



Julian Christoph Berlinecke (Autor)
**Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit
permanentmagneterregten Synchronmaschinen in automobiler
Anwendung**

Julian C. Berlinecke

Mehrphasige elektrische Antriebssysteme mit
permanentmagneterregten Synchronmaschinen
in automobiler Anwendung



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8311>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

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.

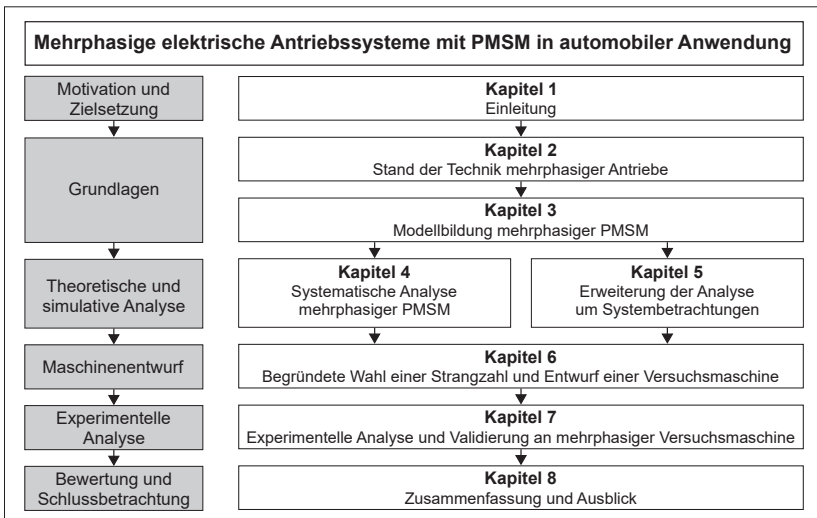


Abbildung 1.1: Strukturbild zum Aufbau der Arbeit

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 zusammengeschalteten 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.

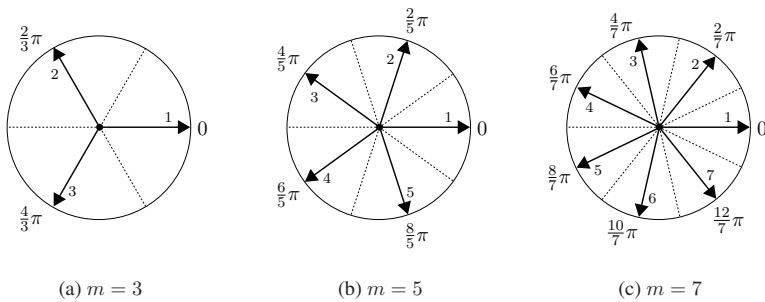


Abbildung 2.1: Mehrphasensysteme bei ungerader Strangzahl

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.

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

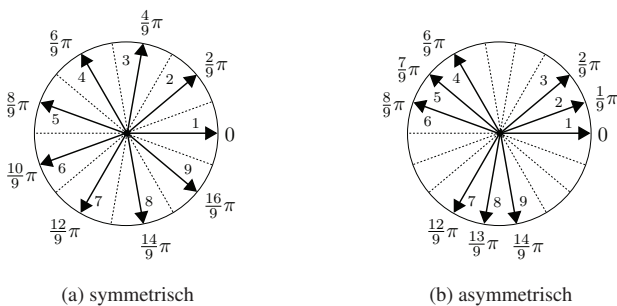


Abbildung 2.2: Symmetrisches und asymmetrisches Mehrphasensystem bei Strangzahl $m = 9$

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.

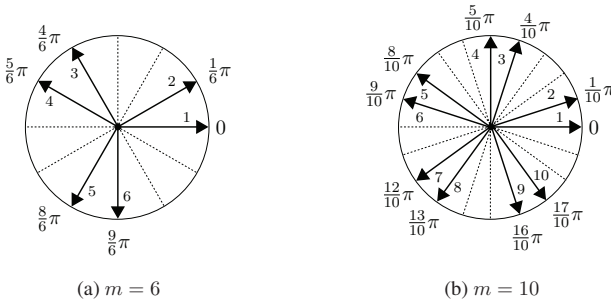


Abbildung 2.3: Mehrphasensysteme bei gerader Strangzahl mit ungeradzahligem Teiler

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]

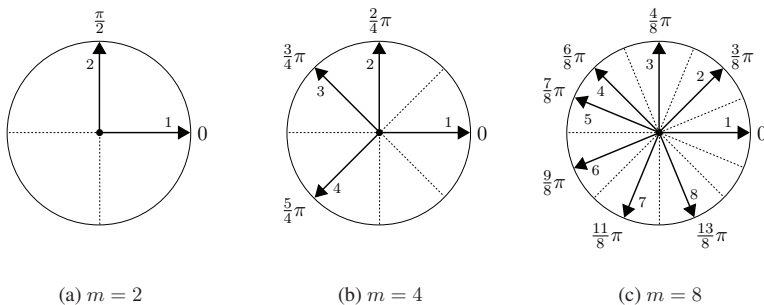


Abbildung 2.4: Mehrphasensysteme bei gerader Strangzahl ohne ungeradzahligem Teiler

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 Stromberschwingungen

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.

Stromberschwingungen 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 Stromberschwingungen 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 Stromberschwingung 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.

In [6, S. 141-155] ist der phasenreduzierte Betrieb am Beispiel einer sechsphasigen permanentmagneterregten Synchronmaschine mit zwei dreiphasigen Teilsystemen gezeigt. In [19] wird der fehlertolerante Betrieb einer sechsphasigen Maschine bei unabhängiger Phasensteuerung mit Vollbrückenschaltungen beschrieben.

Mehrphasige Multi-Motoren-Konzepte

Eine weitere Möglichkeit, Freiheitsgrade mehrphasiger Systeme zu nutzen, besteht darin, mehrere Maschinen als Multi-Motor-System über nur einen gemeinsamen Spannungswechselrichter zu betreiben und unabhängig voneinander zu regeln [9, 20]. Bauraum und Kosten eines zusätzlichen Umrichters bzw. zusätzlicher Halbbrückenelemente können dadurch eingespart werden. Bei bekannten dreiphasigen Antriebssystemen, in denen mehrere elektrische Maschinen eingesetzt werden, erfolgt der Betrieb der einzelnen Maschinen jeweils über einen eigenen Spannungswechselrichter und mittels eigener Regelung. Der Betrieb eines dreiphasigen Multi-Motor-Systems mit ausschließlich einem dreiphasigen Umrichter und unter Anwendung der bekannten Vektorregelung beschränkt sich auf Anwendungen, in denen die Maschinen jeweils gleiche Drehzahl und gleichen Lastzustand haben. Eine unabhängige Regelung mehrerer elektrischer Maschinen bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lastzuständen an nur einem dreiphasigen Spannungswechselrichter ist nach diesem Prinzip nicht möglich [20].

In Multi-Motor-Antrieben, in denen elektrische Maschinen mit mindestens fünf Wicklungssträngen eingesetzt werden, kann diese Einschränkung zum Teil aufgehoben werden. Unter Anwendung mehrphasiger Koordinatentransformation können mehrere zweidimensionale Systeme gebildet werden, in denen jeweils eine elektrische Maschine eines Multi-Motor-Antriebs geregelt werden kann [21]. Die Statorwicklungen der elektrischen Maschinen in Multi-Motor-Systemen werden dazu in Serie geschaltet und die Wicklungsstränge so miteinander verbunden, dass die Ströme eines Systems und somit einer elektrischen Maschine weder fluss- noch drehmomentbildend in der jeweils anderen Maschine sind. Der Betrieb über einen gemeinsamen Spannungswechselrichter ist für verschiedene Strangzahlen möglich, beschränkt sich allerdings auf Maschinen mit verteilter Wicklung und sinusförmiger Feldverteilung. Nachteilig an Multi-Motoren-Konzepten sind der zusätzliche Aufwand für Wicklungsausführungen und die geringeren Wirkungsgrade solcher Systeme. [20]

2.2.2 Wechselrichter und System

Zusätzlich zu den Vorteilen in der elektrischen Maschine können systemische Vorteile erzielt werden, die auf die erhöhte Anzahl an Wicklungssträngen und die Verwendung zusätzlicher Schaltelemente sowie angepasster Schaltverfahren zurückzuführen sind. Des Weiteren können durch geometrische Anordnung oder alternative Nutzung von Umrichter- oder Leiterstrukturen weitere Freiheitsgrade geschaffen werden, die nachfolgend beschrieben werden.

Leistungssteigerung durch Stromaufteilung

In den Anfängen des 20. Jahrhunderts begründete sich der Einsatz mehrphasiger Systeme durch die Möglichkeit der Aufteilung des Strangstroms auf mehrere Stränge und mehrere Schaltelemente. Durch Aufteilung des Stroms auf mehrere Stränge kann bei erhöhter Anzahl an Schaltelementen die Strombelastung des einzelnen Schalters bei gleicher Systemleistung reduziert werden. In der Literatur wird von einem *current split* gesprochen [22].

In [1] begründet sich der Einsatz eines Generators mit asymmetrischer sechsphasiger Wicklung über das begrenzte Stromabschaltvermögen der eingesetzten Schaltelemente. In [23] kann die Leistung des Systems bei begrenzter Stromtragfähigkeit der Halbleiterschalter durch Aufteilung auf mehrere Schaltelemente gesteigert werden. Gleiches gilt in [24] am Beispiel von sechsphasigen permanentmagneterregten Synchronmaschinen, die als Generatoren in Windkraftanlagen genutzt werden. Aufgrund hoher darzustellender Leistungen von einigen Megawatt können bei festgelegtem Spannungsniveau die Strangströme begrenzt werden. Ein neues Antriebskonzept, das mit Systemspannungen kleiner als 60 V auskommt, ist in [25] und [26] gezeigt. Trotz reduzierter Batteriespannung können bei unabhängiger Ansteuerung von sechzig Strängen und entsprechend angepassten Strangströmen ausreichend hohe Systemleistungen erreicht werden. Die zuvor beschriebene Aufteilung des Strangstroms ist jedoch auch durch Parallelschaltung von Schaltelementen möglich.

Bauraumintegrierte Wechselrichter

Ein weiterer Vorteil, der sich bei Aufteilung des Stroms auf mehrere Schaltelemente ergibt, ist die zusätzliche Variabilität hinsichtlich eines motorintegrierten Wechselrichters. Durch die Stromaufteilung können mehrere Umrichtereinheiten eingesetzt werden, die sich aufgrund kleinerer geometrischer Abmessungen leichter in zur Verfügung stehende Bauräume integrieren lassen. Die Motorintegration leistungselektronischer Baugruppen ermöglicht insbesondere in Anwendungen mit begrenzten oder vordefinierten Bauräumen, wie sie beispielsweise in Hybridfahrzeugen gegeben sind, eine effiziente Nutzung vorhandener Volumina [22]. In [27] ist der Wechselrichter axial an eine neunphasige Synchronmaschine mit Ferritmagneten anintegriert. Durch Nutzung eines gemeinsamen Gehäuses für E-Maschine, Wechselrichter und Getriebe können Schnittstellen eingespart und Leitungslängen reduziert werden. In [28] und [29] ist eine sechsphasige Maschine mit intelligenter Einzelzahnsteuerung umgesetzt, bei der jeder Motorstrang direkt und ohne zusätzliche elektrische Leitungen mit einer am Statorzahn befindlichen Leistungselektronik angesteuert wird. Durch den Wegfall von Schnittstellen und Leitungen können die Systemleistungsdichte gesteigert, Kosten reduziert und elektromagnetische Störungen aufgrund langer Leitungen verringert werden. Das Nutzen weiterer Synergieeffekte in hochintegrierten Antrieben, z. B. durch gemeinsame und optimierte Kühlkreisläufe von Leistungselektronik und E-Maschine, ist ebenso möglich.

Reduzierte Belastung des Zwischenkreiskondensators

Für die Auslegung und Dimensionierung eines Zwischenkreiskondensators, wie er zur Spannungshaltung in Spannungswechselrichtern eingesetzt wird, ist die effektive Wechselstrombelastung von entscheidender Bedeutung. Die effektive Wechselstrombelastung bestimmt maßgeblich die Verlustleistung und die Lebensdauer des Bauteils [30] sowie die für die Anwendung benötigte Kapazität und somit die Bauteilgröße.

Durch Erhöhen der Strangzahl und den dadurch begründeten Einsatz angepasster Ansteuerverfahren können harmonische Anteile im Zwischenkreisstrom [31] bzw. die effektive Kondensatorstrombelastung [32] reduziert werden. In [32] wird gezeigt, dass bei Sinusmodulation eines m -phasigen Zweipunkt-Spannungswechselrichters die effektive Strombelastung bei gleicher Ausgangsleistung mit steigender Strangzahl m abnimmt. In [33] wird die effektive Kondensatorwechselstrombelastung für eine sechsphasige Last mit zwei isolierten Sternpunkten analytisch nachgewiesen. Weitere Strategien, die Kondensatorbelastung zu reduzieren, ergeben