

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Christopher Beck

Numerische Analyse der Zweiphasen- strömung und Kühlwirkung in nasslaufenden Elektromotoren



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight icon to the left of the text '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 Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) 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 IFS.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

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

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

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

Christopher Beck

Numerische Analyse der Zweiphasen- strömung und Kühlwirkung in naslaufenden Elektromotoren

 Springer Vieweg

Christopher Beck
IFS, Fakultät 7, Lehrstuhl für Fahrzeugantriebe
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2020

D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-32606-7 ISBN 978-3-658-32607-4 (eBook)
<http://doi.org/10.1007/978-3-658-32607-4>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch 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 der Verlage. 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

Die Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit in der Forschung & Entwicklung der Mercedes-Benz AG in Stuttgart entstanden und wurde durch Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende vom Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart betreut.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bargende für das Ermöglichen, die fachlichen Diskussionen und die Unterstützung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr. techn. Ch. Beidl danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Ein herzliches Dankeschön geht an Herrn Dr.-Ing. Christian Krüger für die wissenschaftliche Betreuung und an Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Steiner, der als Abteilungsleiter meine Arbeit stets gefördert hat. Besonders bedanke ich mich bei Herrn Harald Echte für die fachliche Unterstützung sowie die Möglichkeit zur Diskussion jedweder Ideen. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Dr. Jürgen Schorr für die hervorragende Zusammenarbeit auf dem Themengebiet der optischen Diagnostik. Für die fachlichen Diskussionen zur thermischen Auslegung danke ich Herrn Robert Lehmann. Ebenso gilt meine Dankbarkeit den zahlreichen Kollegen und Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie und meinen Freunden möchte ich ebenfalls für die Geduld, die Unterstützung und das aufgebrachte Verständnis danken.

„Es ist nicht genug zu wissen, man muss auch anwenden.

Es ist nicht genug zu wollen, man muss auch tun.“

Johann Wolfgang von Goethe

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Symbolverzeichnis	XVII
Kurzfassung	XXI
Abstract	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Elektrische Maschinen	5
2.2 Verlust- und Schädigungsmechanismen der PSM	6
2.3 Kühlprinzipien	8
2.4 Nasslaufende permanenterrege Synchronmaschine	10
2.4.1 Grundlegender Aufbau	10
2.4.2 Kühlkonzept.....	11
2.5 Stand der Technik – Simulation und Analyse	12
2.5.1 3D-Simulation	14
2.5.2 Analyse	17
3 Methodisches Vorgehen	21
3.1 Anforderungen an die Systemsimulation	22
3.1.1 Vorhersagegüte	22
3.1.2 Rechenzeit	24
3.2 Allgemeine Herausforderungen der Diskretisierung.....	24
3.2.1 Zeitskalen	24
3.2.2 Längenskalen	27
3.3 Abgeleiteter Handlungsbedarf.....	32

4	Schlüsselfaktoren der Kühlungssimulation	35
4.1	Wärmequellen	36
4.1.1	Elektromagnetische Verlustmechanismen.....	37
4.1.2	Mechanische Verlustmechanismen	39
4.2	Thermische Widerstände	40
4.2.1	Wärmeleitwiderstand	40
4.2.2	Thermische Kontaktwiderstände	44
4.2.3	Wärmesenken	45
4.3	Bewertung der Schlüsselfaktoren.....	50
4.3.1	Simulationsmodell	51
4.3.2	Einfluss der Solid-Modellierung	52
4.3.3	Einfluss der Wärmesenkenmodellierung	56
5	Fluid-Modellierung	59
5.1	Allgemeine Strömungsmechanik	59
5.1.1	Erhaltungsgleichungen	59
5.1.2	Numerische Modellierung	61
5.1.3	Turbulenz	62
5.1.4	Wandwärmeübergang	64
5.2	Mehrphasenströmung.....	65
5.2.1	Freie Oberflächen	65
5.2.2	Strömungen mit disperser Phase	66
5.3	Fehleranalyse	68
5.3.1	Fehlertypen	69
5.3.2	Parameterstudien	70
5.4	Modellierung der Fluid-Strömung.....	72
5.4.1	Rotorwelleninnenströmung.....	72
5.4.2	Innenraum	72
5.4.3	Spalt zwischen Rotor und Stator	86
5.4.4	Wassermantel	99
5.5	Bewertung der Subsysteme	100
6	Systemintegration und Validierung.....	103
6.1	Subsystem-Integration	103

- 6.2 Elektromotorprüfstand 107
 - 6.2.1 Messtechnik und Fehleranalyse 107
 - 6.2.2 Wahl der Bewertungsmatrix 109
- 6.3 Validierung 111
 - 6.3.1 Auswertung und Diskussion..... 112
- 7 Zusammenfassung und Ausblick 121**
- Literaturverzeichnis 125
- Anhang 135
 - A.1 Stoffdaten..... 135
 - A1.1 ATF134FE 135
 - A1.2 Wasser-Ethylenglykol-Gemisch 136
 - A.2 Kühlkreisläufe der verwendeten PSM 137

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich verschiedener Kühlkonzepte	2
2.1	Verlustanteile in den Komponenten	7
2.2	Grundlegender Aufbau der verwendeten PSM	11
2.3	Fluidraum der verwendeten PSM	12
2.4	Thermische Absicherung elektrischer Maschinen	13
2.5	Prinzipdarstellung eines thermischen Netzwerks	13
3.1	Adaptiertes 3-Ebenen-Vorgehensmodell	21
3.2	Zieldefinition der Kühlkonzeptauslegung	23
3.3	Schematische Darstellung der relativen Strahlablenkung aufgrund der Rotation	28
3.4	Strahlzerfall der stehenden Düse	30
3.5	Filmdicke von Öl auf der rotierenden Scheibe	32
4.1	Detaillierungsstufen der Wickelkopfmodellierung	40
4.2	Definition der Drahrichtung innerhalb eines Wicklungsstrangs	41
4.3	Mikroskopische Aufnahme des Querschnitts der untersuchten Kup- fereinzugswicklung	42
4.4	Radiale und axiale Wärmeleitung der Kupfereinzugswicklung	43
4.5	Abstand zwischen Magnet und Rotorblechpaket aus der Struktur- berechnung	45
4.6	Definition der Kühlflächen	46
4.7	Nußelt-Zahl in rotierenden, durchströmten Rohren	47
4.8	Vereinfachtes Modell zur Bestimmung des Wärmeübergangs am Wickelkopf	48
4.9	Wärmeübergangskoeffizient an der Wickelkopfoberfläche	49
4.10	Variablen des Luftspalts	50
4.11	Sektormodell der PSM	51
4.12	Verlustverteilung im Sektormodell	53
5.1	Vereinfachtes Modell zur Analyse des Beschreibungswechsels	70
5.2	Zerlegung des Fluidraums in Teilbereiche	75
5.3	Rechengitter für die CFD-Simulation im Bereich des Strahls	76
5.4	CFD-Simulation der Strömung in rotierenden Düsen	77

5.5	Strahlbildung in der rotierenden Stufendüse	78
5.6	Übertrag von VOF nach LMP	79
5.7	CAD-Modell des elektrischen Transparent-Aggregats	81
5.8	Optische Analyse der Strömung in rotierenden Düsen	82
5.9	Fangring	83
5.10	Prinzipskizze des Aufbaus mit Lufteindüsung	83
5.11	Visualisierung der Mehrphasenströmung	85
5.12	Strömungsregime zwischen rotierenden Zylinder	86
5.13	Normiertes Schleppmoment am Prüfstand	88
5.14	Öl-Verteilung nach mehreren Umdrehungen mit $\phi_{\text{Öl,Start}} = 0.5$	89
5.15	Rechengitter für CFD-Simulation im Bereich des Luftspalts	90
5.16	Normiertes Drehmoment für verschiedene Öl-Anteile	91
5.17	Öl-Oberfläche bei 1000 min^{-1} und $\phi_{\text{Öl}} = 0.25$	91
5.18	Öl-Oberfläche bei 1000 min^{-1} und $\phi_{\text{Öl}} = 0.5$	92
5.19	Modellvorstellung der Luftspaltströmung	93
5.20	Datenstruktur des Spalt-Modells	95
5.21	Blockdiagramm des Spalt-Modells	95
5.22	Interpolationsschema der spezifischen Reibleistung	97
5.23	Interpolationsschema des spezifischen Wärmestroms am Rotor	98
5.24	Verteilung der Referenztemperatur des Wassermantels	99
6.1	Blockdiagramm der Systemsimulation	104
6.2	Messstellen im Elektromotor	108
6.3	Messstrategie	110
6.4	Temperaturverteilung in den Messebenen	111
6.5	Verlauf von Masse und Temperatur über den Umdrehungen	113
6.6	Komponententemperaturen in den Betriebspunkten mit 1000 min^{-1} und 41 min^{-1}	114
6.7	Komponententemperaturen in den Betriebspunkten mit 1000 min^{-1} und 81 min^{-1}	116
6.8	Komponententemperaturen in den Betriebspunkten mit 10000 min^{-1} und 41 min^{-1}	117
6.9	Komponententemperaturen in den Betriebspunkten mit 10000 min^{-1} und 81 min^{-1}	118
A2.1	Kühlkreisläufe der verwendeten PSM	137

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich elektrischer Maschinen	6
3.1	Räumliche Dimensionen verschiedener Komponenten	27
3.2	Abschätzung der Tropfengrößen am Rotationszerstäuber	31
4.1	Eigenschaften des PSM-Modells	36
4.2	Temperaturabhängige Wärmeleitung	44
4.3	Betriebspunkte zur Ermittlung der Schlüsselfaktoren	52
4.4	Einfluss der Solid-Modellierung auf die Bauteiltemperaturen	55
4.5	Einfluss der Wärmesenken auf die Bauteiltemperaturen.....	57
A1.1	Getriebeöl	135
A1.2	Wasser-Ethylenglykol-Gemisch	136

Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmaschine
Back-EMF	Back Electromotive Force
BP	Betriebspunkt
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate Heat Transfer
DNS	Direkte Numerische Simulation
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
GM	Gleichstrommaschine
GRM	geschaltete Reluktanzmaschine
HRIC	High-Resolution Interface Capturing
HV	Hochvolt
IFS	Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
LES	Large Eddy Simulation
LMP	Lagrangesche Mehrphasenbeschreibung
MAG	NdFeB-Magnete
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
PSM	permanentenerregte Synchronmaschine

RANS	Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen
RBP	Rotorblechpaket
SBP	Statorblechpaket
SW	Statoreinzugswicklung
VOF	Volume of Fluid
WEG	Wasser-Ethylenglykol-Gemisch

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Oberfläche	m^2
<i>a</i>	Beschleunigung	$m s^{-2}$
<i>B</i>	Induktion	T
b	spezifische Körperkraft	$N kg^{-1}$
<i>b</i>	Wärmeeindringkoeffizient	$JK^{-1} m^{-2} s^{-1/2}$
<i>C</i>	Wärmekapazität	JK^{-1}
<i>c</i>	spezifische Wärmekapazität	$J (kg K)^{-1}$
<i>cfl</i>	Courant-Zahl	-
<i>D</i>	Durchmesser	m
<i>d</i>	Diffusionszahl	-
D	Deformationsratentensor	s^{-1}
<i>F</i>	materialspezifischer Wert	$J s^{1/2} T^{-3/2} m^{-3}$
<i>f</i>	Frequenz	s^{-1}
F	Kraft	N
<i>g</i>	Gravitationsbeschleunigung	$m s^{-2}$
<i>h</i>	spezifische Enthalpie	$J kg^{-1}$
<i>I</i>	elektrische Stromstärke	A
I	Einheitstensor	-
<i>H_c</i>	Koerzitivfeldstärke	$A m^{-1}$
<i>k</i>	Formfaktor	-
<i>l_b</i>	Breite	m
<i>l_d</i>	Dicke	m
<i>l_h</i>	Höhe	m
<i>M</i>	Moment	Nm
<i>m</i>	Masse	kg
<i>\tilde{M}</i>	normiertes Drehmoment	-
<i>N</i>	Umdrehungen	-
<i>n</i>	Drehzahl	min^{-1}
<i>Nu</i>	Nußelt-Zahl	-
n	Normalenvektor	-

Oh	Ohnesorge-Zahl	-
P	Leistung	W
p	statischer Druck	Pa
\tilde{P}	normierte Verlustleistung	-
p_v	spezifische Verlustleistung	W kg ⁻¹
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	elektrischer Widerstand	Ω
r	Radius	m
Re	Reynolds-Zahl	-
R_{th}	thermischer Widerstand	K W ⁻¹
S	viskoser Teil des Spannungstensors	kg m ⁻¹ s ⁻²
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
Ta	Taylor-Zahl	-
t_K	Kontaktzeit	s
T^+	dimensionslose Temperatur	-
T	Spannungstensor	kg m ⁻¹ s ⁻²
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ s ⁻¹
V	Volumen	m ³
\mathbf{v}	Geschwindigkeitsvektor	m s ⁻¹
v	Geschwindigkeit	m s ⁻¹
W	volumetrische Wärmequellen/-senken	W m ⁻³
\mathbf{x}	Ortsvektor	m

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	W m ⁻² K ⁻¹
α_R	Temperaturbeiwert	K ⁻¹
β	Winkel	rad
δ	Filmdicke	m
η	Wirkungsgrad	-
κ	Temperaturleitfähigkeit	m ² s ⁻¹
λ	Wärmeleitfähigkeit	W (m K) ⁻¹
μ	dynamische Viskosität	kg (ms) ⁻¹
ν	kinematische Viskosität	m ² s ⁻¹
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad s ⁻¹