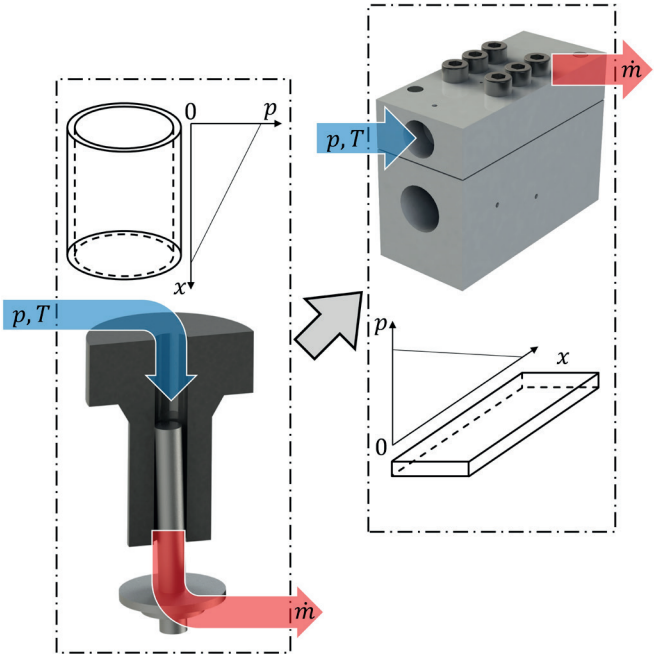
Reihe
Fluidtechnik

Felix Fischer

Thermoelastohydrodynamische Betrachtung des Kolben-Buchse-Kontakts in Hochdruckpumpen



THERMOELASTOHYDRODYNAMISCHE BETRACHTUNG DES KOLBEN-BUCHSE-KONTAKTS IN HOCHDRUCKPUMPEN

Thermoelastohydrodynamic Consideration of the Piston/Cylinder Contact in High-Pressure Pumps

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Felix Lukas Fischer geb. Mühlenberg

Berichter: Universitätsprofessorin Dr.-Ing. K. Schmitz
Universitätsprofessor Dr.-Ing. A. Rienäcker

Tag der mündlichen Prüfung: 24.06.2020

Reihe Fluidtechnik

D / Band 105

Felix Lukas Fischer

Thermoelastohydrodynamische Betrachtung des sKolben-Buchse-Kontakts in Hochdruckpumpen

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 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 978-3-8440-7794-0
ISSN 1437-8434

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

„*There's nothing in this universe that can't be explained. Eventually*.”

Gregory House, M. D.

House M. D.,
Staffel 2, Folge 19:
„*House vs. God*”, 2006

VORWORT UND DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für fluidtechnische Antriebe und Systeme (ifas). Für die umfassende Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen danke ich meiner Doktormutter und Institutsleiterin Frau Prof. Katharina Schmitz. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Adrian Rienäcker zum einen für die Übernahme des Koreferats und zum anderen für die fruchtbaren Diskussionen während des Forschungsprojekts danken. Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Herrn Prof. Klaus Radermacher. Für die fachliche Unterstützung danke ich Dr.-Ing. Uwe Reuter, Dr.-Ing. David van Bebber sowie Ömer Özdemir und Dr.-Ing. Dirk Jaitner. Für die Begleitung in meinen ersten Jahren am ifas danke ich Herrn Prof. Hubertus Murrenhoff.

Ohne die vielen Kollegen am ifas wäre die vorliegende Arbeit sicher nicht entstanden. Besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen Roland Walden, Stephan Wegner, Raphael Alt und Sebastian Deuster sowie meinem Mitbewohner, stetigem Ansprechpartner und Korrekturleser Tobias Mielke. Stefan Heitzig danke ich dafür, dass er mich initial für das ifas begeisterte. Außerdem möchte ich Markus Gärtner und Marius Hofmeister für die Durchsicht meiner Arbeit danken. Für die netten Abende, ausartenden Diskussionen und die Motivation danke ich Filipp Kratschun, Stefan Aengenheister, Tobias Pietrzyk und Achill Holzer. Die leckeren Mahlzeiten und illustren Gesprächsrunden am Mittagstisch mit Stephan Merkelbach, Marcel Rückert, Alexander Weinebeck, Florian Schoemacker, Gunnar Matthiesen und Maximilian Waerder versüßten mir den Institutsalltag. Den Festangestellten des ifas, insbesondere Jutta Zacharias, Dr.-Ing. Olivier Reinertz, Klaus Breuer, Dirk Kochs sowie Horst Wingens, möchte ich für die fortwährende Unterstützung und die fachlichen Ratschläge danken. Ferner möchte ich mich bei zahlreichen Hiwis und studentischen Mitarbeitern bedanken. Stellvertretend sind hier Zita Tappeiner, Benedict Kössendrup, Teiwen Fehse, Andreas Rhein, Julian Bartz und die Pumpenjungs zu nennen.

Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung während des Studiums. Meiner Freundin Ayla gebührt besonderer Dank für das Verständnis, die Geduld und die fortwährende Unterstützung in allen Lebens- und Arbeitsbereichen. Zu guter Letzt danke ich meiner Tochter Klara für die aufmunternden Ablenkungen zu allen (un)möglichen Zeiten.

Münster (Westf.), im Dezember 2020 Felix Lukas Fischer

ZUSAMMENFASSUNG

Die globale Herausforderung an die Senkung des CO_2-Ausstoßes im Verkehrssektor und die immer strengere Abgasgesetzgebung für Otto- und Dieselmotoren hat für die Peripherie der Verbrennungskraftmaschine mannigfaltige und grundlegende Auswirkungen. Bei modernen Dieselmotoren, die von einem Common-Rail-System gespeist werden, besteht die Notwendigkeit, dass der Kraftstoff möglichst fein zerstäubt wird. Eine Möglichkeit dies zu erreichen besteht in der Erhöhung des Einspritzdrucks. Bei der Common-Rail-Hochdruckpumpe unterliegt der Kolben-Buchse-Kontakt daher einer immer größeren Belastung. Der Dichtspalt zwischen Kolben und Buchse, der in der Größenordnung einiger Mikrometer liegt, muss den hohen Raildruck von bis zu 3.000 bar abdichten. Die Temperaturerhöhung, die der Kraftstoff im Dichtspalt erfährt, führt zu einer Verformung von Kolben und Buchse sowie einer Verschlechterung des Wirkungsgrads der Pumpe durch erhöhte Leckage. Die numerische Abbildung des kritischen Kolben-Buchse-Kontakts in der Hochdruckpumpe muss zur Auslegung zuverlässig durchgeführt werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Mikrospaltprüfstand entwickelt und erprobt, der die Validierung der TEHD-Simulation auf einem abstrahierten Level ermöglicht. Dafür wird zunächst eine Konzeptstudie für die verschiedenen Abstraktionsstufen der tribologischen Prüfkette durchgeführt sowie die Anforderungen für einen solchen Mikrospaltprüfstand ermittelt. Im Anschluss daran wird ein Entwurf vorgestellt und gefertigt. Die besonderen Randbedingungen und Sensitivitäten der Prüfstandsentwicklung werden dabei diskutiert. Der Funktionsnachweis des Mikrospaltprüfstands erfolgt bei bis zu 3.000 bar Betriebsdruck. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird nachgewiesen und die Charakteristika des Hochdruck-Mikrospalts beschrieben. Abschließend wird eine Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse durchgeführt.

Anhand einer TEHD-Simulation werden die wichtigsten physikalischen Effekte im Mikrospalt identifiziert und diskutiert. Die weiterführende Analyse beinhaltet spezielle Effekte des vorliegenden Tribokontakts. Weiterhin wird die Eignung des Mikrospalts zur Validierung eines kommerziellen TEHD-Tools diskutiert. Zur Schließung der tribologischen Prüfkette werden schlussendlich zwei weitere Abstraktionsstufen experimentell erschlossen und die Ergebnisse der Mikrospaltversuche auf diese Ebenen übertragen.

ABSTRACT

The global challenge of reducing CO_2 emissions in the transport sector and the ever stricter exhaust gas legislation for gasoline and diesel engines has manifold and fundamental effects on the periphery of the internal combustion engine. In modern diesel engines, which are powered by a common rail system, there is a need for the fuel to be atomized as finely as possible. One way to achieve this is to increase the injection pressure. In the common rail high pressure pump, the piston/cylinder contact is therefore subject to an increasing load. The sealing gap between piston and cylinder, which is in the order of a few micrometers, must seal the high rail pressure of up to 3.000 bar. The temperature increase that the fuel in the sealing gap experiences leads to a deformation of piston and cylinder as well as a deterioration of the efficiency of the pump due to increased leakage. The numerical mapping of the critical piston/cylinder contact in the high pressure pump must be able to be carried out safely for the design.

In the present work a microgap test rig is developed and tested, which allows the validation of this calculation on an abstracted level. Therefore, a concept study for the different abstraction levels of the tribological test chain is carried out and the requirements for such a microgap test rig are determined. In the following a design is presented and manufactured. The special boundary conditions and sensitivities of the test stand development are discussed. The functional verification of the microgap test stand is carried out with up to 3.000 bar operating pressure. The reproducibility of the results is proven and the characteristics of the high pressure microgap are described. A sensitivity and robustness analysis is then performed.

Using a TEHL simulation, the most important physical effects in the microgap are identified and discussed. The further analysis includes special effects of the present tribocontact. Furthermore, the suitability of the microgap for the validation of a commercial TEHL tool is discussed. To close the tribological test chain, two further levels of abstraction will be developed experimentally and the results of the microgap tests will be transferred to these levels.

INHALT

1 EINLEITUNG: MOTIVATION, ZIEL UND AUFBAU DER ARBEIT 1

1.1 Ziel der Arbeit 3

1.2 Aufbau der Arbeit 4

2 STAND DER TECHNIK 7

2.1 Tribologie 7

2.2 TEHD-Simulationen 9

2.3 Der Kolben-Buchse-Kontakt 12

2.3.1 Hydraulikpumpen unter 500 bar Förderdruck 13

2.3.2 Hydraulikpumpen über 500 bar Förderdruck 24

2.4 Zusammenfassung des Standes der Technik 28

3 ENTWICKLUNG DES MIKROSPALTPRÜFSTANDS 31

3.1 Abstraktion am Beispiel des Kolben-Buchse-Kontakts 31

3.2 Anforderungen an einen Modellprüfstand 34

3.3 Konzepte 40

3.4 Konzeptauswahl 43

3.5 Finaler Entwurf 46

3.6 Hochdruckdichtung 51

3.7 Fertigung, Montage und Sensorik 53

3.8 Prüffluid 58

3.8.1 Dichte 59

3.8.2 Schallgeschwindigkeit und Kompressibilität 59

3.8.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität 62

3.8.4 Viskosität 64

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM MIKROSPALTPRÜFSTAND . 65

4.1 Prüfstandsaufbau 65

4.2 Funktionsnachweis bis 2.000 bar 66

4.3 Sensitivitätsuntersuchungen 71

4.4 Messungen bis 3.000 bar 76

4.5 Zwischenfazit 80

5 NUMERISCHE UNTERSUCHUNG DES MIKROSPALTPRÜFSTANDS 81
5.1 Beschreibung der Strömung 81
5.2 Beschreibung der Thermik im Fluid 83
5.3 Beschreibung der Thermik im Festkörper 86
5.4 Verformung des Festkörpers 88
5.5 Diskretisierung 89
5.6 Aufbau der Simulation 91
5.7 Ergebnisse und Diskussion 94
5.7.1 Fall 1: Strömung mit Festkörperwärmestrom und mit konstanter Spalthöhe 94
5.7.2 Fall 2: Strömung mit Festkörperwärmestrom mit variabler Spalthöhe 96
5.7.3 Fall 3: Anpassung der Simulation 98
5.8 Vergleich der Ergebnisse mit TEHD-Simulationen in FIRST 99
5.9 Diskussion der Abweichungen 102
5.9.1 Trägheit 102
5.9.2 Strukturviskosität 107
5.10 Zwischenfazit 108
6 ÜBERTRAGUNG AUF DIE ANWENDUNG 110
6.1 Statischer Versuch mit einer Hochdruckpumpe 110
6.2 Versuche mit einem Pumpenprüfstand 115
6.3 Zwischenfazit 118
7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 120
8 LITERATURVERZEICHNIS 123
9 ANHANG 140
9.1 Überblick über den Stand der Technik 140
9.2 Werkstoffdaten des Hochdruckspalts 144
9.3 Sensordaten des Mikrospaltprüfstands 145
9.4 Abschätzung der Reynoldszahl im Mikrospalt 146
9.5 Dowson-Integrale für den vorliegenden Fall 147
9.6 Ähnlichkeitsgesetze des Wärmeübergangs im Mikrospalt 147
9.7 FVM Integration 148
9.8 Simulationsparameter 149
9.9 Sensordaten des Pumpenprüfstands 150

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Formelzeichen

A	Durchtrittsfläche	(m^2)
A_i	Grenzfläche, $i \mathrel{\hat{=}} e/n/s/w$	(m^2)
a_1	Parameter der Dichte-Temperatur-Druck-Gleichung	$(-)$
a_2	Parameter der Dichte-Temperatur-Druck-Gleichung	(bar)
a_3	Parameter der Dichte-Temperatur-Druck-Gleichung	$\left(\frac{\text{bar}}{\text{K}}\right)$
a_4	Parameter der Dichte-Temperatur-Druck-Gleichung	$\left(\frac{\text{bar}}{\text{K}^2}\right)$
a_5	Parameter der Dichte-Temperatur-Druck-Gleichung	$\left(\frac{\text{bar}}{\text{K}^3}\right)$
als	Parameter der Dichte-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{1}{\text{K}}\right)$
B	Parameter der Viskositäts-Temperatur-Gleichung	(°C)
b	Breite des Mikrospalts	(m)
C	Parameter der Viskositäts-Temperatur-Gleichung	(°C)
c_p	Spezifische isobare Wärmekapazität	$\left(\frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right)$
$\bar{c}_p$	Gemittelte spezifische isobare Wärmekapazität	$\left(\frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right)$
c_1	Parameter der Schallgeschwindigkeits-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
c_2	Parameter der Schallgeschwindigkeits-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{\text{m}}{\text{sK}}\right)$

c_3	Parameter der Schallgeschwindigkeits-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sK}^2}\right)$
$\dot{d}$	Geschwindigkeit	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
$\ddot{d}$	Beschleunigung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right)$
d_{th}	Thermische Verformung	(m)
d_1	Fittingparameter	$\left(\frac{1}{\mathrm{mm}^2}\right)$
d_2	Fittingparameter	$\left(\frac{1}{\mathrm{mm}}\right)$
d_3	Fittingparameter	$(-)$
d_4	Fittingparameter	(mm)
E	Systemenergie	(J)
E_M	Massenenergie	(J)
F	Lastvektor	(N)
F_A	Antriebskraft	(N)
F_N	Normalkraft	(N)
F_R	Reibkraft	(N)
$f_{m,x}$	Volumenkraft	(N)
g	Erdbeschleunigung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\right)$
Gr	Grashof-Zahl	$(-)$
h	Schmierspalthöhe	(m)
J_0	Dowson-Integral	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{Pas}}\right)$
J_1	Dowson-Integral	$\left(\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{Pas}}\right)$
J_2	Dowson-Integral	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{Pas}}\right)$

J_3	Dowson-Integral	$\left(\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{Pas}}\right)$
J_4	Dowson-Integral	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{Pas}}\right)$
$\boldsymbol{K}$	Steifigkeitsmatrix	$\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}\right)$
$\boldsymbol{K}^{-1}{}_{th}$	Invertierte thermische Steifigkeitsmatrix	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{K}}\right)$
k_1	Parameter der Wärmeleitfähigkeits-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{\sqrt{\mathrm{GPa}}\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}\sqrt[6]{\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}}\right)$
k_2	Parameter der Wärmeleitfähigkeits-Temperatur-Gleichung	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}^2}\right)$
k_3	Parameter der Wärmeleitfähigkeits-Druck-Gleichung	$\left(\frac{\mathrm{Wm}^2}{\mathrm{kgK}}\right)$
L	Charakteristische Länge	(m)
l	Spaltlänge Zulaufloch-Ablaufloch	(m)
l_{Spalt}	Spaltlänge des Kolben-Buchse-Kontakts in der Hochdruckpumpe	(m)
$\boldsymbol{M}$	Massenmatrix	(kg)
M_{an}	Antriebsmoment	(Nm)
$\dot{m}$	Massenstrom	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\right)$
$\dot{m}_{Exp.}$	Massenstrom aus Experiment	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\right)$
$\dot{m}_{Sim.,i}$	Massenstrom aus Simulation	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\right)$
$\hat{n}$	Flussrichtungsnormale, allg.	$(-)$
n_{an}	Antriebsdrehzahl	$\left(\frac{1}{\mathrm{min}}\right)$
$\hat{n}_i$	Flussrichtungsnormale, $i \mathrel{\hat{=}} e/n/s/w$	$(-)$
n_{Pumpe}	Pumpendrehzahl	$\left(\frac{1}{\mathrm{min}}\right)$

Nu	Nusselt-Zahl	$(-)$
p	Druck	(bar)
p_A	Druck an Messstelle A	(bar)
$p_{abs.,Umgebung}$	Absoluter Umgebungsdruck	(bar)
p_{aus}	Ausgangsdruck am Spalt	(bar)
p_B	Druck an Messstelle B	(bar)
p_C	Druck an Messstelle C	(bar)
p_{ein}	Eingangsdruck am Spalt	(bar)
p_{HD}	Hochdruck	(bar)
p_{ND}	Niederdruck	(bar)
p_{Rail}	Raildruck	(bar)
p_{Spalt}	Spaltdruck	(bar)
p_0	Bezugsdruck	(bar)
Pe	Péclet-Zahl	$(-)$
Pr	Prandtl-Zahl	$(-)$
Q	Wärme	(J)
Q_{aus}	Austretender Volumenstrom	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right)$
$Q_{Ges.}$	Gesamtvolumenstrom	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right)$
Q_{Rail}	Railvolumenstrom	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right)$
$Q_{Ref.}$	Referenzvolumenstrom	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right)$
$\dot{Q}_s$	Wärmestrahlung chemische Prozesse	(W)
$\dot{Q}_w$	Konvektiv abgeführter Wärmestrom	(W)
Q_ϕ	Quellterm	$(-)$

$\dot{q}$	Wärmestromdichte	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}\right)$
Re	Reynoldszahl	$(-)$
rs	Parameter der Dichte-Temperatur Gleichung	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$
T	Temperatur	(°C)
T_A	Temperatur an Messstelle A	(°C)
T_{aus}	Austrittstemperatur	(°C)
$T_{außen,i}$	Oberflächentemperatur des Mikrospalts	(°C)
T_B	Temperatur an Messstelle B	(°C)
T_C	Temperatur an Messstelle C	(°C)
T_{ein}	Eintrittstemperatur	(°C)
T_{ND}	Temperatur im Niederdruck	(°C)
T_{Spalt}	Spalttemperatur	(°C)
T_{Tank}	Tanktemperatur	(°C)
T_W	Wandtemperatur	(°C)
T_0	Referenztemperatur	(°C)
T_∞	Fernfeldtemperatur	(°C)
t	Zeit	(s)
u	Geschwindigkeit in x-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
$\bar{u}$	Gemittelte Geschwindigkeit in x-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
$\underline{u}$	Allg. Strömungsfeld	$(-)$
u_{ein}	Eintrittsgeschwindigkeit	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
u_S	Schallgeschwindigkeit	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$

u_1, u_2	Geschwindigkeit der Gleitpartner in x-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
V	Volumen	(m^3)
v	Geschwindigkeit in y-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
$\bar{v}$	Gemittelte Geschwindigkeit in y-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
v_1, v_2	Geschwindigkeit der Gleitpartner in y-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
W	Arbeit	(Nm)
w	Geschwindigkeit in z-Richtung	$\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$
X	Generische Größe	$(-)$
$\bar{X}$	Gemittelte generische Größe	$(-)$
x	x-Richtung (Spaltlängenkoordinate)	(m)
y	y-Richtung	(m)
z	z-Richtung	(m)
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}\right)$
α_{oben}	Wärmeübergangskoeffizient der Oberseite des Mikrospalts	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}\right)$
α_{unten}	Wärmeübergangskoeffizient der Unterseite des Mikrospalts	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}\right)$
$\alpha_{vertikal}$	Wärmeübergangskoeffizient der Seitenfläche des Mikrospalts	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}}\right)$
α_{00}	Parameter der Viskositäts-Druck-Temperatur Gleichung (Barrus-Gleichung)	$\left(\frac{1}{\mathrm{bar}}\right)$

α_{01}	Parameter der Viskositäts-Druck-Temperatur Gleichung (Barrus-Gleichung)	$\left(\frac{1}{°C}\right)$
α_{10}	Parameter der Viskositäts-Druck-Temperatur Gleichung (Barrus-Gleichung)	$\left(\frac{1}{bar^2}\right)$
α_{11}	Parameter der Viskositäts-Druck-Temperatur Gleichung (Barrus-Gleichung)	$\left(\frac{1}{bar^2 °C}\right)$
β	Kompressibilität	$\left(\frac{1}{GPa}\right)$
β_s	Adiabatische Kompressibilität	$\left(\frac{1}{GPa}\right)$
β_T	Isotherme Kompressibilität	$\left(\frac{1}{GPa}\right)$
Γ	Diffusiver Anteil einer Erhaltungsgröße	$(-)$
γ	Wärmeausdehnungskoeffizient	$\left(\frac{1}{K}\right)$
$\dot{\gamma}$	Scherrate	$\left(\frac{1}{s}\right)$
ΔE	Änderung der Systemenergie	(J)
$\Delta\dot{m}_{Exp.}$	Massenstromdifferenz	$\left(\frac{kg}{s}\right)$
Δp	Druckdifferenz	(bar)
Δp_{NSG}	Druckdifferenz, berechnet mit reduzierter Navier-Stokes-Gleichung	(bar)
Δp_{RE}	Druckdifferenz, berechnet mit Reynoldsgleichung	(bar)
Δx	Schrittweite (Spaltlänge)	(m)
Δz	Schrittweite (Spalthöhe)	(m)
$\Delta\vartheta$	Übertemperaturdifferenz	(K)
η	Dynamische Viskosität	(Pas)
$\bar{\eta}$	Gemittelte dynamische Viskosität	(Pas)
η_A	Dynamische Viskosität am Punkt A	(Pas)

η_{aus}	Dynamische Viskosität am Ausgang des Spalts	(Pas)
η_1	Parameter der Viskositäts-Scherraten-Gleichung	(Pas)
θ, ϑ	Übertemperatur	(K)
$\bar{\vartheta}$	Gemittelte Fluidtemperatur	(K)
ϑ_i	Temperaturstützpunkte	(K)
ϑ_F	Fluidtemperatur	(K)
ϑ_W	Wandtemperatur	(K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}\right)$
$\lambda_{Gegenkörper}$	Wärmeleitfähigkeit des Gegenkörpers	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}\right)$
$\lambda_{Grundkörper}$	Wärmeleitfähigkeit des Grundkörpers	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}\right)$
λ_i	Raumrichtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit	$\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{mK}}\right)$
μ	Reibkoeffizient	$(-)$
ν	Kinematische Viskosität	$\left(\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}}\right)$
ρ	Dichte	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$
$\bar{\rho}$	Gemittelte Dichte	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$
ρ_A	Dichte am Punkt A	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$
ρ_{aus}	Dichte am Ausgang des Spalts	$\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$
τ_0	Parameter der Viskositäts-Scherraten-Gleichung	$\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}\right)$
υ	Spezifisches Volumen	$\left(\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}\right)$

Φ	Dissipationsfunktion	$\left(\frac{1}{s^2}\right)$
ϕ	Erhaltungsfunktion	$(-)$
ϕ_i	Konv. und diff. Fluss, $i \mathrel{\hat{=}} e/n/s/w$	$(-)$
$\varphi_{u_{ein}}$	Verhältnis der Druckdifferenzen bei gleicher Einströmgeschwindigkeit	$(-)$

Abkürzungen

CFD	Computational fluid dynamics
CR	Common-Rail
DBV	Druckbegrenzungsventil
EHD	Elastohydrodynamisch
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
KV	Kontrollvolumen
NSG	Navier-Stokes-Gleichungen
OT	Oberer Totpunkt
PVD	Physical vapour deposition
REM	Randelemente-Methode
TEHD	Thermoelastohydrodynamisch
UT	Unterer Totpunkt
ZrC_g	Zirkoniumkarbidschicht, gradiert