

Mihály Németh-Csóka

# Thermisches Management elektrischer Maschinen

Messung, Modell und Energieoptimierung

**EBOOK INSIDE**

 Springer Vieweg

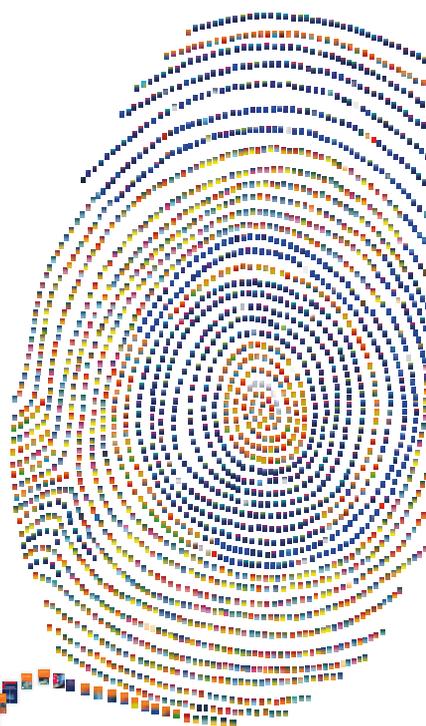
---

# Thermisches Management elektrischer Maschinen

# Lizenz zum Wissen.

Sichern Sie sich umfassendes Technikwissen mit Sofortzugriff auf tausende Fachbücher und Fachzeitschriften aus den Bereichen: Automobiltechnik, Maschinenbau, Energie + Umwelt, E-Technik, Informatik + IT und Bauwesen.

Exklusiv für Leser von Springer-Fachbüchern: Testen Sie Springer für Professionals 30 Tage unverbindlich. Nutzen Sie dazu im Bestellverlauf Ihren persönlichen Aktionscode **C0005406** auf [www.springerprofessional.de/buchaktion/](http://www.springerprofessional.de/buchaktion/)



Jetzt  
30 Tage  
testen!

## Springer für Professionals.

Digitale Fachbibliothek. Themen-Scout. Knowledge-Manager.

-  Zugriff auf tausende von Fachbüchern und Fachzeitschriften
-  Selektion, Komprimierung und Verknüpfung relevanter Themen durch Fachredaktionen
-  Tools zur persönlichen Wissensorganisation und Vernetzung

[www.entschieden-intelligenter.de](http://www.entschieden-intelligenter.de)

Springer für Professionals

 Springer

---

Mihály Németh-Csóka

# Thermisches Management elektrischer Maschinen

Messung, Modell und Energieoptimierung

 Springer Vieweg

Mihály Németh-Csóka  
Erlangen, Deutschland

ISBN 978-3-658-20132-6

ISBN 978-3-658-20133-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20133-3>

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, ein Teil von Springer Nature 2018

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 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

Thermische Abhängigkeiten können ebenso unerwartet wie selbstverständlich bei der Berechnung oder Modellierung elektrischer Maschinen auftreten. Sie verhalten sich in etwa so, wie die Zahlen „ $\pi$ “ oder „ $e$ “: Es erstaunt niemanden, wenn sie bei mathematischen Berechnungen in Situationen auftreten, die weitab ihres Einflussgebietes liegen. Die Häufigkeit des Auftretens dieser Phänomene ist faszinierend.

Dieses Buch sammelt die immer wieder erscheinenden Aspekte der Wärmebildung und der dadurch verursachten Änderung der Temperatur in industriell eingesetzten Elektromaschinen. Die Folgen sind oft vernachlässigbar, aber manchmal beeinflussen sie die Prozesse erheblich oder gefährden sogar den normalen Betrieb.

Das Buch soll einen breiten Leserkreis aus dem Fachgebiet der Antriebstechnik ansprechen. Mein Ziel ist es, nicht nur den theoretischen Hintergrund der thermischen Themen zusammenzufassen, sondern auch praxisrelevante Lösungen anzubieten.

Meinen Kollegen bin ich für anregende Diskussionen, wertvolle Vorschläge und zeitraubende Messungen sehr dankbar.

Einen besonderen Dank verdienen meine drei Kinder. Neben ihren studentischen Tätigkeiten haben sie sich untereinander aufgeteilt, um nach unkonventionellen rechtschreibtechnischen Lösungen in dem Manuskript zu suchen und sie zu korrigieren.

Als Reaktion auf zwischenzeitliche Verzweiflung, welche wahrscheinlich viele Buchautoren trifft (... liest das überhaupt jemand?), hat meine Frau (Schwerpunkt Gartengestaltung) das Buch komplett gelesen. Ihr gilt meine Hochachtung.

Ohne die aktive Unterstützung meines Arbeitgebers wäre dieses Buch nie erschienen. Der Inhalt stammt zum größten Teil aus meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur der Antriebstechnik bei der Siemens AG.

Um das Konzept des Buches weiterentwickeln zu können, freue ich mich über Rückmeldungen.

Erlangen, Herbst 2017

Mihály Németh-Csóka

---

# Abkürzungen

## Formelzeichen

$\alpha$	Temperaturkoeffizient
$\eta$	Wirkungsgrad
$\tau$	thermische Zeitkonstante, Zeit
$\omega$	Kreisfrequenz
$\vartheta$	Temperatur, Übertemperatur
$\Lambda$	thermischer Leitwert
$\psi$	Fluss, Flussbetrag
$\Omega$	Ohm
$\underline{A}$	Systemmatrix
$a$	Anker
$A$	Abnutzung
$B$	magnetische Flussdichte
$c$	massenbezogene thermische Kapazität
$C$	Kapazität (elektrisch oder thermisch)
$f$	Frequenz
$H$	magnetische Feldstärke
$i, I$	Strom
$k$	allgemeiner Faktor
$k_T$	temperaturabhängiger Faktor zwischen Strom und Drehmoment bei Synchronmaschinen
$L$	Induktivität (nach Lenz), Lebensdauer
$m, M$	Drehmoment, Masse
$t$	Zeit
theta	Temperatur, Übertemperatur
$P$	Leistung (elektrisch oder thermisch)
$R$	Widerstand (elektrisch oder thermisch)
$\underline{T}$	Temperaturvektor
$u, U$	Spannung

**Indizes**

0	erwarteter Wert (Lebensdauer), Stillstand (Strom, Drehmoment)
20 °C	bei 20 °C
95 %	95 % des Endwertes
$\infty$	eingeschwungener Zustand
$\sigma$	Streuung
$\tau$	Zeitkonstantenverhältnis
c	Eisen(verlust) nach „core“
cu	Kupfer („cuprum“)
d	direkt (in der Flussrichtung)
delay	Verzögerung
e	elektrisch, „Exzess“
fe	Eisen („ferrum“)
h	Hysterese, Haupt(induktivität)
in	Eingang
ist	Ist-Wert
kr	kritisch
<i>I</i>	Stromverhältnis (Überstrom, Grenzstrom)
l	Lüftung
m	Haupt(induktivität) („main“)
mech	mechanisch (Verlust)
mess	Messwert
modell	Modell
n	Nennpunkt, Bemessungspunkt
<i>n</i>	Zählerwert
out	Ausgang
s	Stator, Ständer
schnitt	Schnittpunkt
q	quer (senkrecht auf die Flussrichtung)
r	Rotor, Läufer, relative (Temperatur)
ref	„Referenz“
sensor	Sensor
soll	Soll-Wert
t	Zeit
T	temperaturabhängig, Abtastzeit
th	thermisch
u	Umgebung
umg	Umgebung
V, verl	Verlust
w	Wirbelstrom
zusatz	Zusatzverlust

**Abkürzungen**

DC	<b>D</b> irect <b>C</b> urrent, Gleichstrom
ME	<b>M</b> aximale <b>E</b> ffizienz
MTA	<b>M</b> aximum <b>T</b> orque per <b>A</b> mpere
MTPC	<b>M</b> aximum <b>T</b> orque <b>p</b> er <b>C</b> urrent
NTC	<b>N</b> egative <b>T</b> emperature <b>C</b> oefficient
PTC	<b>P</b> ositive <b>T</b> emperature <b>C</b> oefficient
PESM	<b>P</b> ermanent <b>E</b> rregte <b>S</b> ynchron <b>m</b> aschine
PWM	<b>P</b> ulse <b>W</b> idth <b>M</b> odulation

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
<b>2</b>	<b>Die verschiedenartigen thermischen Aspekte</b>	3
2.1	Schutzfunktionen	4
2.1.1	Wicklungsschutz	4
2.1.2	Reduzierung der Alterung der Isolation	6
2.1.3	Brand- und Rauchschutz	7
2.1.4	Umgebungsschutz	7
2.1.5	Lagerschutz	8
2.1.6	Berührungsschutz	8
2.1.7	Schutz vor Entmagnetisierung	9
2.1.8	Werkzeugschutz	9
2.2	Regelungstechnische Funktionen	10
2.2.1	Onlineadaption der Widerstände	10
2.2.2	Adaption der Drehmomentkonstante $k_T$	11
2.3	Wirkungsgradoptimierung	12
2.4	Motorauslegung	13
	Literatur	14
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	15
3.1	Verlustleistungen	15
3.1.1	Kupferverluste	17
3.1.2	Eisenverluste	21
3.1.3	Mechanische Verluste	25
3.1.4	Zusatzverluste	26
3.1.5	Sonstige, nicht für Motoren relevante Verluste	27
3.1.6	Messung der Verlustleistungen	27
3.2	Wärmeübertragung	28
3.2.1	Wärmeströmung (Konvektion)	29
3.2.2	Wärmeleitung (Konduktion)	29

3.2.3	Wärmeübergabe durch Phasenwechsel	30
3.2.4	Wärmestrahlung	30
3.3	Nennbetriebsarten	31
3.4	Isolationsklassen	32
3.5	Wirkungsgradklassen	36
3.5.1	Messung des Wirkungsgrads	38
3.6	Grenzkennlinien	38
3.6.1	Besonderheiten bei langsam drehender/stehender Maschine	38
	Literatur	42
<b>4</b>	<b>Temperaturmessung</b>	<b>43</b>
4.1	Messung mit eingebautem Sensor	45
4.1.1	Kontinuierliche Charakteristik	45
4.1.2	Diskontinuierliche Charakteristik	49
4.2	Berechnung aus dem gemessenen Wicklungswiderstand	50
4.3	Berechnung aus dem Motormodell	50
	Literatur	52
<b>5</b>	<b>Thermisches Modell</b>	<b>53</b>
5.1	Allgemeine Aspekte der Modellierung	54
5.2	Einkörpermodell	57
5.2.1	Ersatzschaltbild des Einkörpermodells	57
5.2.2	Lineare Differenzialgleichung des Einkörpermodells	59
5.2.3	Nichtlineare Differenzialgleichung des Einkörpermodells	60
5.2.4	Parametrierung mit Zeitkonstante	62
5.2.5	Parametrierung mit Grenzbelastungskennlinie	65
5.2.6	Umrechnung von Zeitkonstante in Grenzbelastungskennlinie	67
5.2.7	Umrechnung von der Grenzbelastungskennlinie nach Zeitkonstante	69
5.2.8	Schätzung der Zeitkonstante aus dem Nenndrehmoment	71
5.3	Zweikörpermodell	73
5.3.1	Ersatzschaltbild des Zweikörpermodells	73
5.3.2	Lineares Differenzialgleichungssystem des Zweikörpermodells	75
5.3.3	Nichtlineares Differenzialgleichungssystem des Zweikörpermodells	77
5.3.4	Stabilitätsgrenze des nichtlinearen Differenzialgleichungssystems	79
5.4	Dreikörpermodell	81
5.4.1	Ersatzschaltbild des Dreikörpermodells	81
5.4.2	Aufbau des Blockschaltbildes aus dem Ersatzschaltbild auf Grundlage von physikalischen Überlegungen (nach G. Heinle)	82
5.4.3	Lineares Differenzialgleichungssystem des Dreikörpermodells	85
5.4.4	Nichtlineares Differenzialgleichungssystem des Dreikörpermodells	88

5.5	Motoren mit Getriebe . . . . .	90
5.5.1	Ersatzschaltbild des Motor-Getriebe-Modells . . . . .	91
5.5.2	Lineares Differenzialgleichungssystem des Motor-Getriebe-Modells . . . . .	91
5.6	Motoren mit mehreren Körpern . . . . .	93
	Literatur . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Modellunterstützung durch Temperaturmessung</b> . . . . .	<b>95</b>
6.1	Motoren mit Temperaturmessung im Positionsgeber . . . . .	96
6.1.1	Modellstabilisierung im Betrieb . . . . .	97
6.1.2	Unterstützung der Modellinitialisierung . . . . .	98
6.1.3	Untere Begrenzung der Modelltemperaturen . . . . .	98
6.2	Temperaturmessung als Modellunterstützung . . . . .	100
6.2.1	Simulation des Modells mit Unterstützung von Temperaturmessung . . . . .	100
6.2.2	Messergebnisse des Modells mit Unterstützung von Temperaturmessung . . . . .	103
6.3	Temperaturberechnung an beliebigen Stellen einer Maschine . . . . .	105
	Literatur . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Wirkungsgradoptimierung</b> . . . . .	<b>107</b>
7.1	Wirkungsgradoptimierung durch Flussanpassung . . . . .	109
7.2	Optimierungskriterien . . . . .	109
7.2.1	Maximalstelle der Wirkungsgradfunktion . . . . .	110
7.2.2	Maximales Drehmoment pro Ampere (MTA) . . . . .	111
7.2.3	Vergleich von Kupfer- und Eisenverlusten . . . . .	113
7.2.4	Minimaler Strombetrag . . . . .	113
7.3	Eingriffsmöglichkeiten . . . . .	113
7.3.1	Direktes Einregeln des Betriebspunktes . . . . .	114
7.3.2	Berechnung des Flusssollwertes aus dem Motormodell . . . . .	114
7.3.3	Suchfunktion . . . . .	115
7.4	Abschätzung des Einsparpotenzials . . . . .	115
7.5	Optimierung durch Verlustreduzierung . . . . .	118
7.5.1	Theoretischer Hintergrund . . . . .	118
7.5.2	Messtechnische Verifizierung . . . . .	119
7.5.3	Realisierung der Verlustreduzierung . . . . .	120
7.5.4	Dynamische Eigenschaften der Verlustoptimierung . . . . .	122
7.6	Vergleich der unterschiedlichen Optimierungsmethoden . . . . .	127
	Literatur . . . . .	128
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>129</b>

# Einführung

# 1

## Worum geht es überhaupt?

Grundlegende theoretische Überlegungen zu thermischen Aspekten von Elektromaschinen sind in vielen Fachbüchern bereits beschrieben. In diesem geht es darum, praktische Wege aufzuzeigen, mit denen die beschriebene Theorie in der Praxis rasch umsetzbar ist.

Der Inhalt des Buches gilt der industriell eingesetzten elektrischen Maschine, worunter man drehende Maschinen (Motoren) verschiedener Art und Transformatoren versteht. Da die Anzahl der direkt am Versorgungsnetz angeschlossenen Motoren gegenüber den umrichtergespeisten Motoren kontinuierlich sinkt, werden in erster Linie umrichtergespeiste Motoren behandelt. Alle aufgeführten Beispiele beziehen sich auf Asynchronmaschinen im Industrieinsatz, Ausnahmen werden besonders vermerkt.

Von den aufgelisteten Anwendungsmöglichkeiten werden die thermische Modellierung und die Verlustoptimierung vorrangig herausgearbeitet. Bei den anderen Themen sind die grundlegenden Informationen zusammengefasst, dabei wird auf die relevante Literatur hingewiesen.

Die beschriebenen elektrischen Maschinen werden, um die Lesbarkeit zu erleichtern, an einigen Stellen etwas umgangssprachlich Motoren genannt, auch wenn der Zustand „Motor“ gegenüber „Generator“ nicht mit dem Gegenstand „Maschine“ zu verwechseln ist.

Ebenso wird der Begriff „Läuferflussbetrag“ gehandhabt: Die Benennung ist „Flussbetrag“ oder „Fluss“.

Die Schreibweise der Modellbenennung hat sich in der Fachliteratur noch nicht herauskristallisiert. Die Modelle werden als Einkörpermodell, Zweikörpermodell usw. bezeichnet.

Bei der Beschreibung von indexierten Größen werden zwei gleichrangige Schreibweisen benutzt: die sogenannte „professionale“, wie z. B.  $i_d$ , oder die „lineare“, wie z. B.  $i\_d$ .

Mit den Berechnungen und Auswertungen werden vorrangig pragmatische Lösungen angeboten.

# Die verschiedenartigen thermischen Aspekte

# 2

## Wozu der ganze Aufwand?

### Zusammenfassung

Die Vielseitigkeit thermischer Aspekte in einer Elektromaschine wird anhand der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten deutlich. Neben den klassischen Problemfeldern wie der Wicklungserwärmung, der Alterung der Isolation oder der Motorauslegung gibt es noch zahlreiche weitere Bereiche der Antriebstechnik, die eine wichtige Rolle im Rahmen thermischer Abhängigkeiten spielen.

In der Feldorientierung ist die Onlineidentifikation der Ständer- und Läuferwiderstände und des Drehmomentkoeffizienten mittlerweile die Basis für eine dem Stand der Entwicklung gemäße Regelung. Mit unterschiedlichen Arten von thermischen Motormodellen können nicht nur die Wicklung, sondern auch andere Teile einer Maschine wie die Lager, die Magnete, die Oberfläche oder sogar mechanisch angekoppelte, angrenzende Bereiche ständig überwacht werden. Die thermischen Motormodelle, welche alle relevanten Verluste in der Maschine kontinuierlich berechnen, ermöglichen es durch Steuerung des Flussbetrages als „Nebenprodukt“ ohne aufwendigere Parametrierung auch einen wirkungsgradoptimierten Betrieb zu erzielen.

Weshalb thermische Aspekte bei elektrischen Maschinen so wichtig sind, ist nicht sofort zu erkennen. Oft scheinen sie zweitrangig zu sein oder sind teilweise gar nicht bekannt. Man neigt dazu, die damit verbundenen Ungenauigkeiten, Gefahren oder Möglichkeiten zu unterschätzen.

Fast alle elektrischen, mechanischen oder magnetischen Stoffeigenschaften sind temperaturabhängig. Entscheidend ist, in welchem Maße diese Temperaturabhängigkeiten in den praxisrelevanten Temperaturbereichen die Prozesse in den elektrischen Maschinen beeinflussen.

Wichtige Grundlagenbücher der Antriebstechnik beinhalten meist nur ein kurzes Kapitel über Wärmelehre, wie zum Beispiel in [5]. Dies zeigt offensichtlich, dass das Thema