

Jan Eller

Stützpunktbasierter Ansatz zur Vorhersage von Bauteil- temperaturkollektiven im Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs



Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.

Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Weitere Bände in dieser Reihe <http://www.springer.com/series/13535>

Jan Eller

Stützpunktbasierter Ansatz zur Vorhersage von Bauteiltemperatur- kollektiven im Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs

Jan Eller
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-18689-0 ISBN 978-3-658-18690-6 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-18690-6

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Sie ist das Resultat einer Kooperation mit der Abteilung Thermomanagement RD/FNT der Daimler AG in Sindelfingen.

Herrn Prof. Jochen Wiedemann möchte ich für die Übernahme des Hauptberichts, die Unterstützung während der Promotion und die Anregungen zu dieser Dissertation, sowie für das Vertrauen in meine Arbeit am FKFS danken. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Thomas Breitling für die Übernahme des Mitberichts und die Verbesserung dieser Arbeit durch seine zielsicheren Fragen.

Auf der Seite der Daimler AG möchte ich mich ganz herzlich bei Heinrich Reister und Thomas Binner für die intensive Betreuung, großartige fachliche Unterstützung und die wunderbare Arbeitsatmosphäre bedanken. Gleiches gilt für das gesamte Team von Walter Bauer, in dem ich mich in den letzten dreieinhalb Jahre sehr wohl gefühlt habe. Für die Unterstützung der ganzen Abteilung möchte ich mich stellvertretend bei der aktuellen Abteilungsleiterin Heike Schönerstedt, sowie bei dem früheren Abteilungsleiter Raimund Siegert bedanken, dessen Interesse an Kollektiven dieses Projekt von Anfang an unterstützt und getrieben hat. In der Abteilung RD/FNT gilt mein Dank insbesondere Thomas Haier für seine Unterstützung in allen messtechnischen Dingen, sowie den anderen Doktoranden der Abteilung für das stetige gegenseitige Hinterfragen beim Problemlösen. Nicht vergessen will ich alle Kontakte außerhalb der Abteilung, z.B. im Dauerlauf, im Klimawindkanal oder der messtechnischen Werkstatt, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Im IVK / FKFS will ich mich stellvertretend bei den Bereichsleitern Nils Widdecke und Timo Kuthada bedanken, die eine offene Arbeitsatmosphäre für unser Team geschaffen und meine häufige Projektarbeit immer unterstützt haben.

Aber auch das Leben außerhalb der beruflichen Tätigkeit muss passen, um solch eine Arbeit anfertigen zu können. Deswegen möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern bedanken, die mir jeden Schritt in meiner Ausbildung ermöglicht haben, die jede Veränderung in meinen beruflichen Zielen unterstützt haben und ohne die ich jetzt nicht an dieser Stelle wäre.

Zuletzt: Danke an meine Frau Joanna, die mich unterstützt und anspornt, die mir einen frischen Blick auf Probleme gibt, die mich antreibt, wenn ich demotiviert bin, und die mir hilft den Blick auf das Wichtige nicht zu verlieren! Deine tägliche Unterstützung und dein Glaube an meinen Erfolg haben sicher gestellt, dass ich das hier geschafft habe!

Jan Eller

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Formelzeichen, Abkürzungen und Glossar.....	XI
Zusammenfassung	XV
Abstract	XIX
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	7
2.1 Vorhersage der Elastomeralterung.....	7
2.2 Simulationsmethodik der thermischen Absicherung	9
2.3 Kollektive in der Fahrzeugtechnik und im Thermomanagement	12
2.3.1 Fahrzeugdauerlauf als Bauteil- temperaturkollektivquelle	14
2.3.2 Simulation von Bauteiltemperaturen unter hochdynamischen Randbedingungen.....	15
2.3.3 Simulation von Kühlmitteltemperaturverteilungen.....	16
2.4 Fazit	17
3 Grundlagen.....	19
3.1 Physikalische Grundlagen.....	19
3.1.1 Strömungsmechanik.....	19
3.1.2 Wärmetransport.....	20

3.1.3	Numerische Strömungs- und Wärmetransportsimulation	21
3.2	Experimentelle Grundlagen	23
3.2.1	Messtechnik	23
3.2.2	Klimawindkanal und Fahrzeugdauerlauf	24
3.3	Mathematisch-statistische Grundlagen	26
4	Methoden zur Kollektivdefinition	29
4.1	Definition eines Bauteiltemperaturkollektivs über Stützpunkte	31
4.2	Beschreibung des Messfahrzeugs und der genutzten Dauerlaufdaten	34
4.3	Definition der Ersatzlastfälle	38
4.3.1	Qualitative Bestimmung von Fahrzustandsbereichen	40
4.3.2	Quantitative Bestimmung von Ersatzlastfällen	44
4.4	Definition der Häufigkeit der Stützpunkte	46
5	Untersuchung der Ersatzlastfälle	55
5.1	Untersuchung von geregelten Lastfällen am Beispiel des Idle	55
5.1.1	Definition des Lastfalls und experimentelle Umsetzung	56
5.1.2	Experimentelle Ergebnisse	58
5.1.3	Aufbau der Simulation	60
5.1.4	Simulative Ergebnisse	62
5.1.5	Erkenntnisse für geregelte Lastfälle	64
5.2	Untersuchung der neu definierten Ersatzlastfälle	65
5.2.1	Messung im Klimawindkanal	66
5.2.2	Ergebnisse der Messung	70

5.2.3	Numerische Simulation.....	74
5.2.4	Ergebnisse der Simulation	76
5.2.5	Vergleich von Messung und Simulation	82
5.2.6	Fazit.....	84
5.3	Sensitivitätsanalyse	85
5.3.1	Experimentelle Variationen	86
5.3.2	Ergebnisse der experimentellen Variationen.....	88
5.3.3	Simulative Variationen	96
5.3.4	Ergebnisse der simulativen Variationen.....	97
5.3.5	Fazit.....	103
6	Analyse von Bauteiltemperaturkollektiven.....	107
6.1	Berechnete Bauteiltemperaturkollektive.....	107
6.1.1	Untersuchung des Motorlagertemperaturkollektivs	107
6.1.2	Erweiterung auf andere Elastomerbauteile	110
6.1.3	Erweiterung auf andere Fahrzeuge.....	112
6.2	Vergleich mit Kundendaten	115
7	Fazit und Ausblick	121
7.1	Fazit	121
7.2	Zukünftige Herausforderungen	124
	Literaturverzeichnis	129

Formelzeichen, Abkürzungen und Glossar

Lateinische Buchstaben

A	$\text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$	Frequenzfaktor der Arrhenius-Gleichung
E_A	J/mol	Aktivierungsenergie einer Reaktion
g	m/s^2	Gravitationsbeschleunigung
h	J/kg	Spezifische Enthalpie
H_j	—	Summenhäufigkeit
k	$\text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Arrhenius-Gleichung
k	J/kg	Spezifische turbulente kinetische Energie (k-ε-Modell)
n	—	Absolute Häufigkeit eines einzelnen Ereignisses
p	N/m^2	Druck
$\dot{q}$	W/m^2	Wärmestromdichte
R	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	Universelle Gaskonstante
T	K	Absolute Temperatur
t	s	Zeit
u	m/s	Geschwindigkeit (üblicherweise vektoriell)
v	m/s	Geschwindigkeit (üblicherweise absolut)
x, y, z	m	Raumkoordinaten in Bezug zum Fahrzeug, Ursprung des Koordinatensystems in der Symmetrieebene des Fahrzeugs ($y = 0$) in der Mitte der vorderen Räder ($x = 0$ und $z = 0$)
y^+	—	Dimensionsloser Wandabstand

Griechische Buchstaben

α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeübergangskoeffizient
ε	—	Emissionsgrad
ε	$J/(kg \cdot s)$	Isotrope Dissipationsrate (k- ε -Modell)
λ	$W/(m \cdot K)$	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	N/m^2	Schubspannung

Abkürzungen

AGR	Abgasrückführung
BR	Baureihe
CAN-Bus	Control-Area-Network-Bus, serielles Bussystem
CFD	Computational Fluid Dynamics
DPT	Digitaler Prototyp
EE-Bauteile	Elektrik- und Elektronikbauteile
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
MRF	Multiple Reference Frame
MBVT	Mercedes-Benz Verbrauchstest
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
SIMPLE	Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations
TAG	Thermische Absicherung Gesamtfahrzeug

Symbole

∇	Divergenz-Operator, Gradient
Δ	Differenz, Abstand

Begriffsdefinitionen im Bereich der Kollektivbestimmung

Stützpunkt	Spezifischer Punkt, der das Kollektiv definiert, bestimmt durch eine Bauteiltemperatur und eine Position auf der Zeitachse
Häufigkeit	Zeitraum, den ein Stützpunkt im Kollektivraum repräsentiert
Position auf der Zeitachse	Stelle auf der Zeitachse, die einem Stützpunkt zugeordnet wird
Dauerlauf	Experimentelle Langzeiterprobung des Gesamtfahrzeugs auf definierten Strecken im öffentlichen Straßenverkehr. In dieser Arbeit speziell die mit dem Messfahrzeug durchgeführte Erprobung unter Dauerlaufbedingungen
Gesamtdaten	Satz aller Datenpunkte, die im speziell für diese Arbeit durchgeführten Dauerlauf aufgenommen worden sind
Fahrzustand	Kombination von Betriebsparametern des Fahrzeugs
Betriebsparameter	Hier im Speziellen Außentemperatur, Fahrgeschwindigkeit und Motorleistung
Einzelereignis	Einzelner Fahrzustand, bzw. einzelne Kombination von Betriebsparametern
Cluster	Gruppe von ähnlichen Einzelereignissen
Fahrzustandsbereich	Bereich, in dem ein Fahrzeug betrieben wird, definiert über Intervalle der Betriebsparameter
Ersatzlastfall	Definierter Satz von Randbedingungen für eine Simulation oder ein Experiment, speziell als Abbildung oder „Ersatz“ für einen Fahrzustandsbereich

Zusammenfassung

Die thermische Absicherung des Gesamtfahrzeugs beschäftigt sich mit thermischen Belastungen von Bauteilen. In dieser Funktion werden vor allem Maximaltemperaturen mit Hilfe von Extremlastfällen überprüft. Dadurch soll die thermische Beschädigung der Bauteile im Fahrbetrieb vermieden werden. Dieser Fokus auf Maximaltemperaturen ist für die Auslegung von Elastomerbauteilen nicht ausreichend, da diese über einen großen Temperaturbereich thermisch altern. Für die Auslegung dieser Bauteile werden Häufigkeitsverteilungen der Temperatur des jeweiligen Bauteils über die Lebensdauer des Fahrzeugs verwendet, die bisher nicht von der thermischen Absicherung zur Verfügung gestellt werden konnten. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, mit der diese sogenannten Bauteiltemperaturkollektive für Elastomerbauteile mit Hilfe von numerischer Simulation im Rahmen der thermischen Absicherung am Gesamtfahrzeug vorhergesagt werden können.

Im Fahrzeug altern Elastomerbauteile vor allem thermisch-oxidativ. In Abhängigkeit von der Absoluttemperatur verändern sich ihre Werkstoffeigenschaften über die Lebensdauer. Eine Vorhersage dieser Alterung ist für technische Bauteile aktuell noch nicht möglich, jedoch benötigen alle in der Forschung verfolgten Ansätze die zeitliche Temperaturverteilung des Bauteils als Randbedingung. Dies stellt die Schnittstelle zur thermischen Absicherung dar. Dort werden 3D-Simulationsmodelle zur Vorhersage von Bauteiltemperaturen verwendet, mit denen allerdings zeitliche Temperaturverteilungen noch nicht berechnet werden können. Andere Forschungsgruppen haben bisher nur an hochdynamischen Zyklen oder an Verteilungen von Kühlmedientemperaturen gearbeitet. Bauteiltemperaturkollektive sind noch nicht betrachtet worden.

Basierend auf den vorhandenen Methoden der thermischen Absicherung wird hier ein Prozess vorgestellt, mit dem Bauteiltemperaturkollektive berechnet werden können. Der Ansatz ist, Stützpunkte zur Definition des Kollektivs zu verwenden, die über eine simulativ ermittelte Bauteiltemperatur und eine Position auf der Zeitachse des Kollektivs definiert werden. Die Methodik nutzt

Dauerlaufdaten, da der Dauerlauf die einzige momentan verfügbare Quelle für Kollektivinformationen zu Bauteiltemperaturen ist. Als Messfahrzeug wird eine Mercedes-Benz C-Klasse Limousine der Baureihe 205 verwendet, die speziell für diese Aufgabe mit Messtechnik ausgestattet worden ist. Für numerische Simulationen existiert ein geometrisch identisches Simulationsmodell.

Die Dauerlaufdaten werden in Bauteiltemperaturbändern qualitativ untersucht und Cluster von Einzelereignissen mit einer hohen Häufigkeit werden zu Fahrzustandsbereichen zusammengefasst. Fahrzustände sind Kombinationen von Intervallen der Parameter Außentemperatur, Fahrgeschwindigkeit und Motorleistung. Es entstehen auf diese Weise vier Fahrzustandsbereiche, die je einem Stützpunkt zugeordnet werden. Die vier Stützpunkte sind gemäß der Fahrgeschwindigkeit benannt, sind jedoch über alle drei Parameter definiert: Überland (hohe Geschwindigkeit und niedrige Außentemperatur), Stadt (mittlere Geschwindigkeit und mittlere Außentemperatur), Langsam (niedrige Geschwindigkeit und hohe Außentemperatur) und Stillstand (sehr niedrige Geschwindigkeit und sehr hohe Außentemperatur). Die Motorleistung ist für Experimente geschwindigkeitsabhängig, wobei sie für den Ersatzlastfall Stadt leicht erhöht ist, um Dynamikeffekte auszugleichen. In Simulationen wird dieser Parameter nicht benötigt.

Aus jedem Fahrzustandsbereich wird ein Ersatzlastfall entwickelt, der einen Satz Randbedingungen darstellt und der simulativ und experimentell untersucht werden kann. Die Bauteiltemperatur des Stützpunkts ist das Ergebnis der Berechnung oder Messung des Ersatzlastfalls. Die Position des Stützpunkts auf der Zeitachse wird aus der Häufigkeit der Fahrzustandsbereiche in den Dauerlaufdaten ermittelt. Der Stützpunkt wird in der Mitte des jeweiligen repräsentierten Zeitbereichs positioniert.

Die entwickelten neuen Ersatzlastfälle werden experimentell und simulativ analysiert und mit typischen Auslegungslastfällen der thermischen Absicherung verglichen. Dabei wird der Fokus auf Elastomerbauteile im vorderen Bereich des Fahrzeugs gelegt. Ein Auslegungslastfall ist der Idle, dessen numerische Simulation im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird. Hierbei handelt es sich, wie bei den neuen Ersatzlastfällen und im Gegensatz zu den anderen Auslegungslastfällen, um einen stark von Regelungseinflüssen dominierten Lastfall, bei dem der Motor nur in einem niedrigen Teillastbereich

betrieben wird. Stellgrößen, wie die Ansteuerung des Sauglüfters oder die Öffnung des Thermostaten, müssen in diesen Lastfällen ebenfalls betrachtet werden, da sie für die Bestimmung der Bauteiltemperaturen essentiell sind. Die Simulation zeigt in diesem Lastfall eine gute Übereinstimmung mit der Messung. Es ist also möglich, auch geregelte Lastfälle, die einen stationären Beharrungszustand haben, simulativ stationär mit Hilfe der Standardprozesse der thermischen Absicherung zu betrachten.

Die Untersuchung der neuen Ersatzlastfälle zeigt, dass sie sich in zwei Punkten signifikant von Auslegungslastfällen unterscheiden. Zum einen entsteht in den Ersatzlastfällen Überland und Stadt eine inhomogene Kühlerabluftverteilung, die zu deutlich unterschiedlichen Temperaturen von Bauteilen auf der rechten und linken Seite des Fahrzeugs führt. Diese ist durch die Standardmethode zur Modellierung des Wärmeübergangs am Kühlerpaket, den Single-Stream-Ansatz, nicht abbildbar. Außerdem sind Lufttemperaturgradienten in der Nähe der Bauteile ausgeprägter als sonst in der thermischen Absicherung üblich. Dadurch ergibt sich eine höhere Unsicherheit in der Bestimmung von Bauteiltemperaturen.

Um diese Erkenntnisse zu untermauern, wird eine Sensitivitätsanalyse anhand der Parameter Geschwindigkeit, Außentemperatur, Last und der Strömungstopologie bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Regelungseinflüsse, wie das Einschalten der Klimaanlage bei einer leichten Erhöhung der Außentemperatur im Ersatzlastfall Überland oder eine konstante Sauglüfterdrehzahl bei Änderung der Motorlast im Ersatzlastfall Stadt, sind von großer Bedeutung für Bauteiltemperaturen. Eine Geschwindigkeitsvariation kann in den Ersatzlastfällen Stillstand und Überland vernachlässigt werden, hat aber eine signifikante Auswirkung auf Bauteiltemperaturen im Ersatzlastfall Stadt. Motornahe Bauteile, wie das Motorlager, sind grundsätzlich von der Durchströmung und damit der Kühlerablufttemperatur beeinflusst, wohingegen motorferne Bauteile, wie das Zugstrebenlager, stark von der Umströmung dominiert werden.

Aus den Stützpunkten lassen sich Temperaturkollektive für die betrachteten Bauteile ermitteln. Für das Motorlager, das im Fokus der Methodik steht, ergibt sich ein berechnetes Kollektiv, dessen Abweichung gegenüber dem Dauerlaufkollektiv im Rahmen der geforderten Genauigkeit ist. Es ist eher