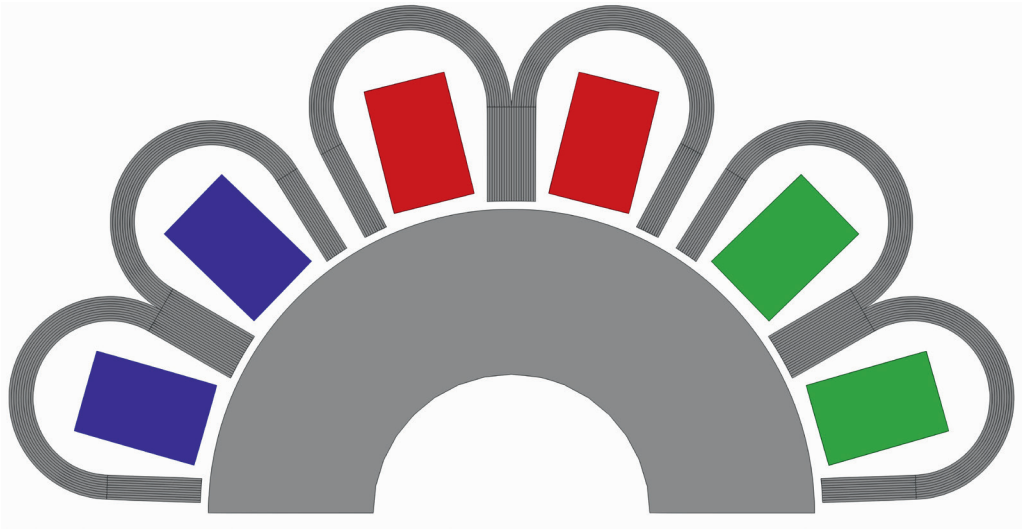
EAA Lehrstuhl für Elektrische Antriebstechnik und Aktorik
Chair of Electrical Drives and Actuators

Forschungsberichte
Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling

Alena Babl

Permanenterregte Synchronmaschine mit umformtechnisch hergestelltem Statorblech



der Bundeswehr Universität München

EAA Forschungsberichte
Band 55

Permanenterregte Synchronmaschine mit umformtechnisch hergestelltem Statorblech

Alena Nicola Babl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS (DR.-ING.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter GERLING
2. Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg HERZOG

Die Dissertation wurde am 15. Mai 2023 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 23. November 2023 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 30. November 2023 statt.

Forschungsberichte Elektrische Antriebstechnik und Aktorik

Band 55

Alena Babl

Permanenterregte Synchronmaschine mit umformtechnisch hergestelltem Statorblech

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9351-3
ISSN 1863-0707

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Aktorik an der Universität der Bundeswehr München und wurde durch die finanzielle Unterstützung innerhalb des Projekts UmiStab des Forschungszentrums Jülich ermöglicht.

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Gerling für die hervorragende Betreuung und ausgezeichnete Förderung dieser Arbeit, sowie den Freiraum und die enorme Unterstützung, die er mir zukommen ließ, um mich auch außerfachlich weiterbilden zu können. Dies alles wusste ich stets sehr zu schätzen.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herzog spreche ich meinen Dank für die Übernahme der Zweitkorrektur aus.

Nicht zuletzt bedanke ich mich ganz herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für all die produktiven Gespräche und den fachlichen Austausch. Herrn Johannes Gerold und Herrn Christian Bratke danke ich besonders für die Durchsicht dieser Arbeit. Sie haben meine Arbeit durch ihre Bemühungen und Gedanken sehr vorangebracht. Auch bedanke ich mich bei Herrn Benedikt Stapff, ohne den meine Maschine vermutlich immer noch nicht ihren Weg in das Labor gefunden hätte. Für die kontinuierliche Unterstützung am Prüfstand danke ich Herrn Harald Graul und Herrn Harald Hofmann. Und für die vielen unterhaltsamen Heimfahrten bedanke ich mich bei Heidi Buller. Zusätzlich hervorheben möchte ich noch Lucas Brenner, Daniel Alban, Christian Roth, Johann Mayer und Gurakuq Dajaku.

Meiner Familie, meinem Partner Alexander Wild und der Familie meines Partners danke ich für ihre Geduld, ihre Ermutigungen und ihre Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation.

Zuletzt möchte ich diese Arbeit meinen Familienmitgliedern widmen, welche die Fertigstellung leider nicht mehr miterleben konnten: Meinen Opas Gerd Heil und Adi Babl, meiner Oma Rosa Babl und meinem Onkel Adrian Babl.

München, Mai 2023 Alena Babl

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine permanenterregte Synchronmaschine mit umformtechnisch hergestelltem Statorblech untersucht. Diese Maschine weist eine Laminierung der Statorbleche in radialer Richtung, kornorientiertes Statorblech und Flussbarrieren im Stator auf. Flussbarrieren im Stator verändern die Luftspaltflussdichte, wodurch die Amplitude der Arbeitsharmonischen verstärkt wird und die Amplituden der ungewollten parasitären Harmonischen reduziert werden.

Der innovative Statoraufbau lässt sich vollständig analytisch beschreiben, wodurch eine grobe analytische Bestimmung aller Statordaten durch ein vereinfachtes Reluktanznetzwerk möglich ist. Durch die Verwendung von kornorientiertem Statorblech sowie die Statorlaminierung steigt der magnetische Widerstand in tangentialer Richtung, was als zusätzliche materielle Flussbarrieren interpretiert werden kann. Diese Flussbarrieren treten zwischen allen Spulen auf. Hierbei wäre zu erwarten, dass eine weitere Erhöhung der Amplitude der Arbeitsharmonischen der Luftspaltflussdichte erfolgt. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die Anordnung der Flussbarrieren einen Einfluss auf den Harmonischengehalt der Luftspaltflussdichte hat. Hierbei stehen die materiellen Flussbarrieren den geometrischen Flussbarrieren gegenüber, sodass die Amplitude der Arbeitsharmonischen reduziert wird und ein Teil der Amplituden der parasitären Harmonischen gestärkt wird. Dies lässt sich ebenfalls anhand des äquivalenten Wicklungsfaktors zeigen.

Die Arbeit beschäftigt sich zusätzlich mit den Verlusten innerhalb dieses neuartigen Statoraufbaues. Ein Vorteil von kornorientiertem Blech liegt in den geringen Verlusten in Walzrichtung. In der Finite-Elemente-Methode-Simulation der Verluste zeigt sich jedoch, dass die Wirbelstromverluste im Stator überproportional mit der Länge der Maschine ansteigen, da sich die Wirbelströme in der gesamten Blechebene in axialer Richtung ausbreiten. Diese werden zum größten Teil von den Permanentmagneten im Rotor verursacht und sind nur gering abhängig von dem Statorstrom. Eine zusätzliche axiale Segmentierung des Stators verringert die Wirbelströme überproportional, während dünneres Blech zu höheren Verlusten führt.

Abschließend wird die Flussbarrierenmaschine mit einer Standard-Referenzmaschine durch Finite-Elemente-Methode-Simulationen und Messungen am Prüfstand verglichen. Es zeigt sich, dass die Einbringung von Flussbarrieren zu erhöhtem Drehmoment führt. Jedoch treten in der Flussbarrierenmaschine durch die radiale Laminierung deutlich erhöhte Verluste auf, wodurch das Drehmoment stark verringert wird. Für die Vermessung am Prüfstand muss die Flussbarrierenmaschine angepasst werden. Da die Maschine über das Gehäuse luftgekühlt ist, ist eine möglichst große Kontaktfläche zwischen Statorblech und Gehäuse notwendig. In der Messung zeigen sich bei der Flussbarrierenmaschine eine starke Temperaturentwicklung, stark erhöhte Verluste und ein verringerter Wirkungsgrad. Der Vorteil der Flussbarrierenmaschine liegt in der erhöhten Nutfläche. Für die Zukunft bietet die Maschine einige Ansätze zur Verbesserung, wie beispielsweise die Segmentierung des Stators in axialer Richtung, die Verwendung von dickerem Blech oder der Einsatz von aktiver Kühlung.

Abstract

In this thesis, a permanent magnet synchronous machine with stator laminations produced by forming technology is investigated. This machine has a lamination of the stator steel sheets in radial direction, grain-oriented stator steel sheets and flux barriers in the stator. Flux barriers in the stator change the air gap flux density, which increases the amplitude of the working harmonics and reduces the amplitudes of the parasitic harmonics.

The innovative stator design can be described analytically, which allows a rough analytical determination of all stator data through a simplified reluctance network. Due to the use of grain-oriented stator steel sheets, the magnetic resistance increases in the tangential direction, which can be interpreted as additional material flux barriers. These flux barriers occur between all coils. Here it would be expected that a further increase in the amplitude of the working harmonics of the air gap flux density occurs. However, this is not the case, as the arrangement of the flux barriers has an influence on the harmonic content of the air gap flux density. Here, the material flux barriers oppose the geometric flux barriers, so that the amplitude of the working harmonics is reduced and part of the amplitudes of the parasitic harmonics are strengthened. This can also be seen from the equivalent winding factor.

The thesis also deals with the losses within this novel stator design. One advantage of grain-oriented steel sheets is the low losses in the rolling direction. However, the finite-element-analysis-simulation of the losses shows that the eddy current losses in the stator increase disproportionately with the length of the machine, since the eddy currents propagate in the axial direction throughout the steel sheet planes. These are largely caused by the permanent magnets in the rotor and are only slightly dependent on the stator current. Additional axial segmentation of the stator reduces the eddy currents disproportionately, while thinner steel sheets lead to higher losses.

Finally, the flux barrier machine is compared with a standard reference machine by means of finite-element-analysis-simulations and measurements on the test bench. This shows that the introduction of flux barriers leads to increased torque. However, significantly increased losses occur in the flux barrier machine due to the radial lamination, which reduces the torque. The flux barrier machine must be adapted for measurement on the test bench. Since the machine is air-cooled via the housing, a large contact area between the stator steel sheets and housing is necessary. The measurement shows high temperatures, greatly increased losses and reduced efficiency in the flux barrier machine. The advantage of the flux barrier machine is the increased slot area. For the future, the machine offers some approaches for improvement, such as segmenting the stator in the axial direction, using thicker steel sheets or using active cooling.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **V**

Tabellenverzeichnis **IX**

Abkürzungsverzeichnis **XI**

Symbolverzeichnis **XIII**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation . . . 1
1.2 Stand der Technik . . . 2
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit . . . 3

2 Grundlagen elektrischer Maschinen und Entwurf der Referenzmaschine **7**
2.1 Grundlagen elektrischer Maschinen . . . 7
2.1.1 Ausführungsformen . . . 7
2.1.2 Aufbau . . . 8
2.1.3 Maschinentopologien . . . 9
2.1.4 Vergleich der Maschinentopologien . . . 10
2.2 Wicklungen in elektrischen Maschinen . . . 11
2.2.1 Bezeichnung der Wicklungen . . . 11
2.2.2 Einteilung der Wicklungen . . . 14
2.2.3 Wicklungsfaktor . . . 15
2.3 Grundlagen des Reluktanznetzwerkes . . . 17
2.3.1 Idee des Reluktanznetzwerkes . . . 18
2.3.2 Der magnetische Widerstand . . . 19
2.3.3 Lösung des Gleichungssystems . . . 20
2.4 Entwurf der Referenzmaschine . . . 21
2.4.1 Anforderungen an die Referenzmaschine . . . 22
2.4.2 Design der Referenzmaschine . . . 22
2.4.3 Wicklung der Referenzmaschine . . . 23

3 Design der innovativen Flussbarrierenmaschine **27**
3.1 Grundlagen der Flussbarrieren . . . 27
3.1.1 Grundlegende Idee der Verlustreduzierung . . . 27
3.1.2 Umsetzung als Flussbarrieren . . . 28
3.1.3 Wicklungsfaktor bei Verwendung von Flussbarrieren . . . 30
3.1.4 Alternative Statortopologien mit Flussbarrieren . . . 31
3.2 Parametrierter Aufbau . . . 31
3.3 Analytische Parameterbestimmung . . . 35
3.3.1 Aufstellung des Reluktanznetzwerkes . . . 36

3.3.2 Berechnung der Elemente im Reluktanznetzwerk 37
3.3.3 Lösung des Reluktanznetzwerkes 41
3.3.4 Bestimmung der Verteilung der magnetischen Spannungen 42
3.3.5 Bestimmung der geometrischen Parameter 43
3.4 Simulative Parameterbestimmung 47
3.4.1 Statorbetrachtung 47
3.4.2 Stator- und Rotorbetrachtung 51

4 Auswirkungen der Werkstoffeigenschaften 57
4.1 Grundlagen der Elektrobleche 57
4.1.1 Grundbegriffe des Magnetismus 57
4.1.2 Ferromagnetismus 58
4.1.3 Einsatz von Elektroblechen 61
4.1.4 Kornorientierung 65
4.1.5 Laminierung 66
4.1.6 Mechanische Beanspruchung 66
4.2 Einfluss der Werkstoffeigenschaften auf das Luftspaltfeld 67
4.2.1 Auswirkung der Laminierung 67
4.2.2 Auswirkung der Kornorientierung 68
4.2.3 Auswirkung der Laminierung und Kornorientierung 69
4.2.4 Untersuchung und Nachbildung der Effekte 70

5 Untersuchung der Verluste 83
5.1 Grundlagen der Verlustberechnung 83
5.1.1 Stromwärmeverluste 83
5.1.2 Eisenverluste 84
5.1.3 Magnetverluste 89
5.2 Bestimmung der Wirbelstromverluste im Stator 92
5.2.1 Analytische Verifizierung der FEM-Simulation 92
5.2.2 FEM-Simulation der Wirbelstromverluste im Stator 94
5.2.3 Verwendung von anisotropem Blechmaterial 102
5.2.4 Verwendung von Blechmaterial mit nicht linearen Eigenschaften . . . 104
5.2.5 Rückwirkung der Wirbelströme im Stator 105
5.2.6 Reduzierung der Wirbelstromverluste im Stator 106
5.2.7 Quantitative Bestimmung der Wirbelstromverluste am Nennpunkt . . 108
5.3 Untersuchung der Magnetverluste 112
5.3.1 Wirbelströme aufgrund der Nutungseffekte 113
5.3.2 Wirbelströme aufgrund der Statorharmonischen 114
5.3.3 Reduzierung der Magnetverluste 116

6 Vergleich des Betriebsverhaltens der Flussbarrieren- und Referenzmaschine 117
6.1 FEM-Simulation der Maschinen am Nennpunkt 117
6.1.1 FEM-Simulation der Flussbarrierenmaschine 117
6.1.2 FEM-Simulation der Referenzmaschine 118
6.2 Simulativer Vergleich und Analyse der Maschinen 119
6.3 Zusammenhang zwischen der Flussbarrieren- und Referenzmaschine 124
6.3.1 Harmonische bei reiner Statorstromspeisung 125
6.3.2 Harmonische im Leerlauf 127

6.4 Auswirkungen fertigungsbedingter Ungenauigkeiten 129
6.4.1 Ungleichmäßige Länge der Einzelbleche im Statorzahn 129
6.4.2 Radiale Verschiebung des Rotors 131
6.4.3 Verdrehung der U-Module bei axialer Segmentierung 132

7 Validierung der Flussbarrieren- und Referenzmaschine 135
7.1 Anpassungen der Flussbarrierenmaschine 135
7.1.1 Temperaturentwicklung 135
7.1.2 Fertigung 136
7.1.3 Auswirkungen des Biegens auf die magnetischen Eigenschaften 137
7.1.4 Alternative innovative Statorgeometrie 138
7.1.5 Zusammenhang zwischen beiden Statorgeometrien 140
7.2 Validierung der Flussbarrierenmaschine am Prüfstand 142
7.2.1 Messung der Flussbarrierenmaschine Version 2 142
7.2.2 Vergleichende FEM-Simulation der Flussbarrierenmaschine Version 2 . 145
7.3 Validierung der Referenzmaschine 147
7.3.1 Messung der Referenzmaschine 147
7.3.2 Vergleichende FEM-Simulation der Referenzmaschine 149
7.4 Analyse und Vergleich der Maschinen am Prüfstand 151

8 Fazit und Ausblick 155
8.1 Zusammenfassung der Arbeit 155
8.2 Ausblick 157

A Daten der Maschinen i

B Herleitung der Zahnhöhe iii

C Matrizen zur Lösung des Reluktanznetzwerkes v

D Prüfstandsgeräte vii

Literatur ix

Abbildungsverzeichnis

1.1 Anzahl der neu zugelassenen Elektroautos in Deutschland von 2012 bis 2022 . 1

2.1 Aufbau elektrischer Maschinen 8
2.2 Topologien elektrischer Drehfeldmaschinen 9
2.3 Bestandteile einer Wicklung 12
2.4 Wicklungen mit unterschiedlicher Anzahl der Schichten 13
2.5 Vergleich der Spulenweiten 13
2.6 Einteilung der Wicklungsarten anhand ihrer Lochzahl 14
2.7 Rechteckiger durchflossener Sektor 19
2.8 Radial und polar durchflossener Sektor 20
2.9 Querschnitt der Referenzmaschine 23
2.10 Wicklungsaufbau der Einschichtwicklung 23
2.11 Bewickelter Stator der Referenzmaschine 25

3.1 Querschnitt einer PMSM mit 12 Nuten, 10 Polen und Zweischichtwicklung . . 28
3.2 Reluktanznetzwerk für eine Zahnteilung zur Herleitung der Flussbarrieren . . 29
3.3 Anordnung der Flussbarrieren 29
3.4 Weitere Statortopologien mit Flussbarrieren 31
3.5 Querschnitt der innovativen Statorgeometrie 32
3.6 Geometrie eines U-Moduls 33
3.7 Geometrie eines U-Moduls zur Bestimmung der Fläche 35
3.8 Flusspfade in der Statorgeometrie 36
3.9 Reluktanznetzwerk des halben Stators 37
3.10 Definition der magnetischen Widerstände 37
3.11 Feldverlauf einer Doppelleitung 39
3.12 Flusspfade für maximalen und minimalen Widerstand 40
3.13 Verteilung der magnetischen Spannungen bei Speisung einer Spule 42
3.14 Verteilung der magnetischen Spannungen bei Speisung aller drei Stränge . . . 43
3.15 Analytische Bestimmung der 7. Harmonischen 45
3.16 Analytische Bestimmung der 5. Harmonischen 46
3.17 Analytische Bestimmung der 1. Harmonischen 47
3.18 FEM-Modell bei reiner Statorbetrachtung 48
3.19 Simulative Bestimmung der 7. Harmonischen 48
3.20 Luftspaltflussdichte aus der FEM-Simulation und der Analytik 49
3.21 Simulative Bestimmung der 5. Harmonischen 50
3.22 Simulative Bestimmung der 1. Harmonischen 50
3.23 Maschinenmodell für die Bestimmung der Geometrie 51
3.24 Simulative Bestimmung des Drehmomentes über eine Parametervariation . . 52
3.25 Simulative Bestimmung der Magnetverluste über eine Parametervariation . . 53
3.26 Simulative Bestimmung der Eisenverluste über eine Parametervariation . . . 54

3.27 Simulative Bestimmung der Leistung über eine Parametervariation 54
3.28 Simulative Bestimmung der Drehmomentrippel über eine Parametervariation 55

4.1 Entstehung der Neukurve 60
4.2 Entstehung der Hystereseschleife 61
4.3 Produktion von nicht kornorientiertem Elektroblech 62
4.4 Schematische Darstellung der Statorherstellung 63
4.5 Lage der Eisen-Elementarzelle bei der Würfel- und Gosstextur 64
4.6 Magnetisierungskurven der Eisenkristalle 65
4.7 Schematische Darstellung der Laminierung 66
4.8 Auswirkung des Biegens des Bleches auf die Neukurve 66
4.9 Auswirkung des Biegens des Bleches auf die Hysteresekurve 66
4.10 FEM-Modell zur Untersuchung der Werkstoffeffekte mit laminiertem Stator . 67
4.11 Harmonischengehalt eines laminierten Blechstapels 68
4.12 Harmonischengehalt eines massivem Blechstapels mit anisotropem Werkstoff 69
4.13 Harmonischengehalt eines laminierten Blechstapels mit anisotropem Werkstoff 70
4.14 Harmonischengehalt bei Anordnung der Flussbarrieren zwischen gleichphasigen Spulen mit anisotropem Werkstoff 71
4.15 Vereinfachter Maschinenquerschnitt zur Untersuchung zusätzlicher Flussbarrieren 72
4.16 Reluktanznetzwerk einer Spule aus Abbildung 4.15a 72
4.17 Reluktanznetzwerk einer Spule aus Abbildung 4.15b 73
4.18 Luftspaltflussdichte der Netzwerke aus den Abbildungen 4.16 und 4.17 73
4.19 Amplituden der Harmonischen aus der Analytik bei konstanten Flussbarrieren 1 76
4.20 Amplituden der Harmonischen aus der Analytik bei gleichmäßig steigender Breite der Flussbarrieren 1 77
4.21 Vergleich des äquivalenten Wicklungsfaktors 77
4.22 FEM-Modell zur Untersuchung der Effekte zusätzlicher Flussbarrieren an einem Standardstator 78
4.23 Amplituden der Harmonischen aus der FEM-Simulation bei konstanten Flussbarrieren 1 79
4.24 Amplituden der Harmonischen aus der FEM-Simulation bei gleichmäßig steigender Breite der Flussbarrieren 1 79
4.25 Vergleich des Harmonischengehalt des Rotorfeldes 80

5.1 Mittlere Windungslänge einer Spule 84
5.2 Wirbelstrompfad innerhalb eines Bleches 85
5.3 Grenzfrequenzen bei verschiedenen Blechdicken und Permeabilitäten 87
5.4 Wirbelstrompfade an den Blochwänden 88
5.5 Luftspaltflussdichte über eine Nut 89
5.6 Pfade der Wirbelströme im Magneten 91
5.7 Modell zur Berechnung der Wirbelströme an einem Einzelblech mit Statorstromspeisung 93
5.8 Reluktanznetzwerk zur Berechnung der Wirbelströme an einem Einzelblech mit Statorstromspeisung 93
5.9 Querschnitte der Modelle aus Tabelle 5.2 95
5.10 Verlustfaktoren der Wirbelstromverluste bei Skalierung der Maschinenlänge . 96
5.11 Wirbelströme am Einzelblech erzeugt durch das Statorfeld 97

5.12 Wirbelstromverluste und Verlustfaktor am Einzelblech erzeugt durch das Rotorfeld . . . 97
5.13 Flusspfade bei verschiedenen Rotorpositionen für das Einzelblech . . . 98
5.14 Wirbelströme am Einzelblech erzeugt durch das Rotorfeld . . . 98
5.15 Wirbelströme am Blechstapel erzeugt durch das Statorfeld . . . 99
5.16 Wirbelstromverluste und Verlustfaktor am Blechstapel erzeugt durch das Rotorfeld . . . 100
5.17 Wirbelströme am Blechstapel erzeugt durch das Rotorfeld . . . 100
5.18 Rotorposition bei maximalen Wirbelstromverlusten für den Blechstapel . . . 101
5.19 Wirbelstromverluste und Verlustfaktor in der gesamten Maschinenbetrachtung erzeugt durch das Rotorfeld . . . 101
5.20 Wirbelströme in der gesamten Maschinenbetrachtung erzeugt durch das Rotorfeld 102
5.21 Flussdichte durch die Stirnfläche des Einzelbleches erzeugt durch das Rotorfeld 103
5.22 Flussdichte durch die Seitenflächen des Einzelbleches erzeugt durch das Rotorfeld 104
5.23 Magnetische Flussdichte des Blechstapels . . . 105
5.24 Rückwirkung der Wirbelströme auf das anregende Feld . . . 106
5.25 Reduzierung der Verluste am Einzelblech durch axiale Unterteilung . . . 107
5.26 Approximation der Wirbelstromverluste aus der FEM-Simulation . . . 108
5.27 Abweichungen der Approximation der Wirbelstromverluste aus der FEM-Simulation . . . 109
5.28 Extrapolation der Wirbelstromverluste aus der FEM-Simulation . . . 110
5.29 Reduzierung der Verluste am Nennpunkt durch axiale Unterteilung . . . 111
5.30 Wirbelstromverluste aus der FEM-Simulation bei verschiedenen Blechdicken . 112
5.31 Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten . . . 113
5.32 Amplituden der Luftspaltflussdichte der Harmonischen aus der FEM-Simulation 114
5.33 Magnetverluste im Leerlauf mit und ohne Flussbarrieren . . . 115
5.34 Magnetverluste im Nennpunkt mit und ohne Flussbarrieren . . . 115
5.35 Magnetverluste im Nennpunkt mit und ohne Segmentierung . . . 116

6.1 FEM-Modell der Flussbarrierenmaschine . . . 118
6.2 FEM-Modell der Referenzmaschine . . . 119
6.3 FEM-Modell der Referenzmaschine mit Flussbarrieren . . . 120
6.4 Verluste im Nennpunkt der Flussbarrieren- und Referenzmaschine . . . 121
6.5 Mechanische Drehmomente im Nennpunkt der Flussbarrieren- und Referenzmaschine . . . 122
6.6 Wirkungsgrade im Nennpunkt der Flussbarrieren- und Referenzmaschine . . 123
6.7 Modelle zur Evolution der Flussbarrierenmaschine aus der Referenzmaschine 124
6.8 Harmonische bei reiner Stromspeisung bei Evolution der Flussbarrierenmaschine 126
6.9 Harmonische im Leerlauf bei Evolution der Flussbarrierenmaschine . . . 128
6.10 Mögliche fertigungsbedingte Ungenauigkeiten der Flussbarrierenmaschine . . 129
6.11 Drehmomente bei Abweichung der Bleche . . . 130
6.12 Drehmomentrippel bezogen auf das Drehmoment bei unterschiedlichen Abweichungen der Bleche . . . 130
6.13 Drehmomente bei einer radialen Verschiebung des Rotors . . . 131
6.14 Drehmomentrippel bezogen auf das Drehmoment bei unterschiedlicher radialer Verschiebung des Rotors . . . 131
6.15 Drehmomente bei Verdrehung der U-Module . . . 132

6.16 Drehmomentrippel bezogen auf das Drehmoment bei unterschiedlicher Verdrehung der U-Module . . . 132

7.1 Winkel der Rückfederung eines einzelnen Bleches über den Biegeradius . . . 137
7.2 Gebogene Bleche mit unterschiedlichen Radien . . . 137
7.3 Magnetisierungskurven eines Einzelbleches bei verschiedenen Blechradien gemessen durch Epstein-Test . . . 138
7.4 Eisenverluste eines Einzelbleches bei verschiedenen Blechradien gemessen durch Epstein-Test . . . 138
7.5 Querschnitt der Statorgeometrie V2 . . . 139
7.6 Gefertigter Stator der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 139
7.7 Bewickelter Stator der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 140
7.8 Drehmoment über den Außenradius der gebogenen Bleche . . . 140
7.9 Verluste über den Außenradius der gebogenen Bleche . . . 141
7.10 Wirbelstromverluste im Stator bei verschiedenen Außenradien der gebogenen Bleche . . . 141
7.11 Messaufbau und Leistungsmessgeräte für die Messungen der Maschinen . . . 143
7.12 Gemessene Strangspannung im Leerlauf der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 143
7.13 Gemessenes Wirkungsgradkennfeld der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 144
7.14 Simulierte Strangspannung im Leerlauf der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 145
7.15 Simuliertes Wirkungsgradkennfeld der Flussbarrierenmaschine V2 . . . 146
7.16 Gemessene Strangspannung im Leerlauf der Referenzmaschine . . . 147
7.17 Gemessenes Wirkungsgradkennfeld der Referenzmaschine . . . 148
7.18 Simulierte Strangspannung im Leerlauf der Referenzmaschine . . . 149
7.19 Simuliertes Wirkungsgradkennfeld der Referenzmaschine . . . 150
7.20 Vergleich der Wirkungsgradkennfelder bei gleichen Konditionen . . . 153

Tabellenverzeichnis

2.1 Gegenüberstellung verschiedener Maschinentopologien 11
2.2 Analogien zwischen elektrischem und magnetischem Kreis 18

3.1 Funktionswerte der Verteilung der magnetischen Spannungen 44
3.2 Funktionswerte der Luftspaltflussdichte bei Stromspeisung aus der FEM-Simulation und der Analytik 49

4.1 Abweichungen zwischen den Amplituden der Harmonischen bei massivem und laminierten Stator 68
4.2 Abweichungen zwischen den Amplituden der Harmonischen bei isotropen und anisotropen Stator 69
4.3 Abweichungen zwischen den Amplituden der Harmonischen bei massivem Stator mit isotropem Werkstoff und laminiertem Stator mit anisotropem Werkstoff 70
4.4 Abweichungen zwischen den Amplituden der Harmonischen bei massivem Blechstapel mit isotropem Werkstoff und laminiertem Blechstapel mit anisotropem Werkstoff bei Stärkung der 5. Harmonischen 71
4.5 Relevante Daten für die Berechnung der Abweichungen durch zusätzliche Flussbarrieren und des äquivalenten Wicklungsfaktors 75

5.1 Relevante Daten für die analytische Wirbelstromberechnung 94
5.2 Untersuchte FEM-Modelle 95
5.3 Relevante Daten für die Berechnung der Magnetverluste 113

6.1 Betriebspunkt der Flussbarrierenmaschine im Nennpunkt aus der FEM-Simulation 118
6.2 Betriebspunkt der Referenzmaschine im Nennpunkt aus der FEM-Simulation 119
6.3 Simulationsmodelle für die Maschinenevolution 125

7.1 Kenndaten im Nennpunkt der Flussbarrierenmaschine V2 aus der Messung . 144
7.2 Kenndaten im Nennpunkt der Flussbarrierenmaschine V2 aus der FEM-Simulation 146
7.3 Kenndaten im Nennpunkt der Referenzmaschine aus der Messung 148
7.4 Kenndaten im Nennpunkt der Referenzmaschine aus der FEM-Simulation . . 150
7.5 Maximaler Wirkungsgrad beider Maschinen 152

A.1 Eckdaten der Maschinen i
A.2 Kenndaten der Permanentmagneten i

D.1 Siemens Nebenschl.-Mot. 1GG5134-0GK46-6VV1-Z vii
D.2 Geräte für die mechanische und elektrische Leistungsmessung vii
D.3 Zusätzliche Messgeräte vii

Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmaschine
FEM	Finite-Elemente-Methode
FB	Flussbarriere
FSM	Flux-switching permanenterregte Synchronmaschine
PMSM	permanenterregte Synchronmaschine
QR	Querrichtung
RM	Reluktanzmaschine
SM	Synchronmaschine
WR	Walzrichtung

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
a_k	Fourierkoeffizient	–
a_{parallel}	Anzahl der parallelen Zweige	–
A	Fläche	m^2
A_{Cu}	Kupferfläche	m^2
A_{L}	Leiterfläche	m^2
$A_{\text{PM,ax}(\nu)}$	Durchflussfläche des magnetischen Widerstandes der ν-ten Harmonischen in den Permanentmagneten in axiale Richtung	m^2
$A_{\text{PM,tan}(\nu)}$	Durchflussfläche des magnetischen Widerstandes der ν-ten Harmonischen in den Permanentmagneten in tangentiale Richtung	m^2
A_{Q}	Nutfläche	m^2
b_{FB}	Flussbarrierenbreite	m
$b_{\text{FB,1}}$	Flussbarrierenbreite am Zahnkopf	m
$b_{\text{FB,2}}$	Flussbarrierenbreite am Joch	m
$b_{\text{FB,m}}$	Mittlere Flussbarrierenbreite	m
b_k	Fourierkoeffizient	–
b_{p}	Polbreite	m
b_{PM}	Magnetbreite	m
b_{Q}	Nutbreite	m
b_{Sp}	Spulenbreite	m
b_{Z}	Zahnbreite	m
B	Magnetische Flussdichte	T
B_δ	Luftspaltflussdichte	T
$\hat{B}_\delta$	Amplitude der Luftspaltflussdichte	T
$B_{\delta,\text{avg}}$	Durchschnittliche Luftspaltflussdichte	T
$B_{\delta,\text{max}}$	Maximale Luftspaltflussdichte	T
$B_{\delta,\text{min}}$	Minimale Luftspaltflussdichte	T
$\hat{B}_{\delta(\nu)}$	Amplitude der Luftspaltflussdichte der ν-ten Harmonischen	T
$\hat{B}_{\text{Fe}}$	Amplitude der magnetische Flussdichte im Eisen	T
B_{r}	Remanenzflussdichte	T
C	Materialspezifischer Wert der anormalen Wirbelstromverluste	–
d_{Fe}	Blechdicke	m
$D_{1\text{a}}$	Statoraußendurchmesser	m
$D_{1\text{i}}$	Statorinnendurchmesser	m

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
D_{2a}	Rotoraußendurchmesser	m
E	Elektrische Feldstärke	V/m
f	Frequenz	Hz
f_1	Statorfrequenz	Hz
f_{FB}	Verhältnis der Flussbarrieren zwischen den Spulen zu den Flussbarrieren zwischen den Strängen	–
$f_{G,w}$	Grenzfrequenz der Wirbelströme	Hz
$f_{PM(\nu)}$	Frequenz der ν-ten Harmonischen im Permanentmagneten	Hz
f_{Wol}	Wolmansche Grenzfrequenz	Hz
$F(\lambda_i)$	Faktor der Stromverdrängung	–
h	Höhe	m
h_{Fe}	Blechhöhe	m
$h_{Fe,1}$	Höhe der Blechinnenseite	m
$h_{Fe,2}$	Höhe der Blechaußenseite	m
h_{PM}	Magnethöhe	m
h_Z	Zahnhöhe	m
H	Magnetische Feldstärke	A/m
H_c	Koerzitivfeldstärke	A/m
I	Strom	A
I_S	Strangstrom	A
j	Stromdichte	A/m^2
j_N	Nennstromdichte	A/m^2
$j_{0,PM(\nu)}$	Oberflächenwirbelstromdichte der ν-ten Harmonischen im Permanentmagneten	A/m^2
$j_{PM(\nu)}$	Wirbelstromdichte der ν-ten Harmonischen im Permanentmagneten	A/m^2
J	Magnetische Polarisation	T
J_r	Remanente Polarisation	T
J_S	Sättigungspolarisation	T
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor	–
k_{P_w}	Verlustfaktor bei Skalierung der Maschinenlänge	–
l	Länge	m
l_{Fe}	Blechlänge	m
l_i	Maschinenlänge	m
l_m	Mittlere Windungslänge	m
l_p	Pollänge	m
l_{PM}	Magnetlänge	m
m	Anzahl der Statorstränge	–
M	Magnetisierung	A/m
M_{emag}	Elektromagnetisches Drehmoment	Nm
M_{me}	Mechanisches Drehmoment	Nm
n	Drehzahl	min^{-1}
n_N	Nenndrehzahl	min^{-1}
N_{FB}	Anzahl der Flussbarrieren	–
N_{Fe}	Anzahl der Bleche	–

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
p	Polpaarzahl	–
p_{mag}	Magnetisches Moment	$\mathrm{A\,m^2}$
P_{1}	Eingangsleistung	W
P_{a}	Anomale Wirbelstromverluste	W
P_{Fe}	Eisenverluste	W
P_{h}	Hystereseverluste	W
P_{me}	Mechanische Leistung	W
P_{PM}	Permanentmagnetverluste	W
$P_{\mathrm{PM}(\nu)}$	Permanentmagnetverluste der ν-ten Harmonischen	W
P_{Str}	Stromwärmeverluste	W
P_{w}	Klassische Wirbelstromverluste	W
q	Lochzahl	–
Q	Wärme	$\mathrm{kg\,m^2/s^2}$
Q_{S}	Anzahl der Statornuten	–
r_{PM}	Magnetradius	m
r_{Sp}	Radius der Spule	m
r_{U}	Außenradius der gebogenen Bleche	m
R	Elektrischer Widerstand	Ω
R_{m}	Magnetischer Widerstand	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m},\delta}$	Magnetischer Widerstand des Luftspaltes	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m,FB}}$	Magnetischer Widerstand der Flussbarriere	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m,Fe}}$	Magnetischer Widerstand des Eisens	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m,J}}$	Magnetischer Widerstand des Joches	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m,PM}(\nu)}$	Magnetischer Widerstand der ν-ten Harmonischen in den Permanentmagneten	$\mathrm{A/(V\,s)}$
$R_{\mathrm{m,Z}}$	Magnetischer Widerstand des Zahns	$\mathrm{A/(V\,s)}$
R_{S}	Elektrischer Strangwiderstand	Ω
R_{th}	Wärmewiderstand	K/W
s	Strecke	m
t	Zeit	s
T	Periode	1/s
T	Temperatur	K
U	Elektrische Spannung	V
U_{i}	Induzierte Spannung	V
$U_{\mathrm{i,PM}(\nu)}$	Induzierte Spannung der ν-ten Harmonischen in den Permanentmagneten	V
U_{N}	Elektrische Nennspannung	V
U_{S}	Strangspannung	V
V	Volumen	$\mathrm{m^3}$
$V_{\mathrm{i_{FB}}}^{\delta}$	Magnetische Spannungssprünge im Luftspalt an einer Flussbarriere	A
$V_{(\nu)}^{\mathrm{FB}}$	Größe zur Berechnung des äquivalenten Wicklungfaktors	A
V_{Fe}	Eisenvolumen	$\mathrm{m^3}$
V_{m}	Magnetische Spannung	A
w	Windungszahl	–
w_1	Statorwindungszahl	–

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
w_{Sp}	Spulenwindungszahl	–
W_{Sp}	Spulenweite	m
α	Winkel	rad
α_{i}	Winkel der Spulenposition	rad
$\alpha_{\mathrm{i_{FB}}}$	Winkel der Flussbarrierenposition	rad
α_{Q}	Nutenwinkel	rad
β_{FB}	Öffnungswinkel der Flussbarriere	rad
β_{Q}	Öffnungswinkel der Nut	rad
β_{U}	Öffnungswinkel der gebogenen Bleche	rad
β_{Z}	Öffnungswinkel des Zahns	rad
δ	Luftspalt	m
$\Delta\beta$	Verdrehung der U-Module	rad
Δh_{Fe}	Radiale Abweichung der Statorbleche	m
δ_{i}	Eindringtiefe	m
$\delta_{\mathrm{i,PM}(\nu)}$	Eindringtiefe der ν-ten Harmonischen im Permanentmagneten	m
ΔM_2	Radiale Abweichung des Rotormittelpunktes	m
ΔM_{emag}	Drehmomentrippel	Nm
η	Wirkungsgrad	–
$\gamma_{\mathrm{B_r}}$	Temperaturkoeffizient der Remanenzflussdichte	%/K
$\gamma_{\mathrm{H_c}}$	Temperaturkoeffizient der Koerzitivfeldstärke	%/K
λ_{i}	Verhältnis von Blechdicke zu Eindringtiefe	–
λ_{Q}	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
μ	Magnetische Permeabilität	V s/(A m)
μ_0	Magnetische Permeabilität von Vakuum	V s/(A m)
μ_{r}	Relative Permeabilität	–
$\mu_{\mathrm{r,PM}}$	Relative Permeabilität der Permanentmagneten	–
$\mu_{\mathrm{r,QR}}$	Relative Permeabilität in Querrichtung	–
$\mu_{\mathrm{r,WR}}$	Relative Permeabilität in Walzrichtung	–
ν	Ordnungszahl	–
ω	Kreisfrequenz	1/s
φ	Elektrisches Potential	V
Φ	Magnetischer Fluss	V s
Φ_{H}	Hauptfluss	V s
$\hat{\Phi}_{\mathrm{PM}(\nu)}$	Amplitude des magnetischen Flusses der ν-ten Harmonischen in den Permanentmagneten	V s
ρ	Dichte	$\mathrm{g/m^3}$
ρ_{PM}	Spezifischer elektrischer Widerstand der Permanentmagneten	Ω m
σ_{el}	Spezifische elektrische Leitfähigkeit	S/m
σ_{Fe}	Spezifische elektrische Leitfähigkeit des Eisens	S/m
τ_{p}	Polteilung	m
τ_{Q}	Nutteilung	m
$\tau_{\mathrm{Q}(\nu)}$	Nutteilung der ν-ten Harmonischen	m
Θ	Durchflutung	A
Θ_{a}	Summe der Beträge der betrachteten Durchflutungen	A

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
ϑ	Umfangswinkel	rad
$\xi_{(\nu)}$	Wicklungsfaktor der ν-ten Harmonischen	–
$\xi_{\mathrm{N}(\nu)}$	Nutschlitzbreitenfaktor der ν-ten Harmonischen	–
$\xi_{\mathrm{S}(\nu)}$	Sehungsfaktor der ν-ten Harmonischen	–
$\xi_{\mathrm{Z}(\nu)}$	Zonungsfaktor der ν-ten Harmonischen	–