



Technische
Universität
Braunschweig



M. Eng. Rudolf Eberhardt Pape

Detaillierte CAE-Analyse des thermischen Verhaltens von Verbrennungsmotoren mit Schwerpunkt auf dem Motorwarmlauf

Berichte aus dem ivb | Band 37 | Braunschweig 2022

Detaillierte CAE-Analyse des thermischen Verhaltens von Verbrennungsmotoren mit Schwerpunkt auf dem Motorwarmlauf

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: M.Eng. Rudolf Eberhardt Pape
geboren in (Geburtsort): Minden (Westfalen)

eingereicht am: 09.12.2021
mündliche Prüfung am: 19.05.2022

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

2022

Berichte aus dem ivb

Band 37

Rudolf Eberhardt Pape

**Detaillierte CAE-Analyse des thermischen Verhaltens
von Verbrennungsmotoren mit Schwerpunkt
auf dem Motorwarmlauf**

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8703-1

ISSN 2364-3862

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

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit im Doktorandenprogramm der Volkswagen AG.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen an der Technischen Universität Braunschweig, für die Betreuung meiner Arbeit und die konstruktiven Diskussionen sowie hilfreichen Ratschläge. Zudem möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler, Leiter des Instituts für Thermodynamik an der Technischen Universität Braunschweig, für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danken.

Weiterhin möchte ich mich besonders bei Herrn Dr.-Ing. Matthieu Prouvier für die fachliche Betreuung meiner Arbeit sowie die vielen konstruktiven Diskussionen bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Axel Winkler, Dipl.-Ing. Peter Kawelke, Dr.-Ing. Martin Hofer, Dr.-Ing. Gwendal Lucas und Dr.-Ing. Paulo Ivan Urzua Torres sowie allen Kollegen bedanken, die mir stets mit hilfreichen Antworten auf meine Fragen zur Seite standen. Außerdem danke ich Dipl.-Ing. Kerstin Brandes für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Frau und meinen Eltern danken, die das Entstehen dieser Arbeit durch ihre Unterstützung überhaupt erst ermöglicht haben.

Braunschweig

Rudolf Eberhardt Pape

Abstract

The development of a modern internal combustion engine requires a sufficiently accurate prediction of its thermal behavior. More and more downsizing leads to higher mechanical and thermal loads while at the same time sufficient life time of the engine has to be ensured. In gasoline engines too hot combustion chamber walls can cause knocking combustion whereas too cold walls might increase wall film building and higher emissions of unburned hydrocarbons. Additionally, if warm up of the engine takes too long, friction losses due to too high oil viscosity are increased.

The objective of this thesis is the integration and extension of simulation processes which are already in use for single aspects of engine development into a predictive three dimensional model of the thermal behavior of a whole engine. Methods of computational fluid dynamics (CFD) are used in order to achieve knowledge of expectable component and coolant temperatures as soon as possible in the development process.

Two heat transfer mechanisms are of key importance for the simulated engine temperature field. For the validation of simulated heat transfer from the hot combustion gases to the combustion chamber walls pointwise and degree crankshaft resolved measurements of surface temperatures of the firedeck are used. The heat transfer between hot components and the coolant under boiling conditions is validated against literature. Afterwards the simulated stationary temperature field of the engine is compared to dedicated temperature field measurements on a test bench.

Since the simulation process, despite some simplifications, still has high computational costs, which has to be taken into account in an industrial application, a method for fast calculation of temperature fields for several operating points based on a single detailed simulation is shown. Additionally a transient model is set up and used to simulate a warm up of the engine over 300 s during a WLTC.

The simulation process developed in this thesis allows a robust and predictive simulation of the temperature field of a whole engine with a reasonable time requirement for application in an industrial development process.

Kurzfassung

In der Entwicklung eines modernen Verbrennungsmotors ist eine ausreichend genaue Vorhersage des zu erwartenden thermischen Verhaltens von wesentlicher Bedeutung. So führt zunehmendes Downsizing zu immer höheren mechanischen und thermischen Belastungen, gleichzeitig muss aber eine ausreichende Lebensdauer des Motors sichergestellt sein. Bei Ottomotoren können zu heiße Brennraumwände zu ungewollter Zündung der Ladung und damit zu Klopfen führen, wohingegen zu kalte Brennraumwände starke Wandfilmbildung und die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen begünstigen. Zusätzlich führen zu lange Aufheizzeiten zu vermehrten Reibungsverlusten durch höhere Ölviskosität.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Integration und Erweiterung von bereits im Einsatz befindlichen Simulationsprozessen für Einzelaspekte in der Motorenentwicklung zu einem prädiktiven dreidimensionalen Gesamtmodell für das thermische Verhalten eines Verbrennungsmotors. Dabei kommen Methoden der numerischen Strömungssimulation, auch als Computational Fluid Dynamics (CFD) bezeichnet, zum Einsatz, um möglichst früh im Entwicklungsprozess Aussagen über zu erwartende Bauteil- und Kühlmitteltemperaturen treffen zu können.

Zwei zentrale Wärmeübergänge bestimmen hauptsächlich das berechnete Temperaturfeld des Motors. Zur Validierung des Wärmeübergangs von der heißen Ladung an die Brennraumwand werden kurbelwinkelaufgelöste Messungen der Oberflächentemperaturen mehrerer Punkte am Brennraumdach eines vergleichbaren Motors verwendet. Der Wärmeübergang von heißen Bauteilen ans Kühlmittel mit auftretendem Kühlmittelsieden wird an Literaturbeispielen validiert. Für das anschließend berechnete stationäre Temperaturfeld des gesamten Motors wird ein Vergleich mit umfangreichen Temperaturfeldmessungen angestellt.

Da der Simulationsprozess trotz einiger Vereinfachungen sehr rechenintensiv ist, in der industriellen Anwendung aber immer auch der Faktor Zeit eine große Rolle spielt, wird im späteren Verlauf der Arbeit ein Ansatz vorgestellt, die Simulationsergebnisse bei verringertem Aufwand auf andere Betriebspunkte zu übertragen. Zudem wird ein transientes Modell aufgestellt und zur Berechnung der Verläufe der Bauteiltemperatur während eines Motorwarmlaufs im WLTC über 300 s angewendet.

Der in dieser Arbeit entwickelte Simulationsprozess erlaubt eine robuste prädiktive Berechnung dreidimensionaler Temperaturfelder von Verbrennungsmotoren mit für eine Anwendung im industriellen Umfeld vertretbarem Zeitaufwand.

Disclaimer

Ergebnisse, Schlüsse und Meinungen dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abstract	V
Kurzfassung	VII
Disclaimer	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XXI
Nomenklatur	XXIII
1. Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Versuchsmotor	2
1.3 Stand der Technik	4
1.4 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	12
1.5 Methode	13
1.6 Werkzeuge	21
2. Theoretische Grundlagen	27
2.1 Energiebilanz eines Verbrennungsmotors	27
2.2 Modellierung einer Fluidströmung	29
2.2.1 Die RANS-Gleichungen	29
2.2.2 Das k- ϵ Turbulenzmodell.....	31
2.3 Wandbehandlung	32
2.3.1 Zylinderinnenströmung in VECTIS	32
2.3.2 Kühlmittelströmung in VectisMax	36
2.4 Verbrennungsmodellierung	39
2.4.1 Einspritzung	40

Inhaltsverzeichnis

2.4.2	DPIK- und DDPIK-Zündmodell	40
2.4.3	G-Gleichungsmodell.....	41
2.4.4	Modellierung der Flammgeschwindigkeit.....	42
2.5	Wärmetransport	43
3.	Validierung der Simulation	47
3.1	Wärmeströme aus der Verbrennungssimulation	47
3.2	Kühlmittelströmung und Modellierung von Sieden.....	52
4.	Stationäre Simulation des Nennleistungsbetriebspunktes.....	55
4.1	Modellbildung	55
4.1.1	Multizylindermodell	55
4.1.2	Kolbentemperaturfeldmodell.....	58
4.1.3	Motortemperaturfeldmodell	61
4.2	Ergebnisse.....	64
4.2.1	Multizylinderströmung	65
4.2.2	Wärmestromdichte in die Zylinderlauffläche.....	67
4.2.3	Motortemperaturfeld.....	72
4.3	Parameterstudie	75
5.	Kennfeldweite Temperaturfeldsimulation	81
5.1	Idee und Qualitätskriterium	81
5.2	Auswahl und Simulation weiterer Betriebspunkte	84
5.3	Ergebnisse der Einzelsimulationen.....	85
5.4	Ableitung weiterer Temperaturfelder	90
6.	Transiente Temperaturfeldsimulation	95
6.1	Modifikation des stationären Modells	95
6.2	Ableitung transienter Randbedingungen	98
6.3	Ergebnis	105
7.	Zusammenfassung und Ausblick	111

A. Anhang	115
A.1 Herleitung der Wärmestromdichte aus der gemessenen Oberflächentemperatur	115
A.2 Weitere Ergebnisse der Wärmestromdichtvalidierung	116
A.3 Verwendete Wärmeleitfähigkeiten der Komponenten des Kolbenmodells	117
A.4 Vortest zur Auswirkung einer Prismenschicht im Wärmeleitmodell	117
A.5 Physikalische Eigenschaften der festen Komponenten des CHT Modells	119
A.6 Physikalische Eigenschaften des Kühlmittels	120
A.7 Positionierung der Bauteiltemperaturmesstellen im Motor	121
A.8 Abschätzung Wärmeleitwiderstand zwischen Kolbenmulde und Ringstirnfläche	123
A.9 Herleitung der Zahlenwertgleichung für die Unsicherheit von $c_{p,Abg}$	124
A.10 Ergebnis der Verbrennungssimulationen für Teillast und LET	127
Literaturverzeichnis	129