

Martin Henger

# Zur Betriebsfestigkeit elektrischer Maschinen in Elektro- und Hybrid- fahrzeugen

**RESEARCH**

 **Springer Vieweg**

---

# **Zur Betriebsfestigkeit elektrischer Maschinen in Elektro- und Hybrid- fahrzeugen**

---

Martin Henger

# Zur Betriebsfestigkeit elektrischer Maschinen in Elektro- und Hybrid- fahrzeugen

Mit einem Geleitwort von  
Dr. Stephan Usbeck und Dr. Rüdiger Schroth

 Springer Vieweg

**RESEARCH**

Martin Henger  
Tamm, Deutschland

Vom Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation, 2012.

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Hanselka  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht

Tag der Einreichung: 8. März 2012  
Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juni 2012

D 17

ISBN 978-3-658-00706-5  
DOI 10.1007/978-3-658-00707-2

ISBN 978-3-658-00707-2 (eBook)

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 2013

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Geleitwort

Klimawandel und Ressourcenschonung durchdringen seit Anfang des neuen Jahrtausends in zunehmendem Maße die gesellschaftliche Diskussion und verändern konsequenterweise die Forschungsausrichtung und -förderung an Hochschulen und Universitäten sowie in der Industrie. Nicht nur die klassischen Bereiche der Automobilindustrie und Antriebstechnik sind von diesen Veränderungen betroffen, es bedarf auch neuer Konzepte in der Energieversorgung bis hin zur Gestaltung von Infrastrukturprojekten in Städten und Gemeinden.

Die Elektrifizierung von Personen- und Nutzlastverkehr ist ein vielversprechender Beitrag zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes vor allem in innerstädtischen Gebieten und bietet vielfältige Möglichkeiten, mit innovativen Produkten neue Marktchancen zu erschließen. Die Automobilindustrie und deren Zulieferer sind dabei ein Vorreiter bei der Bereitstellung nachhaltiger Antriebslösungen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Zahlreiche Topologien von Mild-, Strong- über Plugin-Hybrid bis hin zu reinen Elektroantrieben sind bereits marktreif verfügbar. Unabhängig von der gewählten Fahrzeugtopologie ist stets die elektrische Maschine die zentrale Einheit, welche den motorischen und generatorischen Leistungsumsatz realisiert. Kombiniert mit moderner Leistungselektronik und Regelungstechnik erleben lange bekannte E-Maschinenkonzepte eine Renaissance als Antriebseinheit. Allerdings stellt der Einsatz im Fahrzeug auch neue Anforderungen an den Elektromotor, die einer tiefgehenden Analyse und Durchdringung bedürfen.

Mit den Auswirkungen dieser neuen Anforderungen beschäftigt sich Herr Henger in seiner Dissertation. Er entwickelt Methoden zur rechnerischen Beschreibung der Belastungen aus elektromagnetischen, eigenerregten Schwingungen, sowie mechanischen, fremderregten Rotor-Lager Schwingungen in axialer Richtung. Auf Basis dieser Methoden stellt er die Belastungen der elektrischen Maschine bei verschiedenen Fahrprofilen den derzeit gültigen Erprobungsvorgaben gegenüber und bewertet diese hinsichtlich ihres Einflusses auf die Betriebsfestigkeit. Neben der tiefen theoretischen Analyse zur Beschreibung der verschiedenen Belastungsarten stellt insbesondere der Bezug zu numerischen Berechnungsansätzen und experimentellen Ergebnissen eine wertvolle Bereicherung für diese Fachdisziplin dar. Die Anwendung der erarbeiteten Methoden auf den realen Belastungsfall eines Hybridfahrzeugs verdeutlicht schließlich die unmittelbare Praxistauglichkeit der Erkenntnisse.

Aufgrund dessen wünschen wir der Arbeit sowohl in der Wissenschaft, als auch in der Industrie eine hohe Aufmerksamkeit und dem Leser eine interessante Lektüre.

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH im Bereich der Entwicklung elektrischer Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge sowie während meiner anschließenden Tätigkeit als Entwicklungsingenieur für aktive Generatoren.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Holger Hanselka, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die fortwährende Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Neben vielen fachlichen Diskussionen und wertvollen Anregungen, welche zum Gelingen der Arbeit beitrugen, sind mir insbesondere der faire und motivierende Charakter unserer Gespräche in bester Erinnerung.

Herrn Prof. Dr. Stephan Rinderknecht danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats, das gezeigte Interesse und die eingehende Durchsicht meiner Arbeit.

Besonders danken möchte ich meinem fachlichen Betreuer innerhalb der Robert Bosch GmbH, Dr. Rüdiger Schroth, für seinen Einsatz, auch außerhalb der Arbeitszeit, die interessanten Anregungen und die fachliche und persönliche Unterstützung.

Dr. Stephan Usbeck und Dr. Joachim Bös danke ich für die Betreuung und die Hilfestellung in allen organisatorischen Belangen meiner Arbeit.

Bei meinen ehemaligen Kollegen möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit, die freundliche Arbeitsatmosphäre und die stete Hilfsbereitschaft bedanken. Stellvertretend erwähnen möchte ich Serge Zambou, Dr. Farshid Karim Pour, Vincent Riou und Dr. Stefan Einbock, welche mir mit interessanten Anregungen, konstruktiver Kritik und fachkundiger Unterstützung bei verschiedenen Themenschwerpunkten zur Seite standen.

Für den persönlichen Rückhalt im privaten Umfeld geht ein großer Dank an meine Familie und Freunde. Insbesondere danke ich meinen Eltern für Ihren Rückhalt und Ihre Unterstützung in meinem akademischen Werdegang. Der größte Dank gilt jedoch Dir, Kathrin, die Du mir durch Deine fortwährende Liebe, Unterstützung und Geduld diese Arbeit und so viel mehr erst ermöglicht hast.

*„Nihil difficile amanti“* [CICERO]

Martin Henger

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Formelzeichen	XIX
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Rotor-Lager-Systeme . . . . .	4
2.1.1 Aufbau von Wälzlagern . . . . .	5
2.1.2 Modellierung des Rillenkugellagers . . . . .	5
2.1.3 Schwingungen des Rotor-Lager-Systems . . . . .	7
2.2 Elastische Mehrkörpersimulation . . . . .	8
2.2.1 Beschreibung starrer Körper . . . . .	9
2.2.2 Beschreibung elastischer Körper . . . . .	9
2.2.3 Reduktionsverfahren . . . . .	10
2.3 Elektromagnetische Kräfte in mechanischen Strukturen . . . . .	13
2.4 Methoden der rechnerischen Betriebsfestigkeit . . . . .	14
2.4.1 Nennspannungskonzept . . . . .	15
2.4.2 Hypothesen der linearen Schadensakkumulation . . . . .	16
<b>3 Elektromagnetisch erregte Schwingungen</b>	<b>19</b>
3.1 Physikalische Beschreibung elektromagnetischer Kräfte . . . . .	19
3.1.1 Berechnung elektromagnetischer Kräfte . . . . .	20
3.1.2 Analytische Beschreibung der Zugspannungswellen . . . . .	22
3.2 Implementation elektromagnetischer Kräfte . . . . .	24
3.2.1 Modale Kräfte . . . . .	24
3.2.2 Anwendung am $N$ -Massen-Schwinger . . . . .	25
3.2.3 Ergebnisse am $N$ -Massen-Schwinger . . . . .	27
3.3 Implementation der Kräfte in ein Maschinenmodell . . . . .	30
3.3.1 Berechnung elektromagnetischer Kräfte im Luftspalt . . . . .	31
3.3.2 Modellierung des elastischen Mehrkörpersystems . . . . .	31

3.3.3	Implementation der berechneten Kräfte . . . . .	32
3.3.4	Prüfaufbau . . . . .	33
3.3.5	Vergleich von Messung und Berechnung . . . . .	34
3.4	Ergebnis . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Rotor-Lager-Schwingungen</b>	<b>39</b>
4.1	Modellbildung des Rotor-Lager-Systems . . . . .	43
4.2	Lösen der Systemgleichung im Frequenzbereich . . . . .	47
4.2.1	Harmonische Balance-Methode . . . . .	47
4.2.2	Ergebnis der harmonischen Balance-Methode . . . . .	52
4.2.3	Einflussanalyse . . . . .	54
4.2.4	Höher Harmonische Balance-Methode . . . . .	56
4.2.5	Ergebnis der höher harmonischen Balance-Methode . . . . .	58
4.3	Lösen der Systemgleichungen im Zeitbereich . . . . .	65
4.3.1	Erweiterte Dämpfungsbetrachtung . . . . .	65
4.3.2	Ergebnis . . . . .	66
4.4	Parameterabgleich und Vergleich mit Messwerten . . . . .	70
4.4.1	Messaufbau und Durchführung . . . . .	71
4.4.2	Ergebnis der Messung . . . . .	72
4.4.3	Abgleich der Berechnungsparameter . . . . .	74
4.5	Ergebnis . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Schwingungen der Anbauposition</b>	<b>79</b>
5.1	Fahrzeugmessung im Standardlastfall . . . . .	79
5.2	Fahrzeugmessung im Sonderlastfall . . . . .	83
5.2.1	Autobahnfahrt . . . . .	83
5.2.2	Beschleunigungsfahrt . . . . .	84
5.2.3	Schlechtwegstrecken . . . . .	85
5.3	Kombination der Lastfälle . . . . .	87
5.4	Normprofil elektrischer Komponenten im Kraftfahrzeug . . . . .	89
5.4.1	Quantitativer Vergleich . . . . .	90
5.4.2	Qualitativer Vergleich . . . . .	91
5.5	Ergebnis . . . . .	95



---

<b>6</b>	<b>Zur Betriebsfestigkeit der elektrischen Maschine und deren Erprobung</b>	<b>97</b>
6.1	Einfluss elektromagnetischer Kräfte . . . . .	97
6.2	Einfluss axialer Rotor-Lager-Schwingungen . . . . .	98
6.2.1	Axiale Rotor-Lager-Schwingungen im Fahrzeug . . . . .	98
6.2.2	Axiale Rotor-Lager-Schwingungen im Normprofil . . . . .	101
6.3	Vergleich dynamischer Belastungen . . . . .	103
6.3.1	Vergleichsmethode . . . . .	103
6.3.2	Fahrzeug und Normprofil: Auswirkungen auf die Belastung . . . . .	104
6.3.3	Bedeutung des Vergleichs für die Definition des Normprofils . . . . .	106
6.4	Maßnahmen zur Reduktion der Belastung . . . . .	107
6.5	Lebensdauer der elektrischen Maschine . . . . .	109
<b>7</b>	<b>Ergebnis und Ausblick</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Komponenten des elektrischen Triebstrangs . . . . .	4
2.2	Lagerbauarten . . . . .	5
2.3	Beschreibung starrer Körper . . . . .	9
2.4	Beschreibung elastischer Körper . . . . .	10
2.5	Wöhlerkurve . . . . .	16
3.1	Skizze eines Ständers . . . . .	20
3.2	Darstellung des Spannungstensors . . . . .	21
3.3	Drehmomentberechnung im Luftspalt . . . . .	21
3.4	Ortsabhängige, radiale Spannungen im Luftspalt . . . . .	22
3.5	Zeitabhängige, radiale Spannungen im Luftspalt . . . . .	23
3.6	Darstellung einer Spannungswelle im Luftspalt . . . . .	24
3.7	Modale Kräfte . . . . .	25
3.8	Ungedämpfter Biegebalken . . . . .	26
3.9	Magnetposition zur Anregung des Schwingungssystems . . . . .	26
3.10	Schwingung der mittleren Punktmasse . . . . .	28
3.11	Vergleich der Ergebnisse aus nodaler und modaler Berechnung . . . . .	29
3.12	Querschnitt von Rotor und Stator . . . . .	31
3.13	Hybrides MKS-Modell der elektrischen Maschine auf einem Prüfstand . . . . .	32
3.14	Iterationsschema des Solvers zur Implementation elektromagnetischer Kräfte . . . . .	32
3.15	Versuchsaufbau zur Messung elektromagnetisch erregter Schwingungen . . . . .	33
3.16	Vergleich von Messung und Simulation im Zeitbereich . . . . .	34
3.17	Vergleich von Messung und Simulation im Frequenzbereich . . . . .	35
3.18	Vergleich von Messung und Simulation im Frequenzbereich . . . . .	36
3.19	Vergleich der Schwingungen mit an- und abgekoppelter Lastmaschine . . . . .	37
4.1	Radiale und axiale Komponente der Steifigkeit im Wälzlager . . . . .	41
4.2	Axiale Transversalschwingungen in Rotor-Lager-Systemen . . . . .	43
4.3	Abbildung des Elektromotors eines Hybridantriebs . . . . .	44
4.4	Kontaktwinkel $\alpha$ in Abhängigkeit einer axialen Verschiebung . . . . .	45
4.5	Mechanisches Ersatzmodell in axialer Richtung der elektrischen Maschine . . . . .	46
4.6	$N$ -Feder-Modell . . . . .	48

4.7	Wirkungsbereich einer Feder $i$ innerhalb einer Periode. . . . .	51
4.8	Amplitude und Phase der Rotorschwingung im starren Lagerschild . . . . .	53
4.9	Parameter der Resonanzkurve . . . . .	55
4.10	Resonanzkurve des Rotors $x_R$ . . . . .	59
4.11	Resonanzkurve des Lagerschildes $x_{LS}$ . . . . .	59
4.12	Phasenportrait der Rotorschwingung . . . . .	62
4.13	Phasenportrait der Lagerschildschwingung . . . . .	64
4.14	Dämpfungskraft des Rillenkugellagers . . . . .	66
4.15	Schwingewege der Lagerbohrung in der 1. Ordnung . . . . .	68
4.16	Phasenportraits der Relativbewegung von Rotor und Lagerschild . . . . .	70
4.17	Beschleunigungsverlauf am Lagerschild bei steigender Anregungsfrequenz . .	72
4.18	Beschleunigungsverlauf am Lagerschild bei fallender Anregungsfrequenz . . .	73
4.19	Vergleich von Messung und Simulation . . . . .	76
5.1	Stuttgart-Zyklus: Geschwindigkeitsprofil . . . . .	81
5.2	Koordinatensystem im Fahrzeug . . . . .	82
5.3	Stuttgart-Zyklus . . . . .	82
5.4	Autobahnfahrt . . . . .	84
5.5	Beschleunigungsfahrt . . . . .	85
5.6	Schwingungskollektiv der elektrischen Maschine bei Sonderlastfällen . . . . .	86
5.7	Vergleich der Schwingungskollektive verschiedener Fahrtypen . . . . .	88
5.8	Profil für Getriebeanbau nach ISO16750-3 . . . . .	90
5.9	Häufigkeitsverteilung von Stuttgart-Zyklus und Normprofil . . . . .	91
5.10	Identifikation periodischer Schwingungen in einem verrauschten Signal . . . .	92
5.11	Relative Häufigkeit einer Ordnung . . . . .	94
5.12	Anteile der Gesamtsignalleistung . . . . .	95
6.1	Relative Schwingung der Lagerbohrung bei Anregung 1 . . . . .	99
6.2	Relative Schwingung der Lagerbohrung bei Anregung 2 . . . . .	100
6.3	Relative Schwingung der Lagerbohrung bei Anregung 3 . . . . .	100
6.4	Rotor-Lager-Schwingung im Normprofil bei steigender Anregungsfrequenz .	101
6.5	Rotor-Lager-Schwingung im Normprofil bei fallender Anregungsfrequenz . .	102
6.6	Errechneter Beschleunigungsverlauf des Lagerschildes im Normprofil . . . . .	102
6.7	Vergleichsmethode zur Bewertung verschiedener Belastungen . . . . .	104

---

6.8	Belastung des Lagerschildes im Normprofil und im Fahrzeug bei verschiedenen Szenarien . . . . .	106
6.9	Rotor-Lager-Schwingung im Normprofil ohne periodische Anteile . . . . .	107
6.10	Belastung des Lagerschildes im modifizierten Normprofil und im Fahrzeug bei verschiedenen Szenarien . . . . .	108
6.11	Spannungsverteilung im Lagerschild der elektrischen Maschine . . . . .	110
6.12	Beanspruchungskollektiv und Wöhlerkurve des Lagerschildes . . . . .	110

# Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften der permanenterregten Synchronmaschine . . . . .	3
4.1	Berechnungsparameter für das Verfahren der harmonischen Balance . . . . .	52
4.2	Parameter und ihre Beeinflussung der Resonanzkurve . . . . .	54
4.3	Ergänzende Berechnungsparameter für die höher harmonischen Balance . . . . .	58
4.4	Ergänzende Berechnungsparameter für die transiente Berechnung . . . . .	67
4.5	Rahmenbedingungen zur Messung . . . . .	71
4.6	Abgeglichene Berechnungsparameter der transienten Berechnung . . . . .	75
5.1	Vergleich der Randbedingungen verschiedener Fahrzyklen . . . . .	80
5.2	Vergleich verschiedener Schlechtwegstrecken . . . . .	85
5.3	Kombination gemessener Lastfälle zu Lasttypen . . . . .	87
6.1	Belastung des Lagerschildes im Normprofil und im Standardlastfall . . . . .	105

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

AKF	Autokorrelationsfunktion
BEM	Randelementmethode
FEM	Finite Elemente Methode
FFT	Schneller Fouriertransformation
HBM	Harmonische Balance Methode
HHBM	Höher Harmonische Balance Methode
MKS	Mehrkörpersimulation

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Kontaktwinkel	$\sigma$	Mechanische Spannung
$\beta$	Winkellage	$\tau$	Zeitliche Verschiebung
$\delta$	Abstand	$\Upsilon$	Fourier Transformierte
$\Phi$	Transformationsmatrix	$\omega$	Eigenkreisfrequenz
$\Phi$	Autokorrelationsfunktion	$\Omega$	Kreisfrequenz
$\gamma$	Umfangswinkel	$\xi$	Parameter
$\varphi$	Phasenversatz	$\Xi$	Gleitender Mittelwert
$\lambda$	Dämpfungsfaktor des Newton-Raphson Verfahrens	$\psi$	Winkellage im komplexen Raum
$\mu$	Magnetische Permeabilität	$\Psi$	Materialkonstante
$\nu$	Zähler		

## Lateinische Großbuchstaben

$A$	Fläche	$\mathbf{M}$	Massenmatrix
$\mathbf{A}$	Transformationsmatrix	$N$	Schwingenspielzahl
$D$	Schadenssumme	$N$	Zähler
$F$	Kraft	$N$	Ordnung
$G$	Lagerspiel	$P$	Leistung
$H$	Magnetische Feldstärke	$\mathbf{Q}$	Koeffizientenmatrix
$J$	Jacobimatrix	$\mathbf{R}$	Residuum
$\mathbf{K}$	Steifigkeitsmatrix	$\mathbf{T}$	Maxwell'scher Spannungstensor
$L$	Länge	$T$	Periodendauer
$M$	Drehmoment	$V$	Vergrößerungsfunktion