
Wandgleiten in Strömungen Newtonscher Flüssigkeit

Tobias Corneli

Band 23



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

FLUID
SYSTEM
TECHNIK

The logo for Fluid System Technik consists of two white, curved lines that sweep upwards and to the right, positioned to the left of the text.

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

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

Wandgleiten in Strömungen Newtonscher Flüssigkeit

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

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von

Tobias Corneli, M.Sc.

aus Simmern

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Tag der Einreichung:	21.01.2019
Tag der mündlichen Prüfung:	29.05.2019

Darmstadt 2019

D 17

Forschungsberichte zur Fluidsystemtechnik

Band 23

Tobias Corneli

Wandgleiten in Strömungen Newtonscher Flüssigkeit

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., 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 978-3-8440-7002-6

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

Als Ingenieurinnen und Ingenieure haben wir gelernt, dass Flüssigkeiten an Wänden haften. Dieses Bild ist falsch! Navier wusste es im 19ten Jahrhundert besser. Er erklärt die damals noch vermutete Relativbewegung zwischen Materialteilchen und einer festen Wand mit einem Widerstandsgesetz: die wandtangente Komponente des Spannungsvektors führt zum Wandgleiten. Für eine Newtonsche Flüssigkeit überführte Helmholtz das Widerstandsgesetz in einen äquivalenten (scheinbar) rein kinematischen Zusammenhang zwischen Gleitgeschwindigkeit, Wandscherrate und Gleitlänge. Die von Helmholtz eingeführte Gleitlänge ist eine phänomenologische Größe der kontinuumsmechanischen Tribologie. Sie tritt neben die Viskosität, um die viskose Reibung einer Flüssigkeit im Bulk und an der Wand phänomenologisch zu beschreiben.

Die Gleitlänge ist durch die Wechselwirkung der Moleküle mit der Wand bei Scherung begründet. Die atomistische Längenskala bei tropfbaren Flüssigkeiten, die hier im Fokus sind, ist der Moleküldurchmesser. Die Größenordnung der Gleitlänge ist 100 Moleküldurchmesser. Bei einer Molekülabmessung von einem Nanometer, typisch für Ölmoleküle, ist eine Gleitlänge in der Größenordnung 100 Nanometer zu erwarten. Die Länge $100 \text{ nm} = 0.1 \mu\text{m}$ wird nur dann relevant, wenn der Strömungspalt in der Größenordnung kleiner 1 bis $10 \mu\text{m}$ ist. In allen anderen Fällen können wir mit der Lehrmeinung leben. Es gilt wie so oft: „Alle Modelle sind falsch, manche sind nützlich“ (George Box).

Wann muss Wandgleiten beim Systemdesign berücksichtigt werden? Enge Spalte mit Spalthöhen in der Größenordnung $1 \mu\text{m}$ treten in der Technik bei Kolbenführungen, Dichtungen, Gleitlagern, Umformen und Mikroverfahrentechnik auf. Aus der Sicht der Fluidtechnik sind Kolbenführungen, Dichtungen und Gleitlager die Maschinenelemente, die die Funktion, den Aufwand und die Verfügbarkeit eines Systems maßgeblich bestimmen. Sie sind die Weak-Links des Systems. Wenn das schwache Kettenglied erkannt ist, dann ist es Pflicht dieses Glied so gut wie nur irgend möglich zu verstehen.

Der feste Teil des technischen Tribo-Systems ist zumeist Stahl oder Kunststoff. Technisch relevante Flüssigkeiten sind Hydrauliköl. Teilweise werden trennflächenaffine Additive zugesetzt, um gezielt Reibung zu reduzieren. Der Einfluss auf die Bulk-Viskosität dieser Additive ist klein. In der derzeit üblichen virtuellen Produktentwicklung mittels hydrodynamischer Schmiertheorie, teilweise gekoppelt mit der Energiegleichung und der Elastomechanik,

II

wird der Effekt der Additive überhaupt nicht betrachtet. Hier gilt „Die wichtigste physikalische Einheit ist Euro“: Unternehmen wie Evonik leben nur dann gut vom Verkauf der Additive, wenn diese technisch relevant sind. Warum ist dann bis heute eine Lücke in den Ingenieurgrundlagen, die praktisch höchst relevant ist? Hierzu sind zwei Gründe zu nennen: Erstens die mangelhafte Erkenntnis und zweitens ist schlicht bis heute kein objektives Messverfahren verfügbar, das für technische Strömungen die Gleitlänge für die beschriebenen Tribo-Systeme bestimmbar macht.

Nun mag der Physiker einwenden, dass wir doch Atomic Force Microscope, Particle Image Velocimetry, Surface Force Apparatus, Fluorescence Recovery after Photobleaching und andere Methoden zur Verfügung haben, um Gleitlängen zu bestimmen. Die genannten Messverfahren eignen sich aufgrund der Geometrie, um die Oberfläche von glatten Oberflächen mit einem Mittenrauwert kleiner 6 nm zu bestimmen. Sie sind aber nicht geeignet, um die Gleitlängen in technischen Tribo-Systemen zu bestimmen. Dies motiviert die Entwicklung eines Gleitlängentribometers, das sowohl Bulkviskosität als auch Gleitlänge als Funktion der Temperatur für zunächst die Materialpaarungen Kohlenwasserstoffe, versetzt mit Additiven und Stahl ermöglicht.

Die Literatur offenbart die fünf weißen Forschungsflecken, die die vorliegende Arbeit von Herrn Tobias Corneli motivieren.

- I. Es ist kein Messgerät bekannt, das Wandgleiten für technisch raue Oberflächen bestimmen kann.
- II. Bisher wurden technisch relevante Tribo-Systeme nicht hinsichtlich Wandgleiten untersucht.
- III. Bisher wurden keine systematischen Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf die Gleitlänge durchgeführt.
- IV. Selbstredend ist auch die Bestimmung der Aktivierungsenergie für Wandgleiten nicht durchgeführt, die aus der systematischen Temperaturvariation folgt.
- V. Die Reynoldssche Gleichung der hydrodynamischen Schmierung ist bisher nicht analytisch unter Berücksichtigung von Wandgleiten gelöst.

Entwicklung und Anwendung des Darmstädter Gleitlängentribometers durch Herrn Corneli

Ein menschliches Haar hat einen Durchmesser in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$. Die Gleitlänge ist um den Faktor 100 kleiner. Ein passender Maßstab ist die Wellenlänge von blauem Licht, die ca. $0.4\ \mu\text{m}$ beträgt. Es ist also erstens Aufgabe eine Größe kleiner als die Wellenlänge von sichtbarem Licht mit genügend kleiner Messunsicherheit zu bestimmen. Zweitens muss die Gleitlänge flächengemittelt bestimmt werden, so wie auch technische Rauheit immer über einen Messbereich gemittelt angegeben ist.

Die Idee und Konzept für das Gleitlängentribometer, von Herrn Corneli Darmstädter Gleitlängentribometer genannt, stammt aus dem Jahr 2006, ist also über 10 Jahre alt. Es hat tatsächlich diese 10 Jahre Entwicklungszeit und vier aufgeführte Tribometer gebraucht, bis sich die Elemente (i) Kalibration, (ii) Messung, (iii) Auswertung, (iv) Arrheniusgraph wie ein Puzzle ineinanderfügten. Diese Passgenauigkeit der verschiedenen Puzzleteile zu einem Gesamtbild sind das eigentlich Faszinierende an der von Herrn Corneli in großer Beharrlichkeit, Geduld aber auch Ehrgeiz entwickelten Technologie.

Die wesentlichen Meilensteine des Gleitlängentribometers sind:

2006	Idee und Messkonzept durch den Autor dieses Vorworts.
2010	Rotordynamische Untersuchungen zur Selbstzentrierung der beiden Platten durch Dr.-Ing. Thurner.
2013	Übernahme des Projekts durch Herrn Tobias Corneli: Planung, Fertigung sowie Inbetriebnahme des ersten Tribometers.
2014	Verbesserungen in der zweiten ausgeführten Konstruktion: (i) Nadellagerung der unteren Platte, (ii) Messung des Moments der stehenden Platte, (iii) Integration kapazitiver Abstandssensoren in die Metallplatten, (iv) Herstellung und Vermessen der Platten bei einem Endmaßhersteller.
2015	Verbesserungen in der dritten ausgeführten Konstruktion: (i) neuer Antriebsstrang, Umsetzung einer Fest-Los-Lagerung. (ii) erste Prüfstandsregelung.

IV

- 2016 Verbesserungen in der vierten ausgeführten Konstruktion: (i) Integration des kompletten Tribometers in einen Temperierschrank, (ii) Erster Prüfstand im Rahmen des Projekts „Digitales Laborbuch“ ein Teil des Forschungsdatenmanagements, (iii) vollständige Automatisierung der Messung zur Beherrschung der statistischen Messunsicherheit.
- 2017 Verbesserungen in der fünften ausgeführten Konstruktion: In-situ optische Kalibration der kapazitiven Abstandssensoren als Funktion der Temperatur und des Öls.
- 2018 Variation von Öl, Öl-Additiven sowie Temperatur; erstmalige Bestimmung von Aktivierungsenergie mittels Arrhenius-Graph.

Die Messungen am Beispiel für ein synthetisches Alpha-Olefin (PAO6) in den Abbildungen 4.5 und 7.3 sowie in der Tabelle 7.1 sprechen am besten für das Tribometer. Erstmals überhaupt ist es gelungen, einen Arrhenius-Graph für die Gleitlänge eines Tribosystems darzustellen. Von besonderer Eleganz ist, dass das Tribometer sowohl Gleitlänge als auch Bulkviskosität gleichzeitig ermittelt. Somit können die Aktivierungsenergien für Scheren und Gleiten verglichen werden.

Das Tribosystem wird durch die Angabe von vier phänomenologischen Materialkonstanten im Bereich der Hydrodynamik vollständig beschrieben. Die Leistungsfähigkeit des Tribometers wurde durch die Vermessung von drei weiteren Kohlenwasserstoffgemischen gezeigt. Hierbei konnte der Einfluss der Molekulargewichtsverteilung, Abb. 7.4, sowie von Additiven auf das genannte Quadrupel an Materialkonstanten gezeigt werden.

Darmstadt, im Mai 2019

Peter F. Pelz

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand auf Anregung von Professor Dr.-Ing. Peter F. Pelz während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fluidsystemtechnik der Technischen Universität Darmstadt. Die Forschungsfinanzierung wurde in zwei Projekten

- Experiment und Theorie: Untersuchung des molekularen Oberflächeneinflusses der tribologischen Partner auf das Strömungsverhalten im engen Dichtspalt (FKM-Nr. 17392 N/1)
- Einfluss von Molekülstruktur und Additiven auf die Gleitlänge in der hydrodynamischen Schmierung (FKM-Nr. 703410)

von dem Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. des VDMA getragen. An dieser Stelle möchte ich allen Danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Professor Dr.-Ing. Peter F. Pelz danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Betreuung und Diskussion. Die wissenschaftliche Betreuung und intensive Diskussion zu den Themen „Randbedingungen an festen Wänden“ und „Aktivierungsenergie für Wandgleiten“ waren für das Gelingen dieser Arbeit besonders wertvoll.

Professor Dr.-Ing. Edgar Dörsam danke ich für die Übernahme des Korreferats und für eine Diskussionsrunde mit den wissenschaftlichen Mitarbeitern seines Instituts, in der die Idee der zur Kalibration der kapazitiven Abstandssensoren mittels interferometrischer Schichtdickenmessung entstanden ist.

Dr.-Ing. Andreas Irmer danke ich für das Korrekturlesen der Arbeit, für das Überprüfen der analytischen Betrachtungen und für die wertvollen Diskussionen zur Strukturierung der Arbeit.

Ich danke den Teilnehmern des projektbegleitenden Arbeitskreis des VDMA Fachverband Fluidtechnik für die kontinuierliche Unterstützung und die fachliche Diskussion: Dipl.-Ing. P.-M. Synek (Fachverband Fluidtechnik), Dipl.-Ing. A. Gropp (Vorsitzender des Arbeitskreises), H. Jordan (stellv. Vorsitzender des Arbeitskreises), Dr.-Ing. M. Wilke, Dr. rer. nat. E. Freitag und Dipl.-Ing. G. Barillas.

Dipl.-Ing. K. Wombacher von der Firma Kolb & Baumann GmbH & Co. KG danke ich für die Fertigung der Spaltplatten, die wertvollen Diskussionen zu erreichbaren Formtoleranzen in der Feinbearbeitung und messtechnischen

VI

Fragestellungen. Seine Unterstützung ging weit über die übliche technische Beratung hinaus.

Dr.-Ing. N. G. Blume und M.Sc. J. Emmert danke ich für die Diskussion messtechnischer Fragestellungen und die wertvolle Unterstützung bei der Bestimmung der Messunsicherheit des Darmstädter Gleitlängentribometers. Professor Dr. rer.nat. A. Klein und M.Sc. A. Hubmann danke ich für die Unterstützung bei der Beschaffung der Indiumzinnoxidbeschichtung zur Kalibration der kapazitiven Abstandssensoren.

Ich danke allen Studenten, die mich mit ihren Bachelor- und Masterarbeiten und als wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützt haben: I. Dietrich, H. Hamel, F. Mihm, R. Robrecht, P. Rossow, M. Schmidt, T. Schmidt, N. Schmidt-Rose, D. Schuchmann. Mein besonderer Dank gilt meinem ehemaligen Kollegen Nils Preuß, der mich kontinuierlich über einen Zeitraum von vier Jahren als wissenschaftliche Hilfskraft und mit Bachelor- und Masterarbeit unterstützt hat.

Ich danke meinen ehemaligen BürokollegInnen Dipl.-Ing. Angela Antoine und Dr.-Ing. Philipp Hedrich für die gemeinsame Zeit und die ausgezeichnete Zusammenarbeit bei gemeinsamen Projekten. M.Sc. Maximilian Kuhr danke ich für die Zusammenarbeit bei gemeinsamen Konferenzbeiträgen zum Thema Wandgleiten an einem Gleitschuh. Dr.-Ing. G. Ludwig danke ich für die konstruktiven Diskussionen zur Umsetzung des Darmstädter Gleitlängentribometers in die Konstruktion. Der mechanischen Werkstatt des Instituts für Fluidsystemtechnik danke ich für die Fertigung der verschiedenen Ausbaustufen des Gleitlängentribometers und die wertvollen Diskussionen auf dem Weg hin zur finalen Konstruktion. Ich danke allen ehemaligen Kollegen, die mich in meiner Zeit am Institut begleitet haben, für die gemeinsame Zeit.

Mein besonderer Dank gilt meinen Familienmitgliedern, die mich auf meinem Weg immer unterstützt haben. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

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

Darmstadt, im Januar 2019
Tobias Corneli

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Randbedingung an festen Wänden	6
2.1	Kinematische und dynamische Randbedingung	7
2.2	Naviers dynamische Gleitrandbedingung	9
2.3	Reynoldssche Gleichung der Schmiertheorie bei Wandgleiten .	12
3	Lokale und integrale Verfahren zur Messung der Gleitlänge	16
3.1	Motivation zur Entwicklung des Darmstädter Gleitlängentri- bometers	16
3.2	Gebräuchliche Gleitlängenmessverfahren	18
3.3	Einteilung der Gleitlängenmessverfahren in lokale und inte- grale Verfahren	24
4	Darmstädter Gleitlängentribometer	26
4.1	Messprinzip	27
4.2	Ablauf einer Messung	30
4.3	Ergebnisse der Gleitlängenmessung	33
5	Konstruktion des Darmstädter Gleitlängentribometers	36
5.1	Konstruktive Umsetzung des Messprinzips	38
5.2	Konstruktion des Tribometers und Lösung der grundlegenden Entwicklungsherausforderungen	40
5.2.1	Realisierung des ebenen Spalts	41
5.2.2	Realisierung der Spalthöheneinstellung	42
5.2.3	Realisierung reproduzierbarer Versuchsbedingungen . .	45
6	Quantifizierung und Beherrschung der Messunsicherheit	49
6.1	Bestimmung der Messunsicherheit	50
6.2	Vergleich der Messunsicherheit des Darmstädter Gleitlängen- tribometers mit anderen Gleitlängenmesssystemen	55

6.3	Technologische Beherrschung der Messunsicherheiten	57
6.3.1	Beherrschung der statistischen Messunsicherheit des reziproken Moments	58
6.3.2	Technologische Beherrschung der systematischen Messunsicherheit der Momentmessung	59
6.3.3	Technologische Beherrschung der systematischen Messunsicherheit der Spalthöhenmessung	61
7	Aktivierungsenergie für Wandgleiten	67
7.1	Arrhenius-Beziehung für Wandgleiten	70
7.2	Validierung des Modells	73
7.3	Einfluss von Molekülstruktur und Additivierung auf die Gleitlänge	75
8	Anwendung der Gleitrandbedingung auf einen Gleitschuh	79
8.1	Analytische Lösung der verallgemeinerten Reynoldsschen Gleichung für einen Gleitschuh	80
8.2	Ergebnisse	82
9	Zusammenfassung und Ausblick	88
	Literatur	93
	Anhang	99
A	Verallg. Schmierfilmgleichung bei bewegter unterer Wand	101
B	Grundlagen Oberflächenrauheit	105
C	Messprinzip	108
D	Linearität des reziproken Moments	109
E	Druckverteilung im Schmierpalt	112
F	Tribometerentwicklung, zusätzliche Grafiken	115

G	Das Temperaturfeld im Spalt	119
H	Messtechnik	128
H.1	Bestimmung der Gleitlänge nach der Summe der kleinsten Fehlerquadrate	128
H.2	Partielle Ableitungen	129
H.3	Vergleich der Streuungen	130
H.4	Unsicherheitsfortpflanzung	131
H.5	Kalibration des Abstandssensors	133

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), Temperatur (Θ) und Stoffmenge (N).

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Dimension
A	präexponentieller Faktor der Arrhenius-Beziehung	T^{-1}
a	Achsenabschnitt der Geradengleichung	
b	Steigung der Geradengleichung	
C	Kurve	L
C_1, C_2	Integrationskonstanten	
c	spezifische Wärmekapazität	$L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
D/Dt	Materielle Ableitung	
dA	Flächeninkrement	L^2
\mathbf{E}	Deformationsgeschwindigkeitstensor	T^{-1}
E	Aktivierungsenergie	$L^2 M T^{-2} N^{-1}$
E	Elastizitätsmodul	$L^{-1} M T^{-2}$
\vec{e}_n	Einheitsvektor	
F	implizite geometrische Darstellung der Wand	L
F	Kraftbetrag	$L M T^{-2}$
F	Tragkraft pro Tiefeneinheit	$M T^{-2}$
f	Rotationsfrequenz	T^{-1}
$fn(\)$	Funktion, funktionale Abhängigkeit	
h	Spalthöhe	L
\bar{h}	Mittelwert der Spalthöhe	L
\bar{h}	Spalthöhe am Ort des Druckmaximums	L
\dot{h}	Zeitliche Änderung der Spalthöhe	$L T^{-1}$
I	Flächenträgheitsmoment	L^4
$i, j, k, l,$	Indizes	
\mathbf{J}	Jakobimatrix	
k	Federkonstante	$M T^{-2}$
\mathbf{k}, k	Grenzflächenreibungskoeffizient	$L^{-2} M T^{-1}$
k	Rate eines molekularen Prozesses	T^{-1}

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Dimension
k	Sinkgeschwindigkeit	$L T^{-1}$
k_B	Boltzmann Konstante	$L^2 M T^{-2} \Theta^{-1}$
l_n	Gesamtmessstrecke Rauheitsmessung	L
l_r	Einzelmessstrecke Rauheitsmessung	L
l_t	Taststrecke Rauheitsmessung	L
M	Moment	$L^2 M T^{-2}$
M_D	Driftmoment pro Zeiteinheit des piezoelektrischen Momentsensors	$L^2 M T^{-3}$
\overline{M}	Mittelwert des Moment	$L^2 M T^{-2}$
\overline{M}	mittlere molare Masse	$M N^{-1}$
m	charakteristische molekulare Masse	M
m, n, p, r	Indexgrenzen	
\vec{n}	Normalenvektor	
n	Wiederholungsanzahl	
\mathbf{P}	Reibspannungstensor	$L^{-1} M T^{-2}$
p	Druck	$L^{-1} M T^{-2}$
Q	Volumenstrom	$L^3 T^{-1}$
\dot{Q}	Wärmestrom	$L^2 M T^{-2}$
q	Volumenstrom pro Tiefeneinheit	$L^2 T^{-1}$
R	Radius, äußerer Spaltplattenradius	L
\mathcal{R}	universelle Gaskonstante	$L^2 M T^{-2} \Theta^{-1} N^{-1}$
R_1	innerer Spaltplattenradius	L
R_a	arithmetischer Mittenrauwert	L
R_{krit}	kritischer Radius	L
R_{max}	maximale Rautiefe	L
R_S	Radius der Spitze des Spitzenlagers	L
R_z	gemittelte Rautiefe	L
r	radiale Koordinate	L
s	empirische Standardabweichung von der Dimension der jeweiligen Größe	
T	absolute Temperatur	Θ
\overline{T}	volumengemittelte absolute Temperatur	Θ
t	Zeit	T
U	Geschwindigkeit	$L T^{-1}$
\vec{U}, \vec{u}	Geschwindigkeitsvektor	$L T^{-1}$

Lateinische Symbole

Symbol	Beschreibung	Dimension
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten in kartesischen Koordinaten	$L T^{-1}$
u_G	Gleitgeschwindigkeit	$L T^{-1}$
u_r, u_φ, u_z	Geschwindigkeitskomponenten in Zylinderkoordinaten	$L T^{-1}$
\mathbf{V}	Kovarianzmatrix	
V	Volumen	L^3
w	molare Massenverteilung	
x, y, z	kartesische Koordinatenrichtungen	L
\bar{x}	Ort des Druckmaximums	L
z	axiale Koordinate	L

Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Dimension
$\dot{\gamma}$	Scherrate	T^{-1}
δ	Messunsicherheit von der Dimension der betrachteten Messgröße	
δ_{ij}	Kronecker Delta	
δx_S	systematische Messunsicherheit des Abstandssensors	L
δx_D	systematische Messunsicherheit der Spaltplatte (Fertigungstoleranz)	L
ϵ	charakteristische molekulare Energie	$L^2 M T^{-2}$
ϵ_r	stoffabhängige relative Permittivität	
θ	Temperatur in Grad Celsius	Θ
λ	Gleitlänge	L
λ	Wärmeleitfähigkeit	$L M T^{-3} \Theta^{-1}$
μ	dynamische Viskosität	$L^{-1} M T^{-1}$
ν	kinematische Viskosität	$L^2 T^{-1}$
ρ	Dichte	$L^{-3} M$
σ	charakteristische molekulare Länge	L
τ	Schubspannung	$L^{-1} M T^{-2}$
ϕ	Dissipationsfunktion	$L^{-1} M T^{-3}$
$\bar{\phi}$	flächenspezifische Dissipationsrate	$M T^{-3}$
φ	Umfangskoordinate	
χ	Messgröße	
ψ	Messgröße	
Ω	Winkelgeschwindigkeit	T^{-1}

Indices

Index	Beschreibung	Index	Beschreibung
a	außen	i	innen
MAX	Maximum	MIN	Minimum
o	oben	u	unten
SOLL	soll	w	Wand
λ	Gleiten	μ	Scheren
0	Referenzzustand	1	Eintritt
1	innerer Ring	2	äußerer Ring
p	polar	krit	kritisch
95%	Mittelwert des 95%-Konfidenzintervalls (statistische Angabe)		

Dimensionslose Produkte

Symbol	Beschreibung
a	Temperatur-Verschiebungsfaktor
α	Neigungswinkel
p^+	dimensionsloser Zuführdruck
Pe	Péclet-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
R	Bestimmtheitsmaß der linearen Regression (Kapitel 4.3)
r^+	dimensionsloser Radius (Anhang G)
r^*	dimensionslose Länge (Kapitel 7)
So	Sommerfeld-Zahl
T^+	dimensionslose Temperatur (Anhang G)
T^*	dimensionslose Temperatur (Kapitel 7)
u_r^+	dimensionslose Radialgeschwindigkeit
u_φ^+	dimensionslose Umfangsgeschwindigkeit
z^+	dimensionslose axiale Koordinate
ψ^+	dimensionslose Spalthöhe

Abkürzungen**Symbol Beschreibung**

AFM	Atomic Force Microscope
DGLT	Darmstädter Gleitlängentribometer
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSFA	Direct Surface Force Apparatus
FRAP	Fluorescence Recovery after Photobleaching
PIV	Particle Image Velocimetry
SFA	Surface Force Apparatus