

AUTOREN



Dipl.-Ing. Ömer Özdemir
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Maschinenelemente und Tribologie der Universität Kassel.



Prof. Dr.-Ing. Adrian Rienäcker
ist Leiter des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik, Maschinenelemente und Tribologie der Universität Kassel.



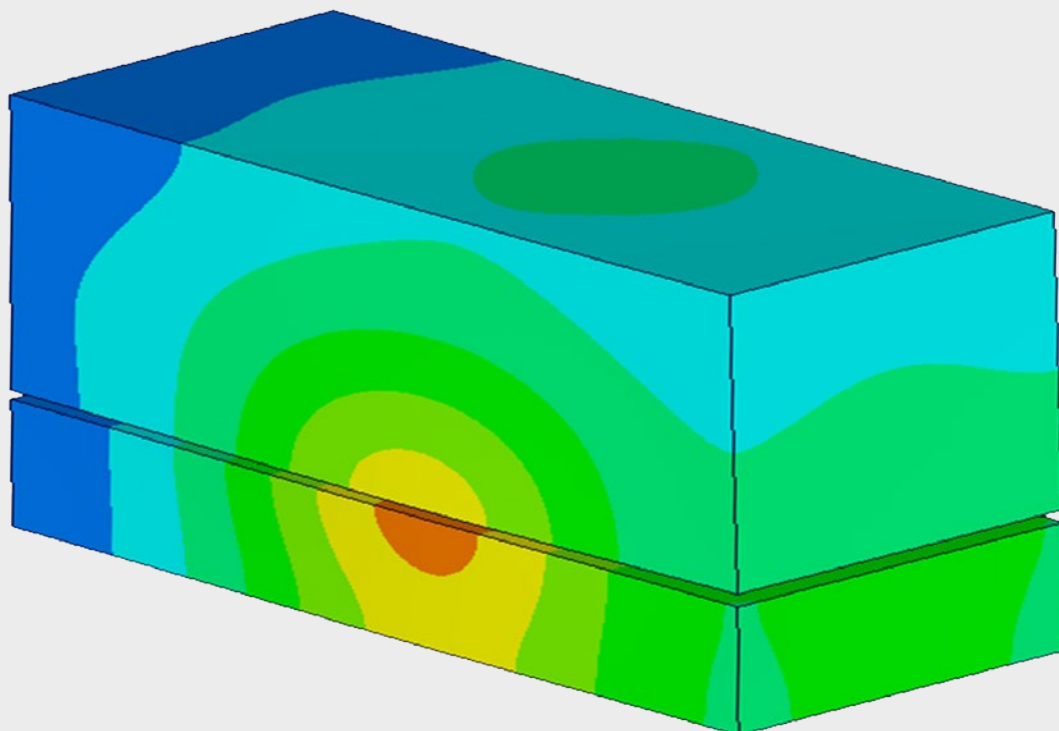
Felix Fischer, M. Sc.
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen.



Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
ist Leiter des Instituts für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen.

Thermo-Elastohydrodynamik des Kolben-Buchse-Kontakts von Hochdruckpumpen

Ein Anstieg des Raildrucks in Common-Rail-Systemen von aktuell 2500 auf 3000 bar ist aufgrund schärferer Abgasgesetze zu erwarten. Im Rahmen des FVV-Forschungsprojekts Diesel 3000 bar wurden an der Universität Kassel und der RWTH Aachen Grundlagen für die Auslegung des Kolben-Buchse-Kontakts von Common-Rail-Pumpen bei hohen Drücken erarbeitet. Dazu wurden in einem Flachspalt Druck- und Temperaturmessungen durchgeführt und mit den Ergebnissen eines thermo-elastohydrodynamischen Simulationsmodells abgeglichen.



1	MOTIVATION
2	MIKROSPALTPRÜFSTAND
3	SIMULATION
4	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Zur Einhaltung immer schärferer Abgasgrenzwerte besteht das Bestreben, den Raildruck in Common-Rail-Systemen auf 3000 bar anzuheben. Dies erlaubt eine feinere Zerstäubung des Kraftstoffs und somit eine effizientere Verbrennung. Innerhalb des technischen Systems der Hochdruckpumpe ist bei einer Drucksteigerung der Kolben-Buchse-Kontakt auslegungskritisch [1]. Ein Druckabfall von solch einem hohen Niveau verursacht durch die Dissipation der Druckenergie hohe Temperaturgradienten im Spalt. Um diese Effekte genau untersuchen zu können, wurde in einem FVV-Forschungsprojekt zunächst der kritische Kolben-Buchse-Kontakt in einem abstrahierten Spaltprüfstand mit einem Flachspalt ohne Relativbewegung der Kontaktflächen sowohl messtechnisch als auch simulativ untersucht. Der Nachweis der validen Funktionalität des Thermo-Elastohydrodynamik (TEHD)-Modells und des Prüfstands beim Betrieb mit Drücken bis zu 1000 bar ist Gegenstand dieses Beitrags.

2 MIKROSPALTPRÜFSTAND

Der Spaltprüfstand soll die Geometrie des Kolben-Buchse-Kontakts möglichst genau und zuverlässig abbilden und gleichzeitig das Erfassen der lokalen Drücke und Temperaturen im tribologischen Kontakt sowie des Volumenstroms erlauben. Die Schwierigkeit besteht darin, die typischen Spaltmaße von nur wenigen Mikrometern und die hohen Drücke von bis zu 3000 bar einzustellen. Der Kolben-Buchse-Kontakt einer realen Hochdruck-Einspritz-

pumpe ist ein Rundspalt. Eine Fertigung eines solchen Rundspalts und die Instrumentierung mit Druck- und Temperatursensoren ist kaum realisierbar. Als eine zulässige, alternative Lösung bietet sich die Abwicklung vom Rund- auf den Flachspalt an, der im Projekt erarbeitet wurde. Bei einer Länge von 21 mm und einer Breite von 3 mm können Randeffekte vernachlässigt und die gewonnen Erkenntnisse auf den Rundspalt übertragen werden.

In **BILD 1** (links) ist der Rundspalt einer Hochdruckpumpe schematisch skizziert, zudem wird in **BILD 1** (rechts) gezeigt, wie durch die Abwicklung des Rundspalts der Flachspalt entsteht. Entlang der Spaltlänge werden die Drücke und Temperaturen an drei Stellen erfasst. Der Druck und die Temperatur A werden 1,5 mm hinter dem Spaltzulauf gemessen, Messstelle B ist 10,5 mm hinter dem Einlauf platziert und Messstelle C, symmetrisch zu A, nach 19,5 mm. Zum Einsatz kommen DMS-Drucksensoren und Thermoelemente. Damit ist es möglich, die wichtigen Effekte im Spalt zu erfassen. Im Auslass wird darüber hinaus der Volumenstrom erfasst, der als Leckage durch den Spalt fließt. Zudem werden im Zulauf der Eingangsdruck und die Zulauftemperatur gemessen und zusätzlich im Auslauf die Auslauftemperatur. Diese gemessenen Größen dienen weiterhin als Randbedingung für die Simulationsrechnungen. Für die Untersuchungen wurde das SRS Calibration Fluid CV [2] verwendet.

3 SIMULATION

Für die Bewertung des Systemverhaltens vom Spaltprüfstand ist die Wechselwirkung zwischen der Gehäusestruktur und dem Fluidfilm zu berücksichtigen. Am Institut für Antriebs- und Fahrzeugtechnik wurde entsprechend zum aufgebauten Spaltprüfstand ein thermo-elastohydrodynamisches Simulationsmodell mit dem Programm First erstellt, das in der Lage ist, sowohl die strukturellen als auch die hydrodynamischen Effekte aufzuzeigen. Für die Hydrodynamikberechnung im Spalt kommt die Reynoldssche Differenzialgleichung zum Einsatz, die es erlaubt, die Strömung im engen Spalt zweidimensional zu beschreiben. Hierbei werden die druckbedingten elastischen Spaltänderungen berücksichtigt. Diese haben ebenso eine Rückwirkung auf die Druck-

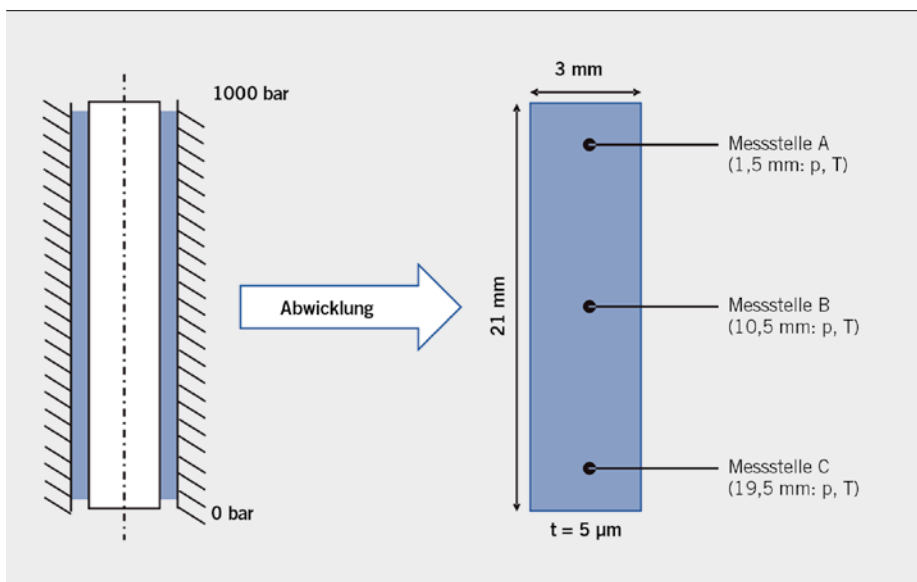


BILD 1 Funktionsprinzip des Flachspalts mit Messstellen entlang des Spalts (© Universität Kassel)

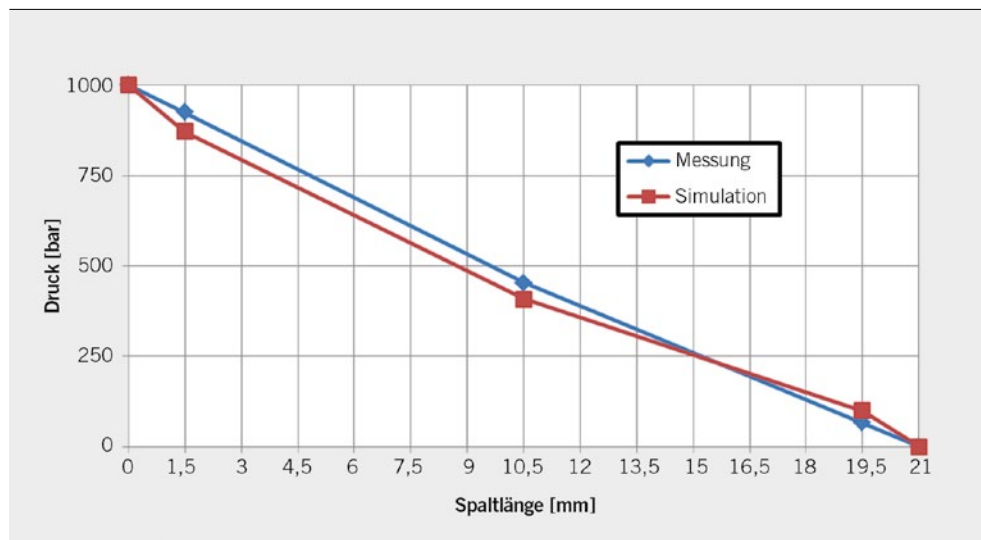


BILD 2 Druckverlauf über der Spaltlänge (© Universität Kassel)

berechnung. Beim Entspannen des Drucks über die gesamte Spaltlänge entsteht eine hohe Dissipationsenergie, die zu hohen Temperaturen im Schmierfilm und in den angrenzenden Körpern führt. Damit ist es notwendig, auch den Effekt der Temperatur im Gesamtsystem des Spaltprüfstands zu berücksichtigen. Dafür wird neben der Reynoldsschen Differenzialgleichung auch die Energiegleichung im Schmierfilm gelöst [3], die das thermische Gleichgewicht im System beschreiben kann. Zudem wird in der Simulation neben der Erwärmung des Schmierfilms aufgrund der Dissipationsenergie auch die Temperaturleitung im Festkörper mit thermischen Deformationen (Thermo-Elastohydrodynamik) berücksichtigt. Die maßgebliche Stoffgröße der Hydrodynamikberechnung ist die Viskosität, die in der TEHD-Simulation auch in Abhängigkeit der Temperatur in die Hydrodynamikberechnung fließt. Da am Spaltprüfstand das Fluidverhalten bei hohen Drücken untersucht wurde, fand in der TEHD-Simulation die Berücksichtigung der Druckabhängigkeit der Viskosität ebenfalls statt. Als Randbedingungen sind in der Hydrodynamikberechnung der Eingangsdruck,

die Eingangstemperatur sowie der Ausgangsdruck vorgegeben, die das Temperaturniveau im Schmierfilm und den Druckgradienten über der Spaltlänge festlegen. Da die direkte Spalteingangstemperatur nicht bekannt ist, wurden hier inverse Parameteridentifikationstechniken angewandt, um eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erzielen.

In BILD 2 ist der Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Drücken an den Messstellen am Spaltprüfstand bei einem Eintrittsdruck von 1000 bar dargestellt. Mit einer maximalen Abweichung von 53,6 bar an der Stelle von 1,5 mm im Spalt werden die gemessenen Drücke sehr gut getroffen.

Analog dazu ist in BILD 3 der Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten Temperaturen über der Spaltlänge dargestellt. Durch die Dissipationsenergie im Fluid erwärmt sich der Prüfstand und erreicht die höchsten Temperaturen von 64,68 °C in der Nähe des Spaltaustritts bei 19,5 mm. Mit einer maximalen Abweichung von 1,96 °C in der Nähe des Spalteintritts werden auch die gemessenen Temperaturen insgesamt sehr gut getroffen.

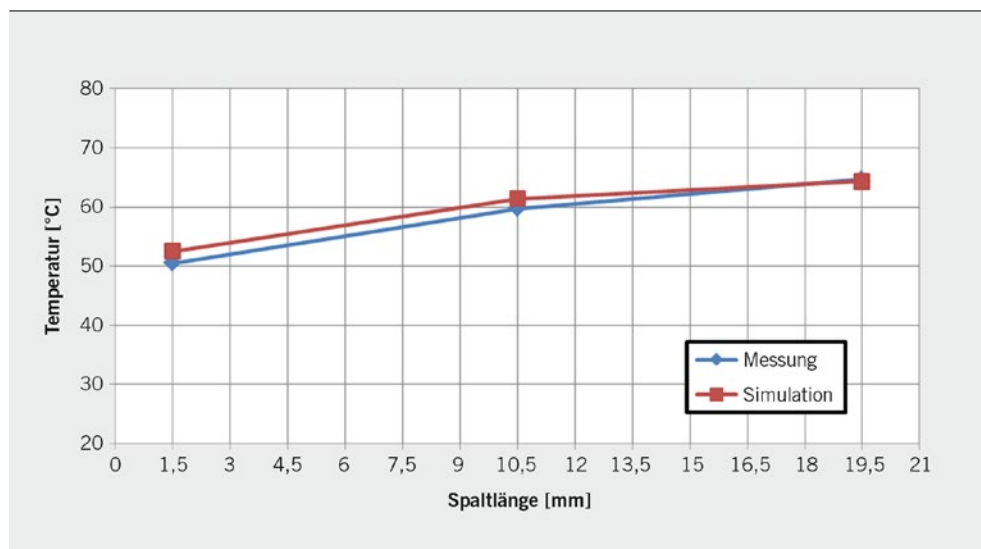


BILD 3 Temperaturverlauf über der Spaltlänge (© Universität Kassel)

Die mit dem TEHD-Simulationsmodell berechnete Leckage beträgt 0,044 l/min und weicht nur 1,17 % von der gemessenen Leckage ab. Es wurde zusätzlich eine entsprechende EHD-Simulation mit der konstanten Viskosität bei der Eintrittstemperatur durchgeführt, und die hierbei berechnete Leckage weicht um 28,85 % von der Messung ab. Durch diesen Vergleich wird die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Temperatureffekte im tribologischen Kontakt deutlich.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des FVV-Projekts Diesel 3000 bar wurde ein Spaltprüfstand aufgebaut, um den Kolben-Buchse-Kontakt von Common-Rail-Hochdruckpumpen abstrahiert in Form eines Flachspalts bei hohen Drücken zu untersuchen. Mithilfe umfangreicher Sensorik war die Erfassung lokaler Drücke und Temperaturen entlang des Spalts sowie die aufgetretene Leckage möglich. Um die Effekte im Spalt ort- und zeitaufgelöst darzustellen, wurde ein entsprechendes TEHD-Simulationsmodell vom Spaltprüfstand aufgebaut und mit den Messungen verglichen. Diese zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Drücke, Temperaturen sowie der Leckage und die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Temperatureinflüssen bei der Simulation von tribologischen Kontakten bei hohen Drücken.

Es sind weitere Veröffentlichungen zu Messungen und Simulationen am Mikrospaltpfstand bei extrem hohen Drücken von bis zu 3000 bar in Arbeit. Insbesondere der Abgleich der komplexen TEHD-Simulation mit dem Experiment soll hier diskutiert werden. Die ausführliche Beschreibung der Konzeption und Konstruktion des grundlagenorientierten Mikrospaltpfstands wird ebenfalls in einem weiteren Beitrag vorgestellt werden

LITERATURHINWEISE

- [1] Fischer, F.; Özdemir, Ö.: Erarbeitung der Grundlagen für die Auslegung von Hochdruckpumpen bis 3000 bar. FVV-Abschlussbericht 1143, 2017
- [2] Deutsches Institut für Normung e. V.: Prüföl für Diesel-Einspritzrüstung. Berlin: Beuth Verlag, 1990
- [3] Jaitner, D.: Effiziente Finite-Elemente-Lösung der Energiegleichung zur thermischen Berechnung tribologischer Kontakte. Universität Kassel, Dissertation, 2017

DANKE

Das Forschungsvorhaben Diesel 3000 bar (Vorhaben Nr. 18193 N/1) wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V. (AiF) (IGF-Nr. 18193 N) finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung und für die Betreuung durch den projektbegleitenden Arbeitskreis innerhalb der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV), der vom Obmann Dr. Uwe Reuter (Ford Forschungszentrum Aachen GmbH) geleitet wurde. Zudem bedanken sich die Autoren bei den ehemaligen Obmännern Dr. Clarence Longo, Claus Kappes sowie bei Dr. Dominik Jaitner und Rainer Walden, die an diesem Vorhaben mitgearbeitet haben.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com

NUTZEN SIE IHREN FACHBEITRAG

und platzieren Sie
Ihre Themen bei den
relevanten Zielgruppen!



WIR GESTALTEN FÜR SIE SONDERAUSGABEN PRINT ODER DIGITAL:

- für Ihre Messekommunikation
- Ihre Firmenevents
- Ihre Kundenkommunikation
- Ihre Produkteinführung
- Ihr Jubiläum

UNSER SERVICE:

- Beratung und Planung Ihrer individuellen Ausgabe
- Redaktionelle Bearbeitung Ihres Content
- Projektdurchführung
- Druck und Distribution

Sprechen Sie uns an!

Kontakt:

ATZextra Redaktion

Markus Bereszewski

Telefon: 0611 – 7878122

markus.bereszewski@springer.com

www.solutions.springerprofessional.de

ATZ