISBN 978-3-18-350407-7

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Laboratorium für Wärme-, Energie- und Motorentechnik der Fachhochschule Münster.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Franz Joos und Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan aus der Wiesche, die diese Arbeit durch ihre exzellente Betreuung und umfassende Unterstützung, sowie durch ihr persönliches Engagement erst ermöglicht haben.

Danken möchte ich auch Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac und Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig für die Begleitung auf meinem Weg. Bedanken möchte ich mich zudem bei der Siemens AG für die Förderung dieser Arbeit und die gute Zusammenarbeit, insbesondere Dipl.-Ing. Michael Kursch, Dr.-Ing. Stefan Janssen und Dr.-Ing. Christian Beck.

Mein Dank gilt auch dem Lehrstuhl für Produktentwicklung der Ruhr-Universität Bochum und Dipl.-Ing. Sebastian Kukla für die Bereitstellung der Messdaten, sowie den Mitarbeitern des Laboratoriums für Strömungsmaschinen der Helmut-Schmidt-Universität für ihren Einsatz.

Ein großes Dankeschön an Christian Helcig, Reiner Schönfeld, Karsten Hasselmann, Felix Reinker, Marek Kapitz, Holger Czajka, Thorsten Kroner, Thomas Gensrich, Jürgen Lux und Prof. Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen für die zahlreichen inspirierenden Diskussionen und die Unterstützung während der Messungen.

Ich danke dem Stipendien-Programm der Fachhochschule Münster für die finanzielle Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht hätte begonnen werden können, sowie dem DAAD für die zweimalige Bewilligung eines Stipendiums.

Ganz besonders Danke ich meiner Familie für ihre Unterstützung und meiner Frau Christina für ihre Geduld einen großen Teil unserer Zeit dieser Arbeit zu widmen.

Berlin, Juni 2016

Stephan Uhkötter

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	2
1.2 Gegenstand der vorliegenden Untersuchung	4
2 Stand der Forschung	8
2.1 Wirkungsweise eines Turbinengleitlagers	8
2.1.1 Tribologie	12
2.1.2 Fluidmechanik	13
2.1.3 Ölzuführung zur Schmierung und Kühlung	15
2.1.4 Kavitation	17
2.2 Experimenteller Aufbau eines Turbinengleitlagerprüfstands	19
3 Modellbildung und numerische Simulation der Gleitlagerströmung	22
3.1 Modellbildung turbulenter Strömung	23
3.1.1 REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES Simulation (RANS)	25
3.1.2 Large Eddy Simulation (LES)	32
3.2 Mehrphasige Strömung und Kavitation	38
3.3 Energiegleichung und Temperaturabhängigkeiten	40
4 Gesamtgleitlagerbetrachtung	41
4.1 Numerische Ergebnisse	43
4.1.1 Thermische Bilanzierung	48
4.1.2 Druckverteilung	49
4.1.3 Füllungsgradfeld	50
4.1.4 Geschwindigkeitsverteilung	53
4.2 Validierung durch experimentelle Daten	54

5	Lagertaschenbetrachtung	59
5.1	Konfusor mit einseitig bewegter Berandung	61
5.1.1	CFD-Simulation	64
5.1.2	Experimenteller Versuchsaufbau und Messdaten	68
5.1.3	Validierung der CFD-Ergebnisse	72
5.2	Lagertaschenmodell ohne Frischölauführung	75
5.2.1	Analytische Betrachtung	76
5.2.2	CFD-Simulation	78
5.2.3	Experimenteller Versuchsaufbau und Messdaten	83
5.2.4	Validierung und Diskussion der Ergebnisse	90
5.3	Lagertaschenmodell mit Frischölauführung	98
5.3.1	CFD-Simulation	98
5.3.2	Experimenteller Versuchsaufbau	106
5.3.3	Validierung und Diskussion der Ergebnisse	107
5.3.4	Vermischung	110
6	Anwendung der Erkenntnisse auf Turbinengleitlager in Schwerbauweise	113
6.1	Strömungsphänomene	114
6.1.1	CFD-Simulation	114
6.1.2	Grundlegende Strömungsform der Gleitlagertasche	116
6.1.3	Zuführungsabhängige Strömungsform der Gleitlagertasche	117
6.2	Vermischungsverhalten	121
6.3	Temperaturverteilung	124
7	Resultate und Diskussion	131
8	Zusammenfassung und Ausblick	134
	Literatur	136

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Abschnitt
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit	3.3
a_1	-	turbulente Modellkonstante	3.1
A_0	-	turbulente Modellkonstante	3.1
A_S	-	turbulenter Modellparameter	3.1
A_μ	-	stoffabhängige Konstante	3.3, 4.1
b_1	-	turbulente Modellkonstante	3.1
B	mm	Lagerbreite	2.1, 2.2, 4.2
B_K	mm	Kanalbreite	5.0–5.3
B_μ	-	stoffabhängige Konstante	3.3, 4.1
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	3.3
$c_p \text{ Öl}$	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität des Öls	2.2
c_1	-	turbulente Modellkonstante	3.1
C	-	turbulente Modellkonstante	3.1
d_h	mm	hydraulischer Durchmesser	5.3
D	mm	Lagerdurchmesser	2.1
D_W	mm	Wellendurchmesser	2.2, 4.0
e	mm	Exzentrizität	2.1
f	-	turbulenter Modellparameter	3.1
F	N	Kraft	2.1
F	-	turbulenter Modellparameter	3.1
F_L	N	Lagerbelastung	2.1, 2.2

g	-	turbulenter Modellparameter	3.1
G	-	Filterkern	3.1
G_k	kg/(m s ³)	turbulenter Produktionsterm	3.1
h	µm	Spalthöhe	2.1, 2.2, 4.0, 4.2, 5.1
H_K	mm	Kanalhöhe	5.0–5.3
k	m ² /s ²	kinetische Turbulenzenergie	3.1, 4.1
l	m	Abstand zur nächstgelegenen Oberfläche	3.1
l_m	m	PRANDTLscher Mischungsweg	3.1
L_K	mm	Kanallänge	5.0–5.3
\dot{m}	kg/s	Massenquellterm	3.2
M	N m	Reibungsmoment	2.1
n	-	Stichprobe	3.1
n_W	min ⁻¹	Antriebsdrehzahl	2.2
N	-	Gitterzellenanzahl	4.1, 5.1, 5.2, 6.1
N	-	Stichprobenumfang	3.1, 5.2
n_0	m ⁻³	Keimdichte	3.2
p	Pa	Druck	1.2, 2.1, 3.0–3.2, 4.1, 5.1, 5.2
p^+	%	normierter Druck	4.1, 4.2, 5.1
\bar{p}	%	mittlerer Lagerdruck	2.1
\check{P}	kg/(m s ³)	turbulenter Modellparameter (Quellterm der turbulenten kinetischen Energie)	3.1
P_{Wmax}	W	maximale Wellenleistung	2.2
q	1/s	Geschwindigkeitsskala	3.1
r_W	mm	Wellenradius	2.1
r	-	turbulenter Modellparameter	3.1
R	m	Blasenradius	3.2
$RMS_{u'_K}$	m/s	Root-Mean-Square-Wert (quadratisches Mittel) der Geschwindigkeitsschwankungen u'_K	5.2
$RMS_{v'_K}$	m/s	Root-Mean-Square-Wert (quadratisches Mittel) der Geschwindigkeitsschwankungen v'_K	5.2
S_{ij}	1/s	Deformationsgeschwindigkeitstensor	3.1
t	s	Zeit	0, 2.1, 3.0–3.3, 5.2
Δt	s	Zeitintervall	3.1, 5.3

T	K	Temperatur	1.2, 3.3, 4.1, 6.1
T_{mix}	K	Mischungstemperatur	6.1, 6.3
Tu	%	Turbulenzgrad	5.2
T^+	%	normierte Temperatur	4.1, 4.2
T_{in}	°C	Ölzuführtemperatur	2.2
u	m/s	Geschwindigkeitskomponente in Hauptrichtung	3.1, 5.1, 5.2
u'	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Hauptrichtung	5.2
u_K	m/s	Geschwindigkeit in Kanallängenrichtung	5.1, 5.2
u'_K	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Kanallängenrichtung	5.2
u_W	m/s	Wandgeschwindigkeit	5.1
u^+	-	normierte Geschwindigkeit	5.1, 5.2, 6.1
u_i	m/s	Geschwindigkeitsvektor in Indexnotation	2.1, 3.0–3.2
u_j	m/s	Geschwindigkeitsvektor in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
U	m/s	Geschwindigkeitsbetrag	0, 1.2, 5.3, 6.1
U_S	m/s	Geschwindigkeit der Lagerschale	2.1
U_W	m/s	Geschwindigkeit der Welle	2.1
U^*	1/s	turbulenter Modellparameter	3.1
u_τ	m/s	Schubspannungsgeschwindigkeit	5.2
v	m/s	Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Hauptrichtung	5.2
v'	m/s	Geschwindigkeitsschwankung senkrecht zur Hauptrichtung	5.2
v_K	m/s	Geschwindigkeit in Kanalhöhenrichtung	5.2
v'_K	m/s	Geschwindigkeitsschwankung in Kanalhöhenrichtung	5.2
\mathbf{v}	m/s	Geschwindigkeitsvektor	3.3, 4.0, 4.1, 5.1, 5.2
w	m/s	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptrichtung	5.2
w'	m/s	Geschwindigkeitsschwankung quer zur Hauptrichtung	5.2
w_K	m/s	Geschwindigkeit in Kanalbreitenrichtung	5.2
f_i	J/kg	spezifische äußere potentielle Energie, Massenkraftpotential, Schwerkraftpotential	2.1, 3.0

x	m	kartesische Koordinate (Haupttrichtung)	0, 2.1, 3.1, 5.0–5.3, 6.0, 6.1
x_i	m	kartesische Koordinate in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
x_j	m	kartesische Koordinate in Indexnotation	2.1, 3.0, 3.1
y	m	kartesische Koordinate (senkrecht zur Haupttrichtung)	5.0–5.3, 6.0, 6.1
y^+	-	normierter Wandabstand	5.1, 5.2
z	m	kartesische Koordinate (quer zur Haupttrichtung)	2.1, 5.0–5.3, 6.0, 6.1

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung	Abschnitt
α	%	Füllungsgrad	1.2, 3.2, 4.1, 4.2
β	-	turbulente Modellkonstante	3.1
β^*	-	turbulente Modellkonstante	3.1
γ	°	Exzentrizitätswinkel	2.1
γ	-	turbulente Modellkonstante	3.1
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit	2.1
δ_{ij}	-	KRONECKER-Delta	3.1
Δ	m	Filterweite	3.1
$\Delta\vartheta^+$	-	normierte Temperaturänderung	6.1–6.3
ε	m ² /s ³	turbulente Dissipation	3.1, 4.1
ζ	-	turbulenter Modellparameter	3.1
η	m	KOLMOGOROV-Länge	3.1
ι	-	Hilfsvariable zur Ermittlung turbulenter Modellkonstanten	3.1
κ_t	-	turbulente Modellkonstante (von-Kármán-Konstante)	3.1
$\lambda_{\ddot{o}l}$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit des Öls	2.2

μ	Pa s	dynamische Viskosität	2.1, 3.1–3.3, 4.1, 5.2
μ	-	Reibungskoeffizient	2.1
μ_t	Pa s	turbulente dynamische Viskosität	3.1
$\mu_{öl}$	Pa s	dynamische Ölviskosität	2.2
ν	m ² /s	kinematische Viskosität	2.1, 3.0, 3.1, 3.3, 4.0, 5.2, 5.3
ν_t	m ² /s	turbulente kinematische Viskosität	3.1
$\check{\nu}$	m ² /s	Wirbelviskosität	3.1
ρ	kg/m ³	Dichte	0, 2.1, 3.0–3.2, 5.2, 5.3
$\rho_{öl}$	kg/m ³	Öldichte	2.2
σ	-	turbulente Modellkonstante	3.1
τ_W	m ² /s ²	Wandschubspannung	5.2
τ_η	s	KOLMOGOROV-Zeit	3.1
τ_t	m ² /s ²	turbulente Schubspannung	3.1, 5.2
τ_{ij}	m ² /s ²	viskoser Spannungstensor	3.0
τ_{ij}^{SGS}	m ² /s ²	Kleinskalen-REYNOLDS-Spannung	3.1
φ	°	Umfangswinkel	2.1, 2.2, 3.2, 4.0–4.2, 6.3
ϕ	-	beliebige Variable	3.1
χ	-	turbulenter Modellparameter	3.1
ψ	-	relatives Lagerspiel	2.1
ω	rad/s	Umfangsgeschwindigkeit	2.1, 3.1, 6.0–6.3
ω	1/s	charakteristische Frequenz der energietragenden Wirbel	3.1
Ω_{ij}	1/s	mittlere Rotation	3.1

Mathematische Symbole

Symbol	Bezeichnung
\bar{x}	Term, konventionell gemittelt
\hat{x}	LES gefilterter Term über die Filterweite Δ
\tilde{x}	LES gefilterter Term über ein Vielfaches der Filterweite Δ

Subskripte

Symbol	Bezeichnung
cav	Kavitation
in	Zuführung bzw. Einlass
i	laufender Index der Vektorkomponenten, $i = 1, 2, 3$ (EINSTEINSche Summenkonvention)
j	laufender Index der Vektorkomponenten, $j = 1, 2, 3$
ij	laufender Index der Tensorkomponenten, $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$
h	hydraulisch
K	Kanal
$krit$	kritisch
L	Lager
l	flüssig (liquid)
max	maximal
min	minimal
mix	Mischung
$Öl$	Öl
out	Auslass
p	Druck
$Rezi$	Rezirkulation

S	Lagerschale
sat	Sättigungszustand
t	turbulent
W	Welle
W	Wand
v	gasförmig (vapor)
Zu	Zuführung

Superskripte

Symbol	Bezeichnung
T	Term, transponiert
$+$	Term, normiert
$'$	Schwankungsgröße

Operatoren

Symbol	Bezeichnung	
∇	Gradient:	$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x_i}$
$\nabla \cdot$	Divergenz:	$\nabla \cdot \equiv \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i}$
Δ	LAPLACE-Operator:	$\Delta = \nabla \cdot \nabla \equiv \sum_i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$

Dimensionslose Kennzahlen

Symbol	Bezeichnung	Definition	Abschnitt
c	COURANT-Zahl	$c = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta x}$	4.1
J	Impulsverhältnis	$J = \frac{U_{zu}^2 \cdot \rho_{zu}}{U_k^2 \cdot \rho_k}$	5.3, 6.1–6.3, 7.0
Pr_t	turbulente PRANDTL-Zahl	$Pr_t = \frac{\nu_l}{a_t}$	5.2
Re	REYNOLDS-Zahl	$Re = \frac{v \cdot h}{\nu}$	3.1, 4.0, 5.0–5.3, 7.0
ReR	REYNOLDSZahlenverhältnis	$ReR = \frac{ReR_K}{ReR_{Zu}}$	5.3, 6.1–6.3, 7.0
Sc_t	turbulente SCHMIDT-Zahl	$Sc_t = \frac{\nu_l}{D_t}$	5.2
So	SOMMERFELD-Zahl	$So = \frac{\bar{p} \cdot \psi^2}{\mu \cdot \omega}$	2.1
Ta	TAYLOR-Zahl	$Ta = \frac{v^2 \cdot h^3}{1/2 \cdot D_W \cdot \nu^2}$	3.1, 4.0

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Abschnitt
ALP3T	Allgemeines Lagerprogramm mit dreidimensionalem Temperatureinfluss	2.1, 4.0–4.2
CAD	Computer-Aided Design	4.1
CFD	Computational Fluid Dynamics	1.2, 2.1, 2.2, 3.0–3.2, 4.0–4.2, 5.0–5.3, 6.1, 6.2, 7.0, 8.0

CHT	Conjugate Heat Transfer [gekoppelter Wärme-transport]	8.0
DDES	Delayed Detached-Eddy Simulation	3.1, 5.2
DNS	Direct Numerical Simulation [Direkte numerische Simulation]	3.1, 4.1, 5.2
DyRoBes-BePerf	Dynamics of Rotor Bearing Systems	2.1
FSI	Fluid-Structure Interaction [Fluid-Struktur-Kopplung]	8.0
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.	2.2
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie	5.1, 5.2
LES	Large Eddy Simulation [Grobstruktursimulation]	3.1, 4.1, 5.2, 5.3, 6.2, 7.0
LES-Smag	klassisches SMAGORINSKY Modell	5.2
LES-EG	Eingleichungs Modell	5.2
LDMMS	LAGRANGIAN Dynamic Mixed Model Simulation	3.1, 5.2, 5.3, 6.1
RANS	REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES [REYNOLDS-gemittelte NAVIER-STOKES]	3.1, 4.1, 5.2
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations	5.1
URANS	Unsteady REYNOLDS-averaged NAVIER-STOKES [Instationäre REYNOLDS-gemittelte NAVIER-STOKES]	3.1
VoF	Volume-of-Fluid	3.2, 4.1
VT-FAST	Virginia Tech - Front-end Automated Simulation of Turbomachinery	2.1

