

Wissenschaftliche Reihe  
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

David Klemm

# Ein reduziertes Modell zur Simulation des transienten thermischen Verhaltens einer Fahrzeugkabine



Springer Vieweg

---

# **Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart**

## **Reihe herausgegeben von**

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen 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.

### **Reihe herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe  
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

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

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

---

David Klemm

# Ein reduziertes Modell zur Simulation des transienten thermischen Verhaltens einer Fahrzeugkabine

David Klemm  
IVK, Fakultät 7, Lehrstuhl für  
Kraftfahrwesen  
Universität Stuttgart  
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2019

D93

ISSN 2567-0042                      ISSN 2567-0352 (electronic)  
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart  
ISBN 978-3-658-28760-3              ISBN 978-3-658-28761-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28761-0>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

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

# Vorwort

Phantasie ist wichtiger als Wissen,  
denn Wissen ist begrenzt.

---

*Albert Einstein*

Für jedes komplexe Problem gibt  
es stets eine einfache Lösung.  
Und die ist falsch.

---

*George Bernard Shaw*

Diese beiden Zitate legen nahe, dass es für die meisten Fragestellungen oder technischen Herausforderungen mehr braucht als das Reproduzieren gelernter Sachverhalte. Ein Arbeitsumfeld und eine Atmosphäre, die Kreativität und die Möglichkeit Ideen zu entwickeln fördern und unterstützen, sind daher ein nicht hoch genug einzuschätzendes Gut. Diese Freiheit durfte ich in den letzten drei Jahren während der Bearbeitung dieses Projektes stets genießen. Das weiß ich sehr zu schätzen und bin dafür sehr dankbar.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) in einem Kooperationsprojekt mit der Abteilung RD/ANT der Daimler AG in Sindelfingen, unter der Betreuung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann. Deshalb gilt mein Dank vielen beteiligten Personen. Hierzu zählen zunächst Herr Prof. Dr. Breitling, Herr Dr. Raimund Siegert und Frau Jutta Schmidtke von der Daimler AG, die es mir überhaupt erst ermöglichten dieses Projekt zu bearbeiten, und dann Frau Dr. Schönerstedt für die kritische aber wohlwollende Begleitung des Projekts.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit von Universitätsseite, ebenso wie meinen beiden Vorgesetzten und Bereichsleitern am FKFS, Dipl.-Ing. Nils Widdecke und Dr.-Ing. Timo Kuthada, für die stete Unterstützung, Rat und Diskussionen aber

auch immer der Freiheit in der Bearbeitung und Umsetzung meiner Ideen. In dieser Reihe möchte ich auch ganz herzlich Wolfgang Rößner danken, mein Betreuer während des Projektes bei der Daimler AG in der Abteilung RD/ANT, auf dessen Initiative die Zielsetzung des Projektes zurückgeht und der sich immer und in allen Belangen ohne Einschränkung für mich eingesetzt hat. Seine Denkanstöße, hilfreichen Diskussionen und Hinweise haben mir immer weitergeholfen, und er hat mir in Sindelfingen immer das Gefühl gegeben willkommen zu sein.

Frau Prof. Dr.-Ing. Corinna Salander danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Gespräche und Diskussionen über die Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich mich bei den Studierenden, deren Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten ich während meiner Zeit am FKFS bzw. IVK betreut habe und die im Folgenden in chronologischer Reihenfolge aufgeführt sind:

- Karsten Straub (MA): „Aufbau und Validierung eines 3D-CFD-Simulationsmodells einer Fahrzeugkabine hinsichtlich transienter Wärmeübertragung“
- Christoph Böttcher (MA): „Simulation einer Fahrgastkabine mittels eines gekoppelten GT-SUITE-TAITHerm Modells“
- Vinzent Meier (BA): „Transiente numerische Simulation der eindimensionalen Wärmeübertragung durch einen Schichtaufbau mehrerer homogener Materialien“
- Christian Schmidt (BA): „Untersuchung der Wärmeübertragung an einem 3DSimulationsmodell einer Fahrzeugkabine bei unterschiedlichen thermischen Lastfällen“
- Yuhang Ji (SA): „Literaturrecherche zu verschiedenen Ansätzen der Modellierung einer Fahrzeugkabine zu transienten thermischen Simulation“
- Ersoy Ciftcpinar (MA): „Validierung einer 3D-Simulationsmethode am Modell einer Fahrzeugkabine hinsichtlich transientthermischen Verhaltens“
- Ahmet Koc (BA): „Aufbau eines thermischen Simulationsmodells einer Fahrzeugkabine in GTSuite zur Untersuchung des transient-thermischen Verhaltens bei verschiedenen Lastfällen“

- Daniel Gehringer (MA): „Entwicklung und Aufbau einer zerstörungsfreien Messmethodik thermischer Materialeigenschaften von Festkörperschichten“
- Marius Partl (SA): „Systemanalytische Betrachtung des transient thermischen Verhaltens einer Fahrzeugkabine“
- Fan Zhang (BA): „Ähnlichkeitsbetrachtungen im Strömungsfeld einer Fahrzeugkabine bei unterschiedlichen Lastfällen“
- Yannick Härter (SA): „Ähnlichkeitsbetrachtungen im Strömungsfeld einer Fahrzeugkabine bei unterschiedlichen Lastfällen“
- Vinzent Meier (SA): „Entwicklung einer Programmstruktur und eines Bedienkonzeptes für ein Simulationsmodell in Matlab“

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dr. Siegfried Kleymann stellvertretend für die Bischöfliche Studienförderung Cusanuswerk e.V. bedanken, für die Förderung und Unterstützung während des Studiums und darüber hinaus und nun für die Möglichkeit der konzentrierten Arbeit im Cusanushaus in Mehlem während des Schreibens an der Dissertation.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Bei meiner Mutter, die mich immer in meinen Vorhaben bestärkt und bestmöglich unterstützt hat, bei meinem Vater, der schon früh in meiner Kindheit mein Interesse für verschiedenste Dinge geweckt und gefördert hat, und bei meinen Großeltern und Geschwistern, die jeder auf seine Weise ihren Teil dazu beitragen und dazu beigetragen haben, dass ich heute dort stehe wo ich bin.

Den größten Dank möchte ich aber meiner Frau Qingyang und meiner Tochter Aurelia aussprechen, die viel zurückstecken mussten in den letzten drei Jahren, mich aber immer unterstützt haben und letzten Endes dafür gesorgt haben, dass ich die Motivation und Zielstrebigkeit immer hochhalten und somit die Arbeit erfolgreich zu Ende bringen konnte.

Korntal-Münchingen

David Klemm



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
Symbolverzeichnis .....	XIX
Zusammenfassung .....	XXIII
Abstract .....	XXVII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Bedeutung der Klimatisierung des Fahrgastraumes .....	2
1.2 Energiebedarf für die Klimatisierung.....	6
1.3 Simulation im Entwicklungsprozess .....	6
1.4 Luftströmung .....	8
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>9</b>
2.1 CFD-Modelle.....	10
2.2 Co-Simulation .....	12
2.3 Fast Fluid Dynamics .....	13
2.4 Zonale Modelle .....	13
2.5 Ein-Zonen-Modelle .....	14
<b>3 Grundlagen.....</b>	<b>17</b>
3.1 Physikalische Grundlagen .....	17
3.1.1 Strömungsmechanik.....	17
3.1.2 Wärmeübertragung durch Konvektion .....	19
3.1.3 Wärmeleitung .....	21
3.1.4 Wärmestrahlung .....	21
3.2 Numerische Grundlagen .....	22
3.3 Lineare Modellierung .....	23

<b>4</b>	<b>Modellbeschreibung</b>	<b>25</b>
4.1	Lastfälle	26
4.1.1	Winterlastfall „Heatup“	27
4.1.2	Sommerlastfall „Cooldown“	28
4.1.3	Lastfall „Soak“	29
4.2	3D-CFD-Modell	29
4.2.1	Geometrie	29
4.2.2	Modellierung der Festkörperschichten	32
4.2.3	Strahlungsmodellierung	41
4.2.4	Modellierung der Innenluft	43
4.2.5	Zeitliche Diskretisierung	50
4.2.6	Ähnlichkeit des Strömungsfeldes	50
4.3	LTI-Modell	54
4.4	Reduziertes Modell	60
4.4.1	Reduziertes Modell in GT-SUITE	64
4.4.2	Reduziertes Modell in Matlab	68
<b>5</b>	<b>Validierung</b>	<b>73</b>
5.1	Lastfall „Heatup“	74
5.2	Lastfall „Cooldown“	84
5.3	Lastfall „Soak“	94
5.4	Kombinierter Testfall	95
5.5	Optimierungspotenzial	102
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>103</b>
6.1	Abgleich mit Messungen	106
6.2	Übertragbarkeit des reduzierten Modells	106
6.3	Modellierung des Feuchtetransports in der Kabine	107
	Literaturverzeichnis	109
	Anhang	117
A.1	Übersicht Aufbau Wandelemente	117
A1.1	3D-Modell	117
A1.2	Reduziertes Modell in GT-SUITE	119
A1.3	Reduziertes Modell in Matlab	121

# Abbildungsverzeichnis

1.1	HVAC-System der Mercedes Benz C-Klasse W205 .....	4
1.2	Reduzierung von Straßenerprobung .....	7
2.1	Diskretisierung von Strömungen .....	10
4.1	3D-Geometrie der Kabine .....	30
4.2	3D-Referenzmodell .....	31
4.3	Schichtaufbau Dach (3D).....	33
4.4	Randbedingungen der Gittersensitivitätsstudie (Festkörperschichten) .....	34
4.5	Transiente Temperatur (Oberfläche PU-Schaum-Schicht).....	35
4.6	Konvektion im Luftspalt .....	37
4.7	3D-Modell: Temperaturverteilung Dach (detailliert/vereinfacht).....	39
4.8	3D-Modell: Temperaturverteilung auf der Innenseite des Dachs (detailliert und vereinfacht) .....	39
4.9	3D-Modell: Wärmeleitung durch Kabinenwand (Dach) .....	40
4.10	Solare Einstrahlung im 3D-Modell .....	42
4.11	3D-Modell: Vernetzung der Innenluft .....	44
4.12	Ein- und Auslässe der Luft im 3D-Modell .....	45
4.13	HTC auf inneren Oberflächen im Cooldown nach 3600s .....	47
4.14	Senkrechte Einströmung (Cooldown) .....	47
4.15	Auslenkung der Einlässe um 30° (Cooldown) .....	48
4.16	Temperaturdifferenz an den inneren Oberflächen bei 30° Auslenkung der Einströmung .....	49
4.17	Temperaturdifferenz in den 12 Luftzonen bei 30° Auslenkung der Einströmung .....	49
4.18	Stromlinien Seitendüse Cooldown .....	51
4.19	y-Koordinaten der Stromlinien vorne links (Cooldown).....	53
4.20	z-Koordinaten der Stromlinien vorne links (Cooldown) .....	53
4.21	3D-Stromlinien in der Kabine (Cooldown und Heatup) .....	54
4.22	Systemdarstellung LTI-System/Reduziertes Modell (Cooldown) .....	57
4.23	Superpositionsprinzip beim LTI-System.....	58
4.24	Aufbau des reduzierten Modells .....	62

4.25	Schichtaufbau im reduzierten Modell in GT-SUITE.....	65
4.26	Temperaturabweichungen (Oberflächen) des GT-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	67
4.27	Verläufe der Temperaturabweichungen (Oberflächen) des GT-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	67
4.28	Temperatur (Armaturenbrett) des GT-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	68
4.29	GUI des reduzierten Modells in Matlab .....	70
4.30	Temperaturabweichungen (Oberflächen) des Matlab-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	71
4.31	Verläufe der Temperaturabweichungen (Oberflächen) des Matlab-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	71
4.32	Temperatur (Sitz hinten) des Matlab-Modells im Test-Lastfall (Cooldown) .....	72
5.1	Auswertepositionen für HTC's und Temperaturen .....	74
5.2	Sprungantworten für HTC am Armaturenbrett im „Heatup“ .....	75
5.3	Transiente Eingangsparameter „Heatup“ .....	76
5.4	Abweichungen der HTC's im Testfall „Heatup“ .....	77
5.5	LTI-Ausgang des HTC an der Mittelkonsole im Testfall „Heatup“ ....	78
5.6	LTI-Ausgang für HTC am Armaturenbrett im Testfall „Heatup“ .....	78
5.7	LTI-Ausgang für die Temperaturdifferenz am Auslass im Testfall „Heatup“ .....	79
5.8	Mittlere Kabinenlufttemperatur im Testfall „Heatup“ .....	80
5.9	Abweichungen (Matlab) der Oberflächentemperaturen im Testfall „Heatup“ .....	81
5.10	Abweichungen (GT) der Oberflächentemperaturen im Testfall „Heatup“ .....	81
5.11	Beispiele für Oberflächentemperaturen (Matlab) im Testfall „Heatup“ .....	82
5.12	Beispiele für Oberflächentemperaturen (GT) im Testfall „Heatup“ ....	82
5.13	Abweichungen der Zonentemperaturen (Matlab) im Testfall „Heatup“ .....	83
5.14	Abweichungen der Zonentemperaturen (GT) im Testfall „Heatup“ ...	83
5.15	Temperaturverlauf Zone 10 im Testfall „Heatup“ .....	84
5.16	Sprungantworten für HTC am Armaturenbrett im „Cooldown“ .....	85
5.17	Sprungantworten für $dT_{out}$ im „Cooldown“ .....	85

5.18	Transiente Eingangsparameter „Cooldown“ .....	86
5.19	Abweichungen der HTC's im Testfall „Cooldown“ .....	87
5.20	LTI-Ausgang des HTC im Fußraum vorne im Testfall „Cooldown“ ...	88
5.21	LTI-Ausgang für HTC am Armaturenbrett im Testfall „Cooldown“ ...	88
5.22	LTI-Ausgang für die Temperaturdifferenz am Auslass im Testfall „Cooldown“ .....	89
5.23	Mittlere Kabinenlufttemperatur im Testfall „Cooldown“ .....	90
5.24	Abweichungen der Oberflächentemperaturen (Matlab) im Testfall „Cooldown“ .....	91
5.25	Abweichungen der Oberflächentemperaturen (GT) im Testfall „Cooldown“ .....	91
5.26	Beispiele für Oberflächentemperaturen (Matlab) im Testfall „Cooldown“ .....	92
5.27	Beispiele für Oberflächentemperaturen (GT) im Testfall „Cooldown“ .....	92
5.28	Abweichungen der Zonentemperaturen (Matlab) im Testfall „Cooldown“ .....	93
5.29	Abweichungen der Zonentemperaturen (GT) im Testfall „Cooldown“ .....	93
5.30	Temperaturverlauf Zone 10 im Testfall „Cooldown“ .....	94
5.31	Sprungantworten für HTC am Armaturenbrett im „Soak“ .....	95
5.32	Transiente Eingangsparameter für den kombinierten Testfall .....	96
5.33	Abweichungen der HTC's im Testfall „Soak“ .....	97
5.34	LTI-Ausgang für HTC am Armaturenbrett im Testfall „Soak“ .....	98
5.35	Mittlere Kabinenlufttemperatur im kombinierten Testfall .....	99
5.36	Abweichungen der Oberflächentemperaturen (GT) im kombinierten Testfall .....	100
5.37	Beispiele für Oberflächentemperaturen (GT) im kombinierten Testfall .....	100
5.38	Abweichungen der Zonentemperaturen (GT) im kombinierten Testfall .....	101
5.39	Temperaturverlauf Zone 5 und 8 (GT) im kombinierten Testfall .....	101

# Tabellenverzeichnis

1.1	Klima in einem Büro und in einem Pkw-Fahrgastraum .....	3
4.1	Lastfall „Heatup“ .....	28
4.2	Lastfall „Cooldown“ .....	28
4.3	Lastfall „Soak“ .....	29
4.4	Lastfall „Standard-Cooldown“ .....	46
4.5	Simulationen für gemittelte Stromlinien .....	52
4.6	Transiente Basissimulationen (BS) des 3D-CFD-Modells .....	59
4.7	Test-Lastfall im „Cooldown“ .....	64
5.1	Eingangsparameter für Validierungs-Szenarien .....	73
A1.1	Eigenschaften der Festkörperschichten im 3D-Modell .....	117
A1.2	Eigenschaften der Festkörperschichten im GT-Modell .....	120
A1.3	Eigenschaften der Festkörperschichten im Matlab-Modell .....	122

# Abkürzungsverzeichnis

ANN	künstliches neuronales Netz (engl. „Artificial Neural Network“)
AP	Arbeitspunkt
BA	Bachelorarbeit
BS	Basissimulation
CFD	numerische Strömungsberechnung (engl.: „Computational Fluid Dynamics“)
CHT	konjugierte Wärmeübertragung (gekoppelte thermische Strömungssimulation, engl. „Conjugate Heat Transfer“)
CPUh	Prozessorstunden (engl. „Central Processing Unit hours“)
DGL	Differenzialgleichung
DNS	Direkte Numerische Simulation
DoE	statistische Versuchsplanung (engl. „Design of Experiments“)
DPT	Digitaler Prototyp
ED	Entfrosterdüsen
FD	Finites-Differenzen-Verfahren
FFD	engl. „Fast Fluid Dynamics“
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FMD	Fond-Mitteldüsen
FOFU	Fond-Fußraumdüse rechts und links
FQUER	Fußraumdüse auf Fahrer- und Beifahrerseite
FV	Finites-Volumen-Verfahren
GUI	Grafische Benutzeroberfläche (engl. „Graphical User Interface“)