

Instationäre Berechnung von Bauteiltemperaturen im Motorraum

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Irina Lade

geboren am 28. März 1981 in St.-Petersburg, Russland

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Krautz

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steinberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Berg

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2009

Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugtechnik und -antriebe
der BTU Cottbus

Band 3

Irina Lade

**Instationäre Berechnung von Bauteiltemperaturen
im Motorraum**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Cottbus, BTU, Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8965-2

ISSN 1868-6710

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Dissertation entstand in freundlicher Zusammenarbeit mit der BMW Group. Mein Dank gilt den Mitarbeitern der Abteilung EG-65 Wärmemanagement, besonders Herrn Dr. Andreas Eder, der meine Arbeit betreut hat.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Steinberg bedanke ich mich für die Betreuung der Arbeit seitens der BTU Cottbus.

Mein Dank gilt Herrn Dr. Klaas Kunze, der mir seine fachliche Unterstützung zuteil werden ließ.

München, 26. Juni 2009

Irina Lade

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Formelzeichen und Abkürzungen	iv
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	4
3 Modellierungsmethoden	8
3.1 Wärmeübertragung in den Bauteilen	9
3.1.1 Abbildung von thermodynamischen Prozessen mit Punkt- massen	13
3.2 Thermodynamische Prozesse in der durchströmenden Luft	19
3.2.1 Simulation turbulenter Strömungen	20
3.2.2 Berechnung der Konvektion	24
3.3 Fazit	25
4 Simulationsaufbau	26
5 Punktmassenmodell	29
5.1 Umfang	29
5.2 Struktur des Modells	35
5.3 Entwicklung des Punktmassenmodells	39
5.3.1 RadTherm-Modell	41
5.4 Wärmeleitungsabbildung	43
5.5 Konvektionsabbildung	44
5.5.1 Export von Konvektionsrandbedingungen von STAR-CD	44
5.6 Validierung des Punktmassenmodells ohne Abbildung der Strah- lung	48
5.6.1 Reduzierung des Modells durch Löschen von irrelevanten Bauteilen beim Modellieren.	49

5.6.2	Mittelung von Lufttemperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten	53
5.6.3	Validierung des Dymola-Modells.	55
5.7	Strahlungsabbildung	57
5.8	Validierung des Punktmassenmodells mit Abbildung der Strahlung 60	
5.8.1	Validierung der Abbildung von Konvektion und Wärmeleitung mit dem vorgegebenen Strahlungswärmeeintrag.	60
5.8.2	Validierung: Berechnung von Strahlungswärmeflüssen mit unterschiedlichen Ansätzen	62
5.9	Fazit	68
6	Kopplung des Punktmassenmodells mit dem Durchströmungsmodell	69
6.1	Modellierung der Motorraumdurchströmung	69
6.2	Implementierung der Kopplung	71
6.3	Lufttemperaturkorrektur	76
6.3.1	Vergleich der mit unterschiedlichen Ansätzen für die Lufttemperaturkorrektur ermittelten Ergebnisse	79
6.4	Fazit	88
7	Simulationsergebnisse	89
7.1	Fazit.	98
8	Ausblick	99
	ANHANG	101
A	Automatische Kopplung	101
	Literaturverzeichnis	104

Zusammenfassung

Steigende Kundenanforderung bzgl. Fahrdynamik und Antriebskomfort führen zu immer höheren Motorleistungen. Gleichzeitig wird im Zuge der angestrebten Gewichtsreduzierung eine immer kompaktere Gestaltung des Motorraums gefordert. Die Gewährleistung der thermischen Betriebssicherheit (TBS) wird dadurch immer anspruchsvoller. Dabei spielen Übergangsprozesse bei der Änderung des Fahrzustandes eine wichtige Rolle für TBS. Es können z.B. durch Nachheizeffekte beim Abstellen eines Fahrzeugs extrem hohe Temperaturen im Motorraum auftreten, die beim unzureichenden Bauteilschutz zu lokalen Überhitzungen führen können.

Die experimentelle Absicherung der Fahrzeuge ist vor allem in frühen Entwicklungsstadien zeit- und kostenintensiv. Durch simulative Methoden, die bereits im Vorfeld eine Identifikation thermisch kritischer Bauteile zulassen und Aussagen über Höhe, Herkunft, Art des Wärmeeintrags sowie eine Wärmebilanz liefern, könnte der Aufwand reduziert werden. Eine reine 3D Analyse mit detaillierten Geometrie und Randbedingungen kann derzeit in einem so komplexen System wie dem durchströmten Motorraum aufgrund des enormen Rechenaufwands nur für die Berechnung einiger stationärer Zustände eingesetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Simulationsmethodik für die transiente Abbildung von Temperaturen und Wärmeströmen im Motorraum eines Fahrzeugs unter Benutzung von Punktmassenmodellen erarbeitet. Darauf aufbauend wird ein Simulationsmodell erstellt und validiert. Anwendungsfall ist die Simulation des Nachheiz-Effektes und der freien Abkühlung für ein Fahrzeug mit dem Fokus auf thermische Prozesse im Vorderachsträger.

Als Lösungsansatz wird die Strategie der Software-Kopplung vorgeschlagen. Bauteile im Motorraum werden mit dem 1D-Simulationsprogramm Dymola thermisch abgebildet (transiente Berechnungen). Für die Berechnung der Konvektionsrandbedingungen wird zu bestimmten Zeitpunkten eine Motorraumdurchströmungsberechnung mit dem 3D CFD Paket STAR-CD stationär durchgeführt.

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen:

ACEA	- Association des Constructeurs Europeens d'Automobiles (European Automobile Manufacturers' Association)
BF	- Bergfahrt
BTID	- Identifikationsnummer eines Bauteils
bzgl.	- bezüglich
bzw.	- beziehungsweise
CFD	- computational fluid dynamics
CO ₂	- Kohlendioxid
d.h.	- das heißt
DNS	- direkte numerische Simulation
EU	- Europäische Union
FA	- freie Abkühlung
ggf.	- gegebenenfalls
ID	- Identifikationsnummer
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
LES	- Large Eddy Simulation
LNL	- Lüfternachlauf
QLL	- Querlenkerlager
RANS	- Reynolds Averaged Navier-Stokes (Gleichungen)
Re	- Reynoldszahl
TBS	- thermische Betriebssicherheit
usw.	- und so weiter
VAT	- Vorderachstrager
VK	- Vorkonditionierung
z.B.	- zum Beispiel
0D	- nulldimensional
1D	- eindimensional

2D	- zweidimensional
3D	- dreidimensional

Indizes:

ab	- absorbiert
Bt	- Bauteil
El	- Element
em	- emittiert
K	- Konvektion
L	- Luft
Str	- Strahlung
th	- thermisch
tr	- treffend
Umg	- Umgebung
W	- Wand oder Oberfläche einer Wand

Lateinisch:

<i>a</i>	- Temperaturleitfähigkeit
<i>a</i>	- Absorptionsgrad
<i>a</i>	- reeller Koeffizient
<i>A</i>	- Fläche bzw. Schnittfläche
<i>b</i>	- reeller Koeffizient
<i>c</i>	- spezifische Wärmekapazität
<i>d</i>	- Durchmesser
<i>e</i>	- Gesamtenergiedichte
<i>E</i>	- empirischer Koeffizient

E	- Bestrahlungsstarke
f	- äußere Kraftdichte
F	- Sichtfaktor
G	- Kern eines Filters
H	- Helligkeit
k	- turbulente kinetische Energie
m	- Masse
M	- spezifische Ausstrahlung
N	- Anzahl
p	- Druck
q	- Wärmestromdichte
\dot{q}	- Wärmefluss
\dot{Q}	- Wärmestrom
r	- Ortskoordinate
R	- Widerstand
t	- Zeit
T	- Temperatur
u	- Geschwindigkeitskomponente
u	- tangentielle Fluidgeschwindigkeit
v	- Fluidgeschwindigkeit
x	- kartesische Koordinate
y	- Abstand des Zentrums einer Zelle von einer Wand
y^+	- dimensionsloser normaler Abstand von einer Wand

Griechisch:

α	- Wärmeübergangskoeffizient
δ	- Wanddicke
ϵ	- Emissionsgrad
ϵ	- Austauschkoefizient

ε	- Dissipation
κ	- von Karman Konstante
λ	- Wärmeleitfähigkeit
ρ	- Dichte
σ	- Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	- viskoser Spannungstensor
τ	- Schubspannung
ϕ	- Variable

