

Julian C. Berlinecke

**Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit
permanentmagneterregten Synchronmaschinen
in automobiler Anwendung**



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit
permanentmagneterregten Synchronmaschinen
in automobiler Anwendung





Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit permanentmagneterregten Synchronmaschinen in automobiler Anwendung

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von M.Sc. Julian Christoph Berlinecke
aus Gifhorn

eingereicht am: 15.10.2019

mündliche Prüfung am: 18.02.2020

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Markus Henke
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick

Druckjahr: 2020



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2020

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2020

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2020

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7291-9

eISBN 978-3-7369-6291-0



Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung *Elektrifizierter Antriebsstrang* in der Konzernforschung der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg.

Meinen besonderen Dank möchte ich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Henke für das entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung meines Promotionsvorhabens richten. Sowohl die zahlreichen fachlichen Diskussionen als auch die persönliche Betreuung haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Frau Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Robert Plikat für die Unterstützung bei der Themenfindung, den fachlichen Austausch und die fortwährende Begleitung meines Promotionsvorhabens. Ebenso bedanke ich mich bei meinen Kollegen Herrn Patrick Heumann sowie Herrn Dr.-Ing. Zdeno Neuschl für die umfangreichen fachlichen Diskussionen, die tägliche Zusammenarbeit sowie die persönliche Unterstützung während meiner gesamten Promotionszeit.

Zudem wären die Fertigung der Versuchsmaschine sowie die Messungen am Antriebsprüfstand nicht ohne den engagierten Einsatz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Konzernforschung der Volkswagen AG möglich gewesen, sodass auch Ihnen mein Dank gebührt. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Fabian Streit sowie Herrn Stefan Piepenbreier für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojekts *HoskA* sowie die Unterstützung bei der Umsetzung der Messungen am Antriebsprüfstand.

Abschließend möchte ich mich insbesondere bei meinen Eltern, meiner Partnerin sowie meinen Freunden bedanken, die mir stets Verständnis entgegengebracht und den Freiraum zur Anfertigung meiner wissenschaftlichen Arbeit gegeben haben. Ohne ihre Unterstützung wäre die Umsetzung meines Forschungsvorhabens in dieser Form nicht möglich gewesen.

Julian Berlinecke
Mai 2020



Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen AG.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Kurzfassung

Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit Strangzahlen größer als drei werden in heutigen Fahrzeuganwendungen nur vereinzelt eingesetzt. Obwohl Mehrphasensysteme bereits seit mehreren Jahrzehnten bekannt sind, werden Freiheitsgrade und Vorteile der Mehrphasigkeit beispielsweise vor dem Hintergrund einer Kondensator- und Bauraumreduktion nur selten genutzt. Ziel dieser Arbeit ist es daher, mit Hilfe eines Untersuchungsansatzes die Mehrphasigkeit bei konstanten Randbedingungen sowohl im Hinblick auf die elektrische Maschine als auch aus systemischer Sicht zu untersuchen. Anhand eines systematischen Vorgehens werden dabei vorteilhafte Strangzahlen identifiziert und Kriterien definiert, die eine Bewertung der Strangzahl mit Bezug auf eine automobilen Fahrzeuganwendung ermöglichen.

Aufbauend auf einerwicklungsbewertung mehrsträngiger Ganzloch- sowie Zahnspulenwicklungen werden Untersuchungsvarianten permanentmagneterregter Synchronmaschinen ausgelegt und im Hinblick auf strangzahlbedingte Änderungen in Parametern und Betriebseigenschaften analysiert. Für die Untersuchungsvarianten ist bei Sinusstromspeisung und mit Bezug auf geringe Drehmomentwelligkeiten sowie Magnetverluste eine Erhöhung der Strangzahl insbesondere aufgrund einer reduzierten Anzahl von Harmonischen in den Felderregerkurven vorteilhaft. Werden weiterführend auch systemische Umfänge betrachtet, so sind bei Betrieb am Spannungswechselrichter zusätzliche Effekte zu berücksichtigen, die Einfluss auf das Betriebsverhalten mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen haben. Nach einer Bewertung mehrphasiger Raumzeigermodulationen wird daher auf taktungsbedingte Stromüberschwingungen bzw. Stromwelligkeiten eingegangen, die durch Selbst- sowie Koppellinduktivitäten zwischen den Wicklungssträngen beeinflusst werden. Im Vergleich zur dreisträngigen Wicklungsauslegung ist speziell bei hohen Strangzahlen und einer Vielzahl von Koppelfaktoren unterschiedlicher Beträge und Vorzeichen eine deutliche Erhöhung der Stromwelligkeit festzustellen. Ein aus der Literatur bekannter Ansatz zur Bestimmung der taktungsbedingten Spitze-Spitze-Stromwelligkeit wird daher im Rahmen dieser Arbeit um den Einfluss induktiver Strangverkopplungen erweitert. Darüber hinaus werden die Potentiale der Kondensatorreduktion bei einer Erhöhung der Strangzahl mit Bezug auf die Kondensatorwechselstrombelastung sowie die Kondensatorspannungswelligkeit aufgezeigt. Die Option des versetzten Taktens in Mehrphasensystemen mit mehreren Teilsystemen ermöglicht dabei eine Reduktion der Kondensatorwechselstrombelastung und somit eine Reduktion der Kapazität. Am Beispiel eines neunsträngigen Systems ist eine Kapazitätsreduktion um bis zu 60 % möglich.

Anhand zuvor definierter Bewertungskriterien wird im Anschluss an die Maschinen- und Systemanalysen eine begründete Wahl einer Strangzahl vorgenommen und eine Versuchsmaschine mit mehreren Teilsystemen ausgelegt, die bei hohen Drehmoment- und Leistungsdichten für eine Anwendung im Elektrofahrzeug geeignet ist. Durch Prüfstandsmessungen werden neben einer Oberschwingungsregelung insbesondere die Modelle zur Bestimmung der taktungsbedingten Stromwelligkeit unter Berücksichtigung induktiver Strangverkopplungen validiert. Aufgrund hoher taktungsbedingter Stromüberschwingungen ist der Betrieb der mehrsträngigen Versuchsmaschine mit Ganzlochwicklung und einer erhöhten Anzahl unterschiedlicher Koppellinduktivitäten nur bei ausreichend hohen Schaltfrequenzen zu empfehlen.



Abstract

Multiphase electric drive systems with a number of phases larger than three only play a minor role in today's automotive application. Although multiphase machines are known for several decades, many degrees of freedom and beneficial characteristics of multiphase drive systems are only occasionally utilised.

The aim of this thesis is to analyze multiphase electric machines and multiphase drive systems with respect to the number of phases under constant boundary conditions. Based on an analysis approach, beneficial numbers of phases are identified and criteria are defined, which allow an assessment of the number of phases for an automotive application.

Following a study on winding theory of multiphase distributed and fractional-slot concentrated-windings, multiphase permanent magnet synchronous machines are designed and analyzed with 2-D finite element method. Machine parameters and characteristics are evaluated and differences due to a variation in the number of phases are determined. Regarding the examined machine designs and an ideal sinusoidal current supply, an increase of the number of phases is beneficial because of reduced magnetomotive force harmonics and a decrease in magnet loss and torque ripple. For further analysis, additional effects because of an inverter supply have to be considered, which affect multiphase machine operation. Based on an assessment of multiphase space vector pulse-width modulation (SVPWM) techniques, the influence of phase magnetic couplings on phase currents and peak-to-peak current ripple is studied for various numbers of phases. Especially for distributed windings with a large number of phases and coupling factors with different magnitudes, an increase in the peak-to-peak current ripple can be noted. As a consequence, a literature-based approach referring to the peak-to-peak current ripple is extended by the influence of magnetic coupling factors. In addition, the RMS current stress on the DC-link capacitor as well as the DC-link voltage ripple are analyzed for multiphase SVPWM. Using multiple subsystems and interleaved SVPWM, the DC-link RMS current and therefore the size of the DC-link capacitance can be reduced. Exemplary for a nine-phase system, a decrease up to 60 % is feasible.

Based on defined evaluation criteria the number of phases for an automotive application is selected and a permanent magnet synchronous machine with multiple subsystems characterized by a high torque and power density is designed. Using *Vector Space Decomposition*, a harmonic current control is implemented for test bench operation and models used for the determination of peak-to-peak current ripples are validated by measurement. Because of large amplitudes of current harmonics in inverter operation, high switching frequencies are needed to limit the peak-to-peak current ripple in the test bench machine with distributed winding and a large number of different mutual inductances.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik mehrphasiger Antriebe	4
2.1 Definition und Strukturierung von Mehrphasensystemen	4
2.2 Argumente für den Einsatz von Mehrphasensystemen und höheren Strangzahlen	7
2.2.1 Elektrische Maschine	7
2.2.2 Wechselrichter und System	9
3 Modellbildung mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen	13
3.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschinen im elektrifizierten Antriebsstrang	13
3.2 Modellbildung dreisträngiger PMSM	14
3.3 Erweiterung der Modellbildung für höhere Strangzahlen	17
3.3.1 Modellierung mit Vector Space Decomposition	17
3.3.2 Modellierung als eigenständige Teilsysteme	22
3.4 Modelle und Strategien für den Betrieb mehrsträngiger PMSM	25
4 Systematische Analyse mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen	29
4.1 Zielstellung und Vorgehen	29
4.2 Gesetzmäßigkeiten mehrsträngiger Wicklungen	30
4.2.1 Mehrsträngige Ganzlochwicklungen	31
4.2.2 Mehrsträngige Zahnspulenwicklungen	36
4.2.3 Bewertung mehrsträngiger Wicklungen	39
4.3 Ableiten eines Untersuchungsansatzes	43
4.3.1 Vorüberlegungen	44
4.3.2 Begründen des Ansatzes	45
4.3.3 Definition von Untersuchungsvarianten	46
4.4 Einfluss der Strangzahl auf Maschinenparameter	48
4.4.1 Strangwiderstand	49
4.4.2 Selbstinduktivität	50
4.4.3 Koppelinduktivitäten	57
4.4.4 Parameternachweis durch Messung ohne Rotor	61
4.5 Einfluss der Strangzahl auf Betriebseigenschaften	64
4.5.1 Induzierte Spannungen im Leerlauf	65



4.5.2	Mittlere Drehmomente und Drehmomentwelligkeit	67
4.5.3	Verlustbetrachtungen	72
4.6	Zusammenfassung und Bewertung der Analyseergebnisse	77
5	Erweiterung der Analyse um Systembetrachtungen	80
5.1	Erhöhte Systemkomplexität aufgrund der Mehrphasigkeit	81
5.2	Bewertung mehrphasiger Ansteuerverfahren	82
5.2.1	Raumzeigermodulation mit maximaler Spannungsausnutzung	83
5.2.2	Raumzeigermodulation mit minimaler Spannungsverzerrung	86
5.3	Stromwelligkeit unter Berücksichtigung von induktiven Strangverkopplungen	89
5.3.1	Stromwelligkeit bei dreiphasiger Raumzeigermodulation	89
5.3.2	Stromwelligkeit bei mehrphasiger Raumzeigermodulation	94
5.4	Belastung des Zwischenkreiskondensators	98
5.4.1	Wechselstrombelastung	98
5.4.2	Spannungswelligkeit	103
5.5	Zusammenfassung und Bewertung der Systembetrachtungen	107
6	Begründete Wahl einer Strangzahl und Entwurf einer Versuchsmaschine	109
6.1	Gesamtheitliche Bewertung und Wahl einer geeigneten Strangzahl	109
6.2	Entwurf einer mehrsträngigen Versuchsmaschine	113
6.2.1	Prämissen und Spezifikation	113
6.2.2	Elektromagnetische Modellbildung	114
6.2.3	Vector Space Decomposition für mehrere Teilsysteme	116
6.3	Simulativer Vergleich zwischen drei- und neunsträngiger Wicklungsausführung	118
6.3.1	Drehzahl-Drehmoment- und Drehzahl-Leistungs-Kennlinien	118
6.3.2	Drehmomentwelligkeit bei Sinusstromspeisung	119
6.3.3	Maschinenverluste bei Sinusstrom- und bei Wechselrichterspeisung	120
7	Experimentelle Analyse und Validierung an mehrphasiger Versuchsmaschine	129
7.1	Umsetzung am Antriebsprüfstand	129
7.2	Messungen zur Bestimmung von Maschinenparametern	130
7.2.1	Permanentmagnetflussverkettung	131
7.2.2	Strangwiderstände und -induktivitäten	132
7.2.3	Längsinduktivität mittels Kurzschlussversuch	135
7.3	Messungen im geregelten Betrieb	136
7.3.1	Reduktion von Stromüberschwingungen bei neunphasigem Betrieb	136
7.3.2	Nachweis von Stromwelligkeiten bei induktiven Strangverkopplungen	141
7.3.3	Anmerkung zum Zwischenkreiswechselstrom	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	152
Anhang A: Bestimmung des Wickelkopfwiderstands		I
Anhang B: Datenblattangaben zu eingesetzten Materialien		IV
Abbildungsverzeichnis		VI



Tabellenverzeichnis	XII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbol- und Formelzeichenverzeichnis	XVI
Literaturverzeichnis	XXIV





1 Einleitung

Im Zuge der zunehmenden Elektrifizierung von Fahrzeugantrieben steigen die Anforderungen an die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs in Bezug auf Leistungs- und Drehmomentdichte, Wirkungsgrad oder Kosten kontinuierlich an. Ein Parameter, der dabei von zunehmendem Interesse ist, ist die Strang- oder Phasenzahl des Antriebssystems. Während herkömmliche Fahrzeugantriebe zumeist dreiphasig ausgelegt sind und somit ein Drehstromsystem ausbilden, wie es beispielsweise aus der Energieversorgung für Transport und Verteilung elektrischer Energie bekannt ist, bieten Strangzahlen größer als drei die Möglichkeit, zusätzliche Freiheitsgrade zu nutzen und Vorteile in Bezug auf die zuvor genannten Kriterien zu erzielen.

Obwohl mehrsträngige Systeme mit Strangzahlen größer als drei bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt sind, beschränkte sich der Einsatz zunächst auf Anwendungen, bei denen eine Aufteilung des Stroms auf mehrere Stränge zielführend war, um z. B. Begrenzungen im Stromabschaltvermögen bestehender Schalteinheiten zu überwinden und eine Leistungsaufteilung zu ermöglichen [1] oder Fehlerströme zu begrenzen [2]. Erst mit zunehmender Weiterentwicklung mehrphasiger Antriebe kamen weitere Vorteile beispielsweise hinsichtlich reduzierter Verluste oder Drehmomentpulsationen hinzu, wie in [3] für eine sechshephasige Asynchronmaschine beschrieben ist. In der heutigen Anwendung werden mehrsträngige Systeme mit Strangzahlen größer als drei zumeist aufgrund spezifischer Vorteile bestimmter Strangzahlen eingesetzt, die nach [4] beispielsweise eine Reduktion der Zwischenkreiskapazität ermöglichen. Eine systematische Analyse verschiedener Strangzahlen unter Berücksichtigung von elektrischer Maschine sowie Wechselrichter und System unter Einhaltung anwendungsspezifischer Restriktionen bleibt zumeist aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein Untersuchungsansatz begründet, mit dem eine Vergleichbarkeit bei verschiedenen Strangzahlen hergestellt und eine gesamtheitliche Bewertung hinsichtlich der Strangzahl vorgenommen werden kann. Mit Hilfe des Ansatzes können strangzahlbedingte Unterschiede in Maschinen- und Betriebsparametern aufgezeigt werden, die über eine reine Wicklungsbewertung hinausgehen. Des Weiteren werden dabei systemische Umfänge berücksichtigt, die angepasste Ansteuerverfahren beinhalten sowie eine mit der Strangzahl veränderliche Kondensatorbelastung analysieren. Dabei wird neben der Kapazitätsreduktion durch den Versatz von PWM-Perioden insbesondere auf taktungsbedingte Stromüberschwingungen eingegangen, die eine Abhängigkeit von den Selbst- und Koppelinduktivitäten der elektrischen Maschine und somit der Strangzahl aufweisen. Ein aus der Literatur bekannter Ansatz zur Bestimmung der Spitze-Spitze-Stromwelligkeit wird dazu um den Einfluss induktiver Kopplungen zwischen Wicklungssträngen erweitert. Eine detaillierte Beschreibung von Aufbau und Inhalt der Arbeit ist in Abbildung 1.1 gegeben und wird im Folgenden erläutert.

Gemäß Abbildung 1.1 wird im Anschluss an die Einleitung in Kapitel 2 zunächst ein ausführlicher Überblick über den aktuellen Stand der Technik mehrphasiger Antriebe gegeben. Nach einer Definition und Strukturierung von Mehrphasensystemen werden bekannte Vor- und

Nachteile sowie Einsatzgebiete mehrphasiger Antriebe vorgestellt und anhand relevanter Literatur belegt. Die Einordnung ermöglicht eine erste Einschätzung bevorzugter Strangzahlen und Schaltungsvarianten.

Aufbauend auf der vorgenommenen Strukturierung von Mehrphasensystemen werden in Kapitel 3 die für die nachfolgenden Analysen notwendigen Modelle für den in dieser Arbeit gewählten Maschinentyp einer permanentmagneterregten Synchronmaschine begründet. Beginnend mit einer dreisträngigen Modellbildung werden die Modelle für höhere Strangzahlen erweitert und in verallgemeinerter Form dargestellt. Dabei wird zwischen zwei in der Literatur bekannten Ansätzen zur Modellierung unterschieden.

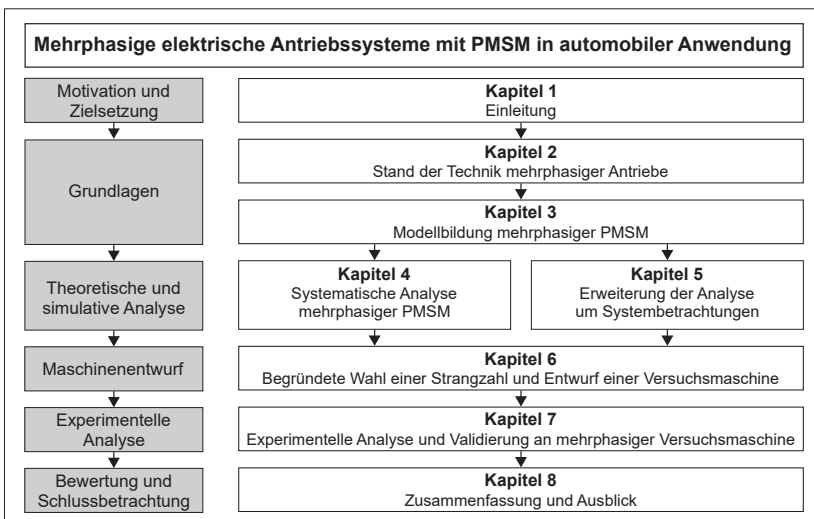


Abbildung 1.1: Strukturbild zum Aufbau der Arbeit

Mit Hilfe der vorgestellten Modellbildung beginnt in Kapitel 4 die theoretische und simulative Analyse mehrphasiger permanentmagneterregter Synchronmaschinen. Auf Basis der in Kapitel 2 eingeführten Definition von Mehrphasensystemen werden zunächst die Gesetzmäßigkeiten mehrsträngiger Wicklungen erläutert sowie eine Bewertung strangzahlabhängiger Wicklungseigenschaften vorgenommen. Im Anschluss wird ein Ansatz zur Untersuchung von Mehrphasensystemen begründet, der für eine Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Strangzahlen konstante Randbedingungen herstellt. Unter Verwendung des Ansatzes können anhand von Untersuchungsvarianten strangzahlbedingte Unterschiede in Maschinenparametern und Betriebseigenschaften aufgezeigt werden, die über eine ausschließliche Wicklungsbetrachtung hinausgehen. So werden in den Untersuchungen beispielsweise Abhängigkeiten aufgrund geänderter Nutzahlen sowie Nutschlitzbreiten berücksichtigt.

Parallel zu den Ausführungen in Kapitel 4 findet in Kapitel 5 eine Analyse hinsichtlich der Strangzahl vor dem Hintergrund systemischer Umfänge statt. Basierend auf einer Bewertung

mehrphasiger Ansteuerverfahren wird sowohl die Wechselstrombelastung als auch die Spannungswelligkeit am Zwischenkreiskondensator bei verschiedenen Strangzahlen untersucht. Eine mögliche Reduktion der Zwischenkreiskapazität durch den Versatz von Trägersignalen bei Einsatz mehrerer Teilsysteme wird simulativ für verschiedene Strangzahlen nachgewiesen. Darüber hinaus wird ein bekannter Ansatz zur Bestimmung der Spitze-Spitze-Stromwelligkeit um den Einfluss induktiver Kopplungen zwischen Wicklungssträngen erweitert. Die Bedeutung der Koppelinduktivitäten in mehrphasigen permanentmagneterregten Synchronmaschinen auf taktungsbedingte Stromüberschwingungen wird begründet aufgezeigt.

Im Anschluss an die theoretischen Analysen wird in Kapitel 6 eine mehrphasige Versuchsmaschine entworfen, die bei hoher Drehmoment- und Leistungsdichte für eine Fahrzeuganwendung geeignet ist. Die Wahl der Strangzahl stützt sich dabei auf die Analyseergebnisse der Kapitel 4 und 5. Vor diesem Hintergrund werden zudem Maximalenlinien, Drehmomentwelligkeiten sowie die Maschinenverluste der neunsträngigen Versuchsmaschine simulativ mit einer dreisträngigen Referenzanlegung verglichen.

In Kapitel 7 erfolgt die experimentelle Analyse und Validierung am Antriebsprüfstand. Dazu werden sowohl die Maschinenparameter der zuvor entworfenen Versuchsmaschine messtechnisch bestimmt als auch der geregelte Betrieb mit mehreren Teilsystemen untersucht. Die Reduktion von Stromüberschwingungen durch eine Oberschwingungsregelung kann für den stationären Betrieb nachgewiesen werden. Ebenso kann der Einfluss der Koppelinduktivitäten auf die taktungsbedingten Stromüberschwingungen für verschiedene Betriebspunkte messtechnisch aufgezeigt und mittels geeigneter Simulationsmodelle validiert werden.

Abschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Themenfelder gegeben.

2 Stand der Technik mehrphasiger Antriebe

2.1 Definition und Strukturierung von Mehrphasensystemen

Mehrsträngige oder mehrphasige Antriebe definieren sich über das Wicklungssystem der elektrischen Maschine. Die Wicklungen einer elektrischen Maschine können dabei verschieden ausgeführt sowie verschaltet sein und beeinflussen maßgeblich das Betriebsverhalten. Sie werden für die betrachtete Gruppe der Wechselstromwicklungen aus in Nuten liegenden und zusammenschalteten Einzelspulen gebildet, sodass sich angelehnt an [5] die in dieser Arbeit gültige Definition der Mehrphasigkeit wie folgt ergibt:

Wicklungsteile, die mit phasengleichen Strömen gespeist werden, werden als Wicklungsstrang oder Strang bezeichnet. Ein mehrsträngiges bzw. mehrphasiges Wicklungssystem besteht somit aus mehreren Strängen, die jeweils mit phasenverschobenen elektrischen Größen zumeist gleicher Amplitude gespeist werden. Die Anzahl der Wicklungsstränge wird als Strangzahl bzw. abgeleitet aus der Definition als Phasenzahl bezeichnet und mit der Variable m abgekürzt. (vgl. [5, S. 3-5])

Mehrsträngige Wicklungen werden in häufigster Anwendung dreisträngig ausgeführt und bilden die Grundlage für die Erzeugung von Drehfeldern in elektrischen Maschinen, wie sie in heutigen Fahrzeugantrieben zum Einsatz kommen. Wicklungen mit mehr als drei Strängen sind zentraler Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit und sollen im Folgenden anhand der Strangzahl kategorisiert werden, um eine begründete Auswahl vorteilhafter Strangzahlen zu ermöglichen. Grundsätzlich können drei Kategorien unterschieden werden, die sich an den Ausführungen in [5, S. 20-28] orientieren:

Kategorie 1 – Ungerade Strangzahl

Mehrsträngige Wicklungssysteme mit ungerader Strangzahl m können radialsymmetrisch aufgebaut werden. Die Strangachsen werden dazu im Winkelkoordinatensystem gleichmäßig verteilt. Die elektrische Phasenverschiebung φ_{sym} sowie der räumliche Strangversatz γ_{sym} zwischen den Strängen sind nach Gleichung (2.1) jeweils konstant [5, S. 24]. Die Variable p beschreibt in der Gleichung die Polpaarzahl.

$$\varphi_{\text{sym}}(m) = \frac{2\pi}{m}, \quad \text{bzw.} \quad \gamma_{\text{sym}}(m) = \frac{2\pi}{mp} \quad (2.1)$$

Die Zusammenschaltung einer ungeraden Anzahl an Strängen in einem Sternpunkt bzw. in einer Polygonverschaltung ist ohne Einschränkungen möglich. Nach den Kirchhoffschen Gesetzen sind bei Speisung mit symmetrischen elektrischen Größen in diesem Fall entweder Strangstrom- oder Strangspannungssumme Null. Ein Sternpunkt ist somit nicht belastet. Symmetrische Mehrphasensysteme bei verschiedenen ungeraden Strangzahlen sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

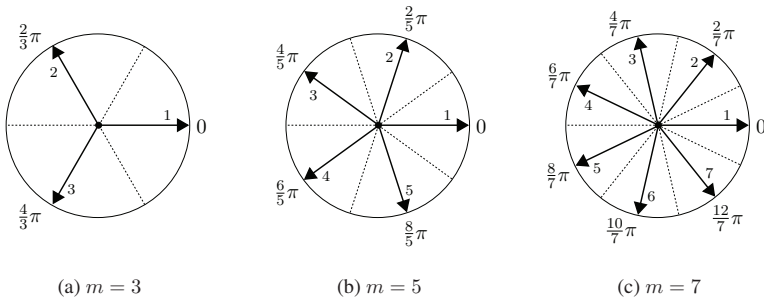
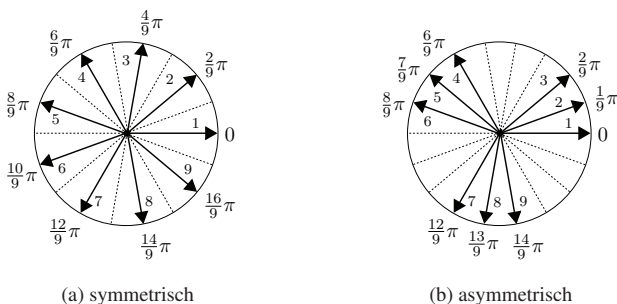


Abbildung 2.1: Mehrphasensysteme bei ungerader Strangzahl

Bei ungeraden Strangzahlen, die ein Vielfaches einer ungeraden Zahl darstellen, kann neben einer symmetrischen Strangverteilung auch eine asymmetrische Strangverteilung realisiert werden [6, S. 10-11]. In Abbildung 2.2 ist beispielhaft ein symmetrisches sowie ein asymmetrisches Neunphasensystem gezeigt. In asymmetrischen Systemen sind die Phasenverschiebungen zwischen benachbarten Strängen nicht gleich. Asymmetrische Systeme bestehen aus mehreren Teilsystemen mit ungerader Strangzahl m^* . Innerhalb eines Teilsystems ist die Phasenverschiebung gleich, die Teilsysteme selbst sind nach Gleichung (2.2) jeweils um einen Winkel φ_{asym} gegeneinander versetzt [5, S. 25]. In Abbildung 2.2 ist das asymmetrische neunphasige System aus drei Teilsystemen aufgebaut, die zueinander eine elektrische Phasenverschiebung von $\varphi_{\text{asym}} = 20^\circ$ aufweisen. Die zeitlichen Verläufe der elektrischen Größen sind in asymmetrischen und symmetrischen Systemen somit unterschiedlich.

$$\varphi_{\text{asym}}(m) = \frac{\pi}{m}, \quad \text{bzw.} \quad \gamma_{\text{asym}}(m) = \frac{\pi}{mp} \quad (2.2)$$


 Abbildung 2.2: Symmetrisches und asymmetrisches Mehrphasensystem bei Strangzahl $m = 9$

Kategorie 2 – Gerade Strangzahl mit ungeradzahligem Teiler

Bei gerader Strangzahl mit mindestens einem ungeradzahligem Teiler können Systeme aus mehreren Teilsystemen ungerader Strangzahl m^* gebildet werden, sodass eine Entlastung des Sternpunkts erreicht werden kann. Während die elektrischen Phasenverschiebungen zwischen den

Strängen in einem Teilsystem untereinander gleich sind, sind die einzelnen Teilsysteme bei asymmetrischer Strangverteilung entsprechend Gleichung (2.2) gegeneinander verschoben. In Abbildung 2.3 sind unterschiedliche asymmetrische Mehrphasensysteme bei gerader Strangzahl dargestellt. Die Summe der Strangströme bzw. -spannungen ist in Abhängigkeit von der Verschaltung auch in diesen Systemen Null. Eine Polygonverschaltung der Wicklungsstränge ist jedoch nur dann möglich, wenn die Versatzwinkel zwischen allen im Polygon geschalteten Strängen gleich sind, wie in [5, S. 24f.] vorgestellt ist. Eine symmetrische Anordnung ist grundsätzlich denkbar, führt aufgrund einer gleichen Anzahl magnetischer Achsen pro Polteilung aber zu Systemen, die nach [6, S. 10-12] aus magnetischer Sicht als gleichwertig zu Systemen geringerer Strangzahl anzusehen sind. So ist ein symmetrisches Sechssystem bezogen auf die magnetischen Achsen pro Polteilung einem dreiphasigen System gleichzustellen. Ein symmetrisches Zehnsystem ist einem Fünfphasensystem gleichzusetzen.

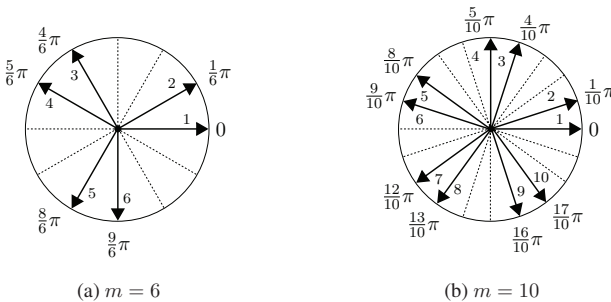


Abbildung 2.3: Mehrphasensysteme bei gerader Strangzahl mit ungeradzahligem Teiler

Kategorie 3 – Gerade Strangzahl ohne ungeradzahligem Teiler

Bei mehrsträngigen Wicklungen gerader Strangzahl ohne ungeradzahligem Teiler ist die Summe der Ströme bzw. Spannungen stets ungleich Null und eine vollständige Entlastung des Sternpunkts nicht möglich. Durch eine entsprechende Anordnung der Stränge lassen sich nach Abbildung 2.4 jedoch Mehrphasensysteme bilden, die eine reduzierte Sternpunktbelastung ermöglichen. Die praktische Bedeutung beschränkt sich auf zweisträngige Wicklungen bei Einphasenmaschinen mit Haupt- und Hilfsstrang. [5, S. 25]

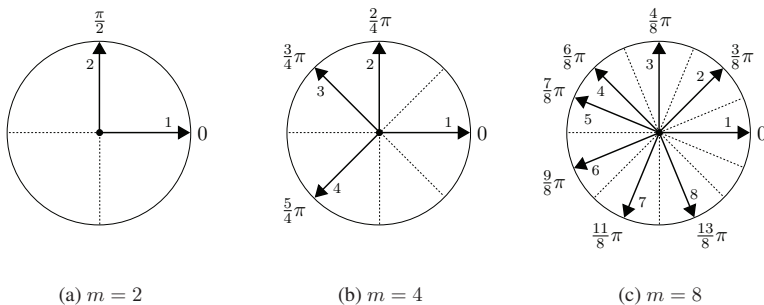


Abbildung 2.4: Mehrphasensysteme bei gerader Strangzahl ohne ungeradzahligem Teiler

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass nicht alle Strangzahlen gleichermaßen für den Einsatz in elektrischen Maschinen geeignet sind. Während Systeme mit ungerader Strangzahl aufgrund der symmetrischen Strangverteilung vergleichsweise einfach umzusetzen sind, sind Systeme gerader Strangzahl nur in bestimmten Ausführungen zielführend einsetzbar. Gegenstand vieler Untersuchungen sind insbesondere sechssträngige Maschinen, die aus zwei dreisträngigen Teilsystemen gebildet werden [7, 8]. Wicklungssysteme gerader Strangzahl ohne ungeradzahligem Teiler haben aufgrund der beschriebenen Nachteile nur eine untergeordnete Bedeutung. Für eine möglichst hohe Flexibilität hinsichtlich Strangverteilung und Verschaltungsoptionen sind Systeme ungerader Strangzahl mit mehreren ungeradzahligem Teilern vorteilhaft. Diese Systeme können sowohl symmetrisch als auch asymmetrisch angeordnet und in einem oder mehreren Teilsystemen verschaltet werden.

2.2 Argumente für den Einsatz von Mehrphasensystemen und höheren Strangzahlen

Die Bedeutung von Mehrphasensystemen ist mit der zunehmenden Elektrifizierung von Antrieben in Schiffs-, Fahrzeug- und Flugzeuganwendungen gewachsen [9]. Insbesondere in den vergangenen zehn bis zwanzig Jahren sind daher eine Vielzahl von Veröffentlichungen zu dem Thema erschienen, die verschiedenste Argumente und Anwendungsbeispiele von Mehrphasensystemen beleuchten. Nachfolgend soll eine Übersicht über bekannte Vorteile und Einsatzgebiete der Mehrphasigkeit gegeben werden. Aufgrund der Vielzahl an Argumenten ist vorab eine vereinfachte Einteilung in die Kategorien *elektrische Maschine* sowie *Wechselrichter und System* vorgenommen worden. Aufgrund von Überschneidungen beider Kategorien ist die Einteilung nicht immer eindeutig, sodass bestimmte Argumente auch Gültigkeit in der jeweils anderen Kategorie haben.

2.2.1 Elektrische Maschine

Nach der Definition in Abschnitt 2.1 lassen sich Eigenschaftsänderungen in der elektrischen Maschine aufgrund der Mehrphasigkeit auf eine angepasste Wicklungsausführung zurückführen. Während an dieser Stelle eine Kurzübersicht gegeben wird, erfolgt in Kapitel 4 eine systematische Untersuchung hinsichtlich der Strangzahl am Beispiel der permanentmagneterregten Synchronmaschine.

Reduziertes Oberwellenspektrum und erhöhter Wirkungsgrad

Ein Hauptargument für die Nutzung von elektrischen Maschinen mit Strangzahlen größer als drei ist das reduzierte Oberwellenspektrum der Felderreggerkurve. Aufgrund der Wicklungsverteilung können mit Erhöhung der Strangzahl bestimmte Wicklungsoberwellen im Luftspaltfeld unterdrückt werden, die bei einer dreisträngigen Wicklungsausführung wirksam sind. Die Oberwellenanteile verschieben sich für Ganzlochwicklungen mit Erhöhung der Strangzahl zu höheren Ordnungen und kleineren Amplituden [10, 11]. Verlustanteile aufgrund harmonischer Statorfeldanteile sowie zusätzliche Geräuschabstrahlungen werden reduziert, der Wirkungsgrad und das NVH-Verhalten (Noise-Vibration-Harshness) werden verbessert [12].

Des Weiteren kann durch das reduzierte Oberwellenspektrum die Drehmomentwelligkeit in mehrsträngigen Maschinen beeinflusst werden. Die kleinste Ordnung des lastabhängigen Pulsationsmoments in einer m -strängigen Maschine mit Ganzlochwicklung wird durch die zeitlichen Stromharmonischen der Ordnungen $2m \pm 1$ bestimmt und beträgt $2m$. Mit steigender Strangzahl m erhöhen sich somit die Frequenzen der lastabhängigen Pulsationsmomente. [9, 13]

Drehmomenterhöhung durch Einprägen von Stromüberschwingungen

In vielen heutigen Anwendungen wird besonderer Wert darauf gelegt, die elektrische Maschine mit möglichst ideal sinusförmigen Strömen und somit möglichst geringem Oberschwingungsgehalt zu speisen. Dadurch können zusätzliche Oberwellen im Luftspalt der elektrischen Maschine begrenzt und Zusatzverluste oder Geräuschabstrahlungen verringert werden. In mehrsträngigen Maschinen kann es unter bestimmten Randbedingungen jedoch zielführend sein, bestimmte Harmonische im Strom einzuprägen, um einen zusätzlichen Drehmomentgewinn herbeizuführen [11]. Da ungerade Harmonische mit Ordnungen kleiner als der Phasenzahl in ein von der Grundschwingung unabhängiges Koordinatensystem transformiert werden können, ist eine unabhängige Regelbarkeit von Grund- und Oberschwingungen gegeben, wie auch im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen wird.

Stromüberschwingungen ungerader Ordnung und kleiner der Phasenzahl können in mehrphasigen Maschinen somit genutzt werden, um einen Beitrag zum mittleren Drehmoment zu leisten [14, 15]. Dies ist dann möglich, wenn die Stromüberschwingungen mit den entsprechenden Feldwellen gleicher Ordnung zusammenwirken. Im Falle einer permanentmagneterregten Synchronmaschine ist zusätzlich die Magnetstruktur von entscheidender Bedeutung, da entsprechende harmonische Anteile im Magnetfluss benötigt werden [16, 17]. In [15] ist am Beispiel einer fünfphasigen Maschine das Einprägen einer Stromüberschwingung dritter Ordnung gezeigt, die einen zusätzlichen Beitrag von 5 % zum mittleren Drehmoment leistet. Zusammenfassend kann der Vorteil dahingehend beschrieben werden, dass eine erhöhte Drehmomentdichte mit bekannten Regelverfahren dargestellt werden kann.

Phasenreduzierter Betrieb im Fehlerfall und Fehlertoleranz

Ein wichtiges Argument für den Einsatz mehrphasiger Maschinen ist die Möglichkeit des phasenreduzierten Betriebs nach dem Ausfall von Wicklungssträngen [9, 18]. Diese Eigenschaft macht mehrphasige Antriebe insbesondere für Anwendungen interessant, die eine hohe Verfügbarkeit bzw. hohe Fehlertoleranz einfordern, wie es in Anwendungen der Luftfahrt, Fahrzeugtechnik oder Energieversorgung gegeben ist. Insbesondere in diesen Bereichen können mehrphasige Antriebe eine Ergänzung zu bekannten Redundanzkonzepten darstellen.

Während in dreiphasigen Drehstrommaschinen mit isoliertem Sternpunkt der Ausfall eines Wicklungsstrangs nicht kompensiert werden kann, können elektrische Maschinen mit mehr als drei Wicklungssträngen bei Ausfall von Phasenleitern mit eingeschränkter Leistung weiterbetrieben werden. Um den Ausfall einzelner Wicklungsstränge kompensieren zu können, werden allerdings zum Teil aufwändige *Post-Fault*-Strategien benötigt, die unter Anpassung der Regelung einen fortgeführten Betrieb der verbliebenen Stränge sicherstellen. Eine Übersicht über verschiedene *Post-Fault*-Strategien ist in [11] gegeben. Im einfachsten Fall können in Mehrphasensystemen mit mehreren eigenständigen Teilsystemen komplette Teilsysteme der Maschine abgeschaltet werden. Die Leistung reduziert sich durch den Wegfall aller Stränge eines Teilsystems allerdings deutlicher als bei Abschaltung eines einzelnen, fehlerhaften Wicklungsstrangs.