Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dres. h. c.
Kay Hameyer

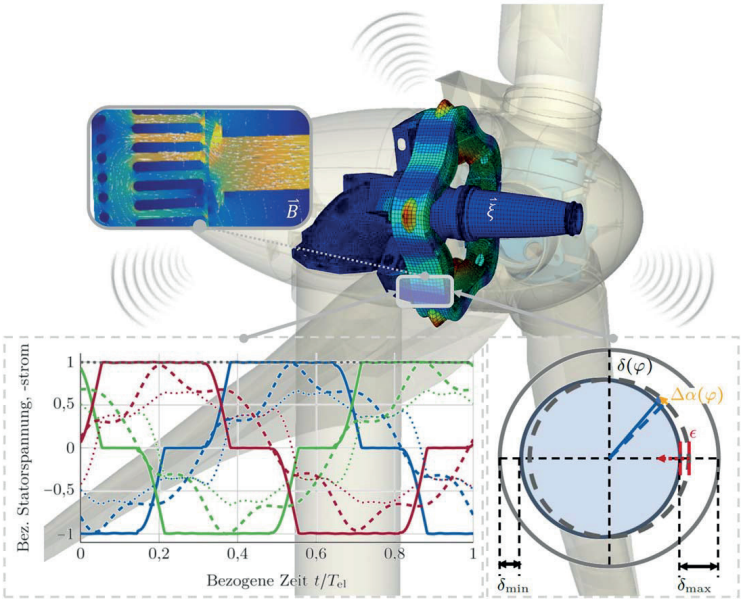
Institut für Elektrische Maschinen

RWTH AACHEN UNIVERSITY

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Christoph Mülder

Systematische Bewertung der Akustik von getriebelosen Windenergieanlagen am Beispiel des elektromagnetischen Betriebsverhaltens des Generators



SHAKER VERLAG

Band 48

Systematische Bewertung der Akustik von getriebelosen Windenergieanlagen am Beispiel des elektromagnetischen Betriebsverhaltens des Generators

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christoph Mülder, M. Sc. RWTH

aus Rheine

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dres. h. c. Kay Hameyer
apl. Prof. Dr.-Ing. Ralf Schelenz

Tag der mündlichen Prüfung: 29. August 2022

Aachener Schriftenreihe zur
Elektromagnetischen Energiewandlung

Band 48

Christoph Mülder

Systematische Bewertung der Akustik von getriebelosen Windenergieanlagen am Beispiel des elektromagnetischen Betriebsverhaltens des Generators

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Aachener Schriftenreihe zur Elektromagnetischen Energiewandlung

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dres. h.c. Kay Hameyer
Institut für Elektrische Maschinen
RWTH Aachen
52062 Aachen

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8874-8
ISSN 1861-3799

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation habe ich in der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) in enger Kooperation mit dem Center for Wind Power Drives (CWD) (beide RWTH Aachen University) angefertigt. Zu ihrem Gelingen haben viele Personen beigetragen, die mich über Jahre hinweg begleitet und unterstützt haben.
Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dres. h. c. Kay Hameyer für den bereichernden fachlichen und organisatorischen Austausch bei der Betreuung dieser Arbeit. Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Ralf Schelenz danke ich vielmals für die Übernahme des Korreferats.
Bei meinen ehemaligen Arbeitskollegen bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Tobias Duda, Andreas Thul und Fabian Müller danke ich für den wissenschaftlichen Diskurs und die Unterstützung. Zudem bedanke ich mich bei Kevin Jansen, Alexander Kern, Thomas Decker und Hannes Morgenroth sowie allen Studierenden, die mit ihren Abschluss- oder Projektarbeiten und vielfältigen Tätigkeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben. Bei den Mitarbeitern des Elektroniklabors und der mechanischen Werkstatt des IEM unter Leitung von Jörg Paustenbach, die in allen praktischen Belangen durch ihr Zutun eine unverzichtbare Hilfe gewesen sind, möchte ich mich gerne bedanken.
Besonderer und herzlicher Dank gilt Julia für die Geduld und den Beistand bei der Fertigstellung dieser Arbeit. Er gilt ebenso meiner Familie und allen Freunden für ihre immerwährende Unterstützung und Motivation.

Aachen, im November 2022 Christoph Mülder

Kurzfassung

Der Anteil elektrischer Energieerzeuger, die sich regenerativer Energiequellen bedienen, wird im Zuge der *Energiewende* stetig zunehmen. Windenergieanlagen an Land (engl. Onshore) erschließen in diesem Zuge zunehmend den Bereich bewohnter Gebiete. Die akustische Emission stellt in diesem Zusammenhang eine wesentliche Metrik zur Abstandsbemaßung und Lokalisierung der WEA dar. Normen und Richtlinien definieren Vorgaben in Bezug auf Grenzwerte, die bei Feldmessungen im Rahmen der Zertifizierung eingehalten werden müssen.
Breitbandige Geräusche, die durch den Windrotor der WEA hervorgerufenen werden, sog. Blattgeräusche, können insbesondere bei getriebelosen Topologien von tonalen Geräuschen, die durch den Generator angeregt werden, begleitet werden. Phänomenologisch werden diese durch das drehende magnetische Luftspaltfeld des Generators erzeugt, welches Grenzflächenkräfte auf die Struktur ausübt. Die magnetische Feld- und Kraftverteilung ist zeitlich und örtlich abhängig von der Luftspaltgeometrie des Generators. Hochpolige Synchrongeneratoren, die in den untersuchten Anlagentopologien zum Einsatz kommen, haben relativ zur Luftspaltweite große elektromagnetische Aktivteilabmessungen. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Generator ist der Luftspalt drei Größenordnungen kleiner als der Bohrungsdurchmesser. Aufgrund von Fertigungsabweichungen sowie externer Lasten, die bspw. mechanisch und thermisch bedingt sein können, variiert der Luftspalt in seiner Form und Weite signifikant, was sich in einer Imperfektion der Luftspaltgeometrie ausdrückt. Numerische Berechnungen dieser dreidimensionalen Geometrien stellen einen hohen Aufwand dar und sind unflexibel. Zudem haben die elektrischen Ströme, die in der Wicklung des Generators fließen, Einfluss auf die magnetischen Kräfte. Neben der geometrischen Betrachtung der Generatorluftspalttopologie ist somit ebenfalls eine Untersuchung des Zusammenspiels aus der externen elektrischen Beschaltung und dem Generator erforderlich.
Das Ziel dieser Arbeit ist am Beispiel tonaler magnetischer Geräusche, die durch den Generator hervorgerufen werden, ein Beitrag zur systematischen und effizienten Bewertung der Schallemissionen getriebeloser WEA zu leisten. Hierzu werden verschiedene Methoden zur Modellierung relevanter

Phänomene herangezogen. Basierend auf einem neuen hybriden Ansatz zur magnetischen Feldberechnung, der aus Modellen konformer Abbildungen und Finite Elemente-basierten Methoden abgeleitet wird, werden die o. g. Effekte anhand eines modal reduzierten strukturdynamischen Modells in einer elastischen Mehrkörpersimulation (MKS) analysiert und bewertet. Die elektrischen Stromformen werden auf Basis von Simulationen einer numerischen Feld-Schaltungskopplung des Generators ermittelt. Messergebnisse, die auf einem 4 MW-Systemprüfstand erhoben werden, dienen zur Modellvalidierung und experimentellen Analyse. Das Körperschallverhalten der Statorstruktur des Generators wird anhand exemplarischer Einzeleffekte sowie bei Betrieb mit verschiedenen Generatorkennlinien bewertet.
Die hierdurch gewonnene Systematik stellt somit ein Analysewerkzeug zum Vergleich von Anlagenkonzepten und im Auslegungsprozess zur modellbasierten Produktverbesserung dar. Mit dem vorgestellten Ansatz lassen sich die aktuellen Normen und technische Richtlinien bzgl. der Akustik überprüfen und bewerten.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung **1**
- 1.1. Motivation und Zielsetzung 1
- 1.2. Forschungsbedarf 3
- 1.3. Aufbau der Arbeit 6

2. Grundlagen nach Stand der Forschung, Technik und Normung **9**
- 2.1. Akustik von Windenergieanlagen 10
  - 2.1.1. Schallentstehung 10
  - 2.1.2. Normative Mess- und Bewertungsgrößen 12
- 2.2. Getriebelose Windenergieanlagen 16
  - 2.2.1. Klassifizierung mit Blockschaltbild nach Norm 16
  - 2.2.2. Entwicklungslinien 18
  - 2.2.3. Aufbau und Funktionsweise 19
- 2.3. Synchrongeneratoren 21
  - 2.3.1. Auslegungsmerkmale 22
  - 2.3.2. Elektromagnetisches Modell mit konzentrierten Parametern 25
  - 2.3.3. Magnetische Luftspaltfelder 28
  - 2.3.4. Elektromagnetische Drehmomente und Kräfte 31
  - 2.3.5. Verlustoptimierte Betriebskennlinie 35
- 2.4. Strukturdynamik des Schalltransferpfades 36
  - 2.4.1. Modalanalyse 36
  - 2.4.2. Mehrkörpersysteme 39
  - 2.4.3. Reduktion der Freiheitsgrade 41
  - 2.4.4. Modale Dämpfung nach *Rayleigh* 44
- 2.5. Frequenzbasierte Analysemethoden 46
  - 2.5.1. *Fourier*-Analyse 46
  - 2.5.2. Spektrogramm 47
  - 2.5.3. *Campbell*-Diagramm 48

3. Messtechnische Untersuchungen **49**
- 3.1. Beschreibung des elektromechanischen Antriebsstranges . . . 49

3.2. Messungen der Luftspaltgeometrie 53
3.2.1. Nach Fertigung 54
3.2.2. Feldmessdaten 56
3.3. Messkampagne auf einem 4 MW-Systemprüfstand 60
3.3.1. Prüfstandaufbau mit Testanlage 61
3.3.2. Messpunkte 62
3.3.3. Prüfungen 65

4. Analyse der magnetischen Felder und Kräfte im Luftspalt 69
4.1. Konforme Abbildungen der untersuchten Topologie 69
4.1.1. Superpositionsansatz 69
4.1.2. Rotorpolgeometrie 77
4.1.3. Doppelzahn und Doppelnut 80
4.2. Magnetische Feldberechnung mithilfe der Finite-Elemente-Methode 82
4.2.1. Modellbeschreibung und Simulation 82
4.2.2. Analyse des magnetischen Luftspaltfeldes im Leerlauf 85
4.2.3. Abgleich mit der Methode der konformen Abbildungen 87
4.2.4. Einfluss der Blechschnittanomalien 90
4.2.5. Einfluss der mittleren Luftspaltweite 92
4.2.6. Dreidimensionale geometrische Einflüsse 94
4.2.7. Stromkennfeldberechnung 102

5. Synthese hybrider Methoden zur Untersuchung parasitärer Effekte 109
5.1. Effiziente Abbildung von Luftspaltimperfektionen 109
5.1.1. Permeanzfunktionen 110
5.1.2. Berechnungsmethode 111
5.1.3. Validierung durch Finite-Elemente-Simulationen 115
5.2. Gekoppelte Simulation des Generators mit externer Beschaltung 117
5.2.1. Methode 117
5.2.2. Implementierung 117
5.2.3. Messtechnische Validierung 120
5.2.4. Kraftauswertung 123
5.2.5. Verlustoptimierte Kennlinie 126

6. Elektromechanische Mehrkörpersimulation des Antriebsstrangs 129
6.1. Modellbeschreibung 129
6.1.1. Simulationsumgebung 129
6.1.2. Modale Reduktion 131
6.1.3. Modellaufbau 135

6.1.4. Modellierung von Luftspaltverformungen 137
6.2. Einprägung der magnetischen Kräfte am Luftspalt 140
6.2.1. Schnittstelle und Implementierung 140
6.2.2. Berechnung 140
6.3. Parametrisierung 142
6.3.1. Dämpfungsverhalten der Statorstruktur 142
6.3.2. Einprägung des Antriebsdrehmoments 147
6.4. Messtechnische Validierung 147
6.4.1. Körperschallverhalten der Statorstruktur 148
6.4.2. Experimentelle und Operative Modalanalyse 155
6.4.3. Verifizierung der Luftspaltform 161

7. Systematische Bewertung von Einzeleffekten und Betriebsmodi 165
7.1. Einzeleffekte 165
7.1.1. Luftspaltverformungen durch thermische Ausdehnung 166
7.1.2. Statorstromharmonische 171
7.2. Betriebsmodi 172
7.2.1. Schallreduziert 173
7.2.2. Verlustoptimiert 176
7.3. Vergleich und Fazit 178

8. Zusammenfassung und Ausblick 183
8.1. Zusammenfassung 183
8.2. Ausblick 188

A. Systemprüfstand des CWD 191

B. Mess- und Simulationsergebnisse 193
B.1. Luftspaltform 193
B.1.1. Messungen 193
B.1.2. Simulationen 196
B.2. Schallreduzierte Betriebskennlinie 198
B.3. Körperschall 199

C. Implementierungen und Modellgrundlagen 201
C.1. Konforme Abbildungen 201
C.1.1. Mathematische Grundlagen 201
C.1.2. Schwarz-Christoffel Transformation 203
C.1.3. Anwendung bei elektrischen Maschinen 207
C.2. Gekoppelte Feld-Schaltungssimulation 221

D. Eigenformen der Statorstruktur **223**

Symbolverzeichnis **229**

Literaturverzeichnis **233**

Eigene Veröffentlichungen **247**

Betreute Abschluss- und Projektarbeiten **249**

Lebenslauf **251**

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional(e(r, s))
3D	Dreidimensional(e(r, s))
Ax.	Axial(e(r, s))
Bez.	Bezogen(e(r, s))
BM	Betriebsmodus
BP	Betriebspunkt
CM	*Conformal Mapping* (= Konformes Abbilden)
CWD	*Center for Wind Power Drives*, RWTH Aachen University
DC	*Direct Current* (= Gleichstrom)
DGL	Differentialgleichung
DN	Doppelnut
DOF	*Degrees of Freedom* (= Freiheitsgrade)
DyNaLab	*Dynamic Nacelle Testing Laboratory*
DZ	Doppelzahn
EMA	Experimentelle Modalanalyse
FBI	*Flexible Body Input* (= Flexible Körper Dateneingabe)
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	*Fast-Fourier-Transformation* (= Schnelle *Fourier*-Transformation)
Forts.	Fortsetzung
GR	Gleichrichter
HiL	*Hardware-in-the-Loop*
HSS	Hochsetzsteller

IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IEM	Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University
IGBT	*Insulated-Gate Bipolar Transistor* (= Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme
LUT	Lookup-Tabelle
MKS	Mehrkörpersimulation
MPF	*Modal Participation Factor* (= Modaler Beteiligungsfaktor)
MS	Maschinenhausseite
MSCT	Modifizierte *Schwarz-Christoffel* Transformation
MTPA	*Maximum Torque Per Ampere* (= Maximales Drehmoment pro Ampère)
Nr.	Nummer
OBMA	Ordnungsbasierte operative Modalanalyse
OMA	Operative Modalanalyse
PDM	Pulsdauermodulation
PMSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
Rad.	Radial(e(r, s))
RM	Rotormarker
RMS	*Root Mean Square* (= Effektivwert)
RS	(Wind-)Rotorseite
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SCT	*Schwarz-Christoffel* Transformation
SG	Synchrongenerator
SM	Statormarker
SZ	Standardzahn
Tan.	Tangential(e(r, s))
VKF	Vold-Kalman-Filter
WEA	Windenergieanlage(n)

WR	Wechselrichter