

Zur Analyse und Bewertung der Wärmeübertragung am Beispiel von elektrischen Generatoren

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Eng. Toni Eger

geb. am 23. Januar 1988 in Tübingen

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht
Prof. Dr.-Ing. Dominique Thévenin
Prof. Dr.-Ing. Heinz Herwig
Dr.-Ing. Thomas Bol

eingereicht am: 06. Dezember 2016

Promotionskolloquium am: 22. Mai 2017

Berichte aus der Strömungstechnik

Toni Eger

Zur Analyse und Bewertung der Wärmeübertragung

Am Beispiel von elektrischen Generatoren

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5470-5

ISSN 0945-2230

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

*"Probleme kann man niemals
mit derselben Denkweise lösen,
durch die sie entstanden sind"*

Albert Einstein

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH in Kooperation mit der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Mein großer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dominique Thévenin, für seine wertvollen Beiträge und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Neben den fachlich wertvollen Diskussionen wird mir Deine Wertschätzung und Herzlichkeit in bester Erinnerung bleiben. Herrn Prof. Herwig danke ich für die Übernahme des Korreferats und die einhergehende Durchsicht der Arbeit.

Ebenso möchte ich mich bei Dir Thomas bedanken. Du hast mich durch Deine Begeisterungsfähigkeit immer wieder vorangetrieben. Danke für Deine Inspiration, die ein wichtiger Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit war. Dir Rüdiger danke ich, dass Du mir immer den Rücken freigehalten hast.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungstechnik, besonders PD. Gábor Janiga, danke ich für die sehr freundliche Arbeitsatmosphäre sowie die fachlichen und persönlichen Gespräche.

Für den persönlichen Rückhalt geht ein großer Dank an Dich Karo, für Deine andauernde Unterstützung und die vielen schönen gemeinsamen Erlebnisse. Ich bin sehr glücklich Dich an meiner Seite zu wissen. Zuletzt möchte ich mich bei meiner Schwester Nicole und meinen Eltern bedanken. Meiner Mutter Beate für ihre unbegrenzte Liebe und Unterstützung. Du bist für mich ein großer Rückhalt und hattest immer ein offenes Ohr für mich. Zuletzt möchte ich meinem Vater Franz danken, der mir gezeigt hat, dass der Wille eines Menschen sprichwörtlich Berge versetzen kann und mir damit stets als Vorbild dient.

Kurzfassung

In vielen technischen Anwendungen, insbesondere bei elektrischen Antrieben, ist Kühlung ein mitentscheidendes Kriterium zur Erhöhung der Leistungsdichte. Die Verluste, die durch elektrische und/oder mechanische Widerstände am Bauteil entstehen, müssen an dessen Umgebung abgegeben und anschließend abtransportiert werden. Dadurch lassen sich Temperaturen reduzieren und das System kann mit höherer Profitabilität ausgelegt werden.

Die dabei zugrundeliegenden Vorgänge im fluiden Strömungsfeld sind Gegenstand der Forschung. Insbesondere bei dreidimensionalen Strömungen sind diese sehr komplex, wodurch umfangreiche Analysen zur Bewertung der Vorgänge experimentell schwer durchführbar sind. Durch den Einsatz numerischer Methoden der Strömungsmechanik (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) wird dies möglich.

Aus der Berechnung liefert die CFD für jeden Diskretisierungspunkt sechs physikalische Größen. Zur Analyse und Bewertung der Vorgänge sind jedoch meist Lage und Eigenschaft der einflussnehmenden Größen im Vorfeld unbekannt. Eine Auswertung aller Größen ist bei vielen technischen Anwendungen aufgrund der großen Menge an Informationen sehr zeitintensiv.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass relevante Einflussgrößen auf die Wärmeübertragung mit Hilfe physikalisch basierter Indikatoren berücksichtigt und dadurch zielgerichtete Analysen ermöglicht werden. Daraus ergeben sich innerhalb der Strömung dominierende Vorgänge, sowie Gebiete mit großem Potenzial zur Verbesserung der Wärmeübertragung. Abschließend erfolgt am Beispiel eines elektrischen Generators die Anwendung der Indikatoren zur Temperaturreduzierung mittels CFD-basierter Optimierungsmethoden (CFD-O) und einer Flächenvergrößerung im Potenzialgebiet.

Abstract

In many technical devices, and in particular electric drives, cooling is a crucial issue on the way toward increased power density. Losses caused by electrical and/or mechanical resistance have to be transferred to the ambient, and finally out of the system, in the form of heat. In this way, peak temperatures will be reduced and system profitability will increase.

This investigation considers the underlying processes inside the fluid flow fields. Those fields are very complex, in particular for real, three-dimensional flows. As a consequence, experimental studies of such processes are difficult, sometimes impossible. In the present work, numerical solutions are considered as a possible alternative, based on Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD calculations deliver six physical values for each discretization point. However, the actual position and the relevant property of the influencing variables are unknown at the beginning of the thermal analysis. For practical technical devices, evaluating systematically all variables would be extremely time-consuming, due to the huge data quantity associated to the flow.

This work shows that relevant influencing factors regarding heat accumulation can be obtained by means of physically-based indicators, then enabling a target-oriented analysis of the processes controlling heat transfer. In this manner, the controlling processes inside the flow field as well as regions with a high potential for enhancing heat transfer can be identified. Finally, these indicators are applied to an electric alternator system to reduce the temperature thanks to CFD-based Optimization (CFD-O), using additional surface areas of optimal shape inside regions with a high potential for optimization.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
Symbolverzeichnis	9
1 Einführung	15
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	16
1.2 Aufbau und Funktion von Kfz-Generatoren	18
1.3 Abgrenzung der Arbeit	22
1.4 Aufbau der Arbeit	25
2 Grundlagen	27
2.1 Grundgleichungen der Strömungsmechanik	28
2.1.1 Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung)	28
2.1.2 Impulserhaltung	28
2.1.3 Thermische Energiegleichung	29
2.1.4 Thermodynamische Zustandsgleichung	30
2.2 Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	30
2.2.1 Erster Hauptsatz: Energieerhaltung	31
2.2.2 Zweiter Hauptsatz: Energieentwertung	31
2.2.3 Schlussfolgerung	32
2.3 Grundlagen der Wärmeübertragung	33
2.3.1 Fouriersches Wärmeleitungsgesetz	34
2.3.2 Konvektive Wärmeübertragung	34
2.3.3 Dimensionslose Kennzahlen	36
2.4 Einführung in die Verweilzeitverteilung	39
2.4.1 Konzeptionelle Überlegung	39

2.4.2	Literaturstudie	40
2.4.3	Mathematische Beschreibung	40
2.4.4	Bezug zu technischen Anwendungen	42
2.5	Einführung in die Entropieproduktion	43
2.5.1	Konzeptionelle Überlegung	43
2.5.2	Literaturstudie	45
2.5.3	Mathematische Beschreibung	47
2.5.4	Bezug zu technischen Anwendungen	50
3	Numerische Modellierung	51
3.1	Berechnen des Stromfeldes	52
3.1.1	Physikalische Annahmen	52
3.1.2	Turbulenzmodelle	54
3.1.3	Räumliche Diskretisierung	56
3.2	Validierung und Verifizierung	58
3.2.1	Grundlagen der Validierung und Verifizierung	58
3.2.2	Gitter-Konvergenz-Index-(GCI-)Methode	60
3.3	Verwendete Entwicklungswerkzeuge	63
3.3.1	OPTimization Algorithm Library++ (OPAL++)	63
3.3.2	Vollmodell elektrischer Generator	64
3.3.3	Modellansatz <i>Virtual Channel</i> (V-Channel)	66
3.4	Implementieren physikalisch basierter Indikatoren	69
3.4.1	Verweilzeitverteilung	69
3.4.2	Entropie-Bilanzgleichung	70
4	Entwicklung einer allgemeingültigen Konfiguration	75
4.1	Konzeptionelle Überlegung	76
4.2	Aufbau der Konfiguration	79
4.3	Verwendung für die Entwicklung physikalisch basierter Indikatoren	81
4.4	Numerisches Modell der Konfiguration	82
4.4.1	Geometrischer Aufbau	82

4.4.2	Verwendete Rechengitter	84
4.4.3	Definierte Randbedingungen	86
4.4.4	Erweiterte numerische Modellierung	87
4.5	Analyse von Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern	88
4.5.1	Flächenbezogene Analyse	88
4.5.2	Differenzielle Analyse	90
4.5.3	Schlussfolgerung	92
4.6	Die Nußelt-Zahl als Indikator	93
4.6.1	Code-Verifizierung	93
4.6.2	Gitterunabhängigkeitsstudie	95
4.6.3	Flächengemittelte Analyse	96
4.6.4	Bewertung als Indikator	97
5	Analyse und Bewertung mittels Verweilzeitverteilung	101
5.1	Code-Verifizierung	102
5.1.1	Gerichtete Strömungen	102
5.1.2	Ungerichtete Strömungen	106
5.2	Gitterunabhängigkeitsstudie	108
5.3	Integrale Analyse der Verweilzeitverteilung	110
5.4	Differenzielle Analyse der Verweilzeitverteilung	113
5.5	Vergleich verschiedener Gittertypen	115
5.6	Bewertung als Indikator	118
6	Analyse und Bewertung mittels Entropieproduktion	121
6.1	Code-Verifizierung	122
6.1.1	Innenströmungsvorgänge	122
6.1.2	Umströmungsvorgänge	125
6.2	Gitterunabhängigkeitsstudie	129
6.3	Integrale Analyse der Entropieproduktion	131
6.3.1	Dimensionslose Entropieproduktion aufgrund von Dis- sipation	132

6.3.2	Dimensionslose Entropieproduktion aufgrund von Wärmeleitung	133
6.3.3	Dimensionslose Gesamtentropieproduktion	135
6.3.4	Irreversibilitätsverhältnisse	139
6.3.5	Schlussfolgerung	141
6.4	Differenzielle Analyse der Entropieproduktion	142
6.4.1	Entropieproduktion aufgrund von Dissipation	143
6.4.2	Entropieproduktion aufgrund von Wärmeleitung	144
6.4.3	Gesamtentropieproduktion	144
6.4.4	Schlussfolgerung	145
6.5	Vergleich verschiedener Gittertypen	147
6.6	Optimierung der Konfiguration	148
6.6.1	Aufbau der Optimierung	148
6.6.2	Ergebnis der Optimierung	150
6.6.3	Rückschlüsse aus der Optimierung	152
6.7	Bewertung als Indikator	157
7	Anwendung der Indikatoren am elektrischen Generator	159
7.1	Gitterunabhängigkeitsstudie	160
7.2	Verbesserung der Wärmeübertragung	162
7.2.1	Analyse und Bewertung der Wärmeübertragung	163
7.2.2	Verbesserung durch Positionsoptimierung	166
7.2.3	Verbesserung durch Flächenvergrößerung	169
7.2.4	Zusammenfassung der Verbesserungen	174
7.3	Turbulenzstudie	176
7.4	Anwendung am Vollmodell	179
7.5	Schlussfolgerung	183
8	Zusammenfassung und Ausblick	185
8.1	Zusammenfassung	186
8.2	Ausblick	189
	Literaturverzeichnis	193

Eigene Publikationen

209

(Mit-)Betreute Masterarbeiten

211