

Heinz Schäfer (Hrsg.)
und 96 Mitautoren

Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Das kostenoptimale elektrische
Antriebssystem, mitentscheidend
für den Markterfolg

Mit 407 Bildern und 37 Tabellen



HAUS DER TECHNIK

Außeninstitut der RWTH Aachen
Kooperationspartner der Universitäten Duisburg-Essen
Münster · Bonn · Braunschweig

expert  verlag®

Permanentmagneterregter Traktionsantrieb für ein Elektrofahrzeug: Bauraum, Wirkungsgrad und Kosten – das Auslegungsdreieck

Marco Hombitzer, David Franck, Georg von Pfingsten und Kay Hameyer

Abstract

The basic demands of an electric drive-train are a high efficiency, a small installation space and low costs. When designing the drive-train they cannot be regarded without affecting each other. The fundamental relationships between these demands are shown. A design methodology for permanent excited synchronous machines is presented to solve this conflict.

Kurzfassung

Die grundlegenden Anforderungen an einen elektrischen Antriebsstrang sowie dessen Komponenten sind ein hoher Wirkungsgrad, ein geringer Bauraumbedarf sowie geringe Kosten. Eine voneinander getrennte Betrachtung dieser Aspekte bei der Auslegung kann nicht erfolgen, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine wird eine Entwurfsmethodik zur Lösung dieses Konflikts vorgestellt.

1. Einleitung

Durch wachsendes Verkehrsaufkommen nehmen die Belastungen für Mensch und Umwelt durch Lärm- und Schadstoffemissionen weiter zu. Steigendes Umweltbewusstsein und die Ressourcenknappheit fossiler Brennstoffe rücken alternativ angetriebene Fahrzeuge zusehends in den Mittelpunkt von Politik, Forschung und Entwicklung. Da eine Reduzierung des Verkehrsaufkommens nur eingeschränkt realisierbar ist, müssen andere Wege gefunden werden diese Problematik zu lösen. So müssen effizientere Fahrzeuge entwickelt werden, die sich durch geringere Schadstoffemissionen im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen auszeichnen, ohne dass deren gewohnter Komfort und Fahrspaß verloren gehen.

Elektrofahrzeuge stellen eine aussichtsreiche Möglichkeit dar dieser Problematik zu begegnen. Ein Thema, das der breiten Akzeptanz von Elektrofahrzeugen derzeit noch im Wege steht, ist die im Vergleich zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen deutlich reduzierte Reichweite. Um die Reichweite zu erhöhen und den Energiebedarf des Fahrzeugs zu senken, werden vielfältige Ansprüche an die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs gestellt. Es reicht jedoch nicht aus die Einzelkomponenten des Antriebsstrangs zu optimieren, da dies nicht zwangsläufig zu einem

vorteilhaften Verhalten des Gesamtsystems führt. Somit muss der Fokus bei der Entwicklung stets auf dem gesamten Antriebsstrang liegen.

Die Anforderungen an den Antriebsstrang sind vielfältig und unterscheiden sich je nach Fahrzeug und dessen Anforderungsprofil. Das Ziel bei der Antriebsauslegung ist die Erfüllung möglichst aller an ihn gestellten Anforderungen. Diese können im Rahmen der Auslegung jedoch nicht separat voneinander betrachtet werden, da sie unter gegenseitiger Beeinflussung stehen. Hierdurch entsteht ein Zielkonflikt, den es zu lösen gilt. Im Folgenden werden die hauptsächlichen Anforderungen an einen elektrischen Traktionsmotor erläutert. Ihre grundlegenden Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu weiteren Antriebsstrangkomponenten wie Batterie, Leistungselektronik, Kühlung und Getriebe werden dargestellt und der Konflikt bei der Auslegung verdeutlicht. Anschließend wird am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) eines elektrischen Sportwagenantriebs, die im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojektes „e-generation“ entwickelt wurde, eine Auslegungsmethodik zur Lösung dieses Konfliktes vorgestellt.

2. Hauptanforderungen an einen Traktionsantrieb

An die Traktionsmaschine eines elektrischen Antriebsstrangs werden umfangreiche Anforderungen gestellt. Um eine hohe Reichweite des Fahrzeugs zu erreichen, muss die Antriebsmaschine leicht sein und möglichst kompakte Abmessungen besitzen. Zudem ist der im Fahrzeug zur Verfügung stehende Bauraum limitiert. Dies führt somit insgesamt zur Forderung einer hohen Leistungsdichte. Die Leistungsdichte einer elektrischen Maschine kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden, da mit zunehmender Leistungsdichte auch die Verlustleistungsdichte ansteigt. Damit führt die maximal abführbare Verlustleistung zu einer thermischen Auslegungsgrenze.

Zur Reduzierung der Verlustleistung und der effizienten Verwendung der in den Batterien gespeicherten elektrischen Energie muss die Maschine einen sehr hohen Wirkungsgrad besitzen. Elektrische Maschinen in Traktionsantrieben werden im Vergleich zu vielen industriellen Einsätzen nicht nur in einem Arbeitspunkt betrieben. Daher ist für die Traktionsmaschine nicht der maximal erreichbare Wirkungsgrad entscheidend, sondern der gemittelte Wirkungsgrad über eine typische Fahrt.

Derzeit sind aus Kundenperspektive Elektrofahrzeuge noch deutlich teurer als konventionell angetriebene Fahrzeuge, was ein weiterer Aspekt ist, der dem Durchbruch der Elektromobilität aktuell noch im Wege steht. Die Kosten für die elektrische Traktionsmaschine an den Gesamtkosten eines elektrischen Antriebsstrangs inklusive Batterie liegen bei 5 % bis 20 %. Somit ist die Reduzierung der Kosten der Maschine ein lohnenswerter Ansatz auf dem Weg die Gesamtkosten des Antriebsstrangs weiter zu senken [1]. Dabei müssen sowohl Materialkosten als auch Fertigungskosten betrachtet werden.

3. Das Auslegungsdreieck

Die in Bild 1 dargestellten wesentlichen Anforderungen gelten für den gesamten Antriebsstrang sowie dessen Einzelkomponenten und werden anhand der elektrischen Maschine detailliert betrachtet.

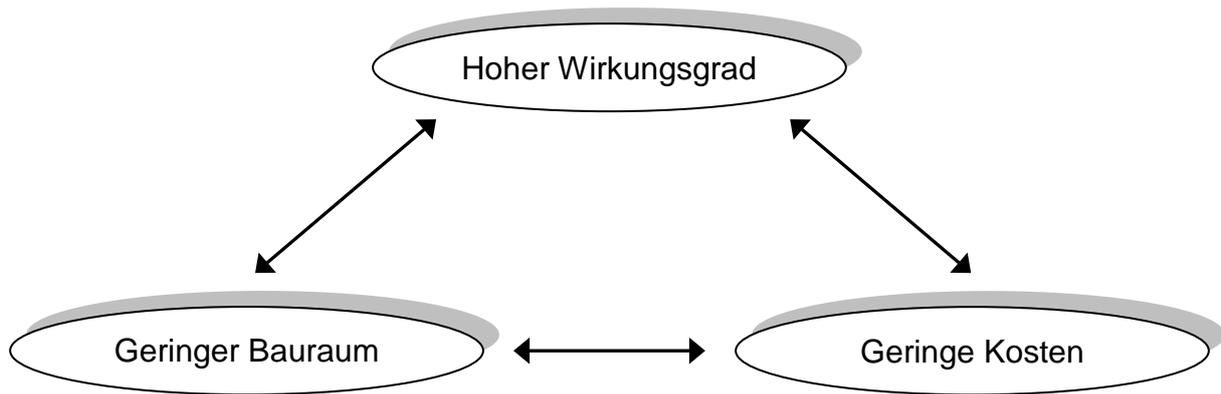


Bild 1: Bauraum, Wirkungsgrad und Kosten – das Auslegungsdreieck.

Das Ziel bei der Auslegung einer elektrischen Maschine für einen Traktionsantrieb ist die Entwicklung einer Maschine, welche die gestellte Leistungsanforderung unter Beachtung der Anforderungen der drei Aspekte des Auslegungsdreiecks erreicht. Die grundlegenden Zusammenhänge dieser drei Aspekte werden im Folgenden am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine erläutert. Als Ausgangspunkt wird dabei das Ziel gewählt, einen möglichst hohen Wirkungsgrad der Maschine zu erreichen. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, müssen die auftretenden Verluste reduziert werden. Betrachtet werden Ohm'sche Verluste in der Statorwicklung, Eisenverluste in Stator- und Rotorblech sowie Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten des Rotors.

3.1 Ohm'sche Verluste

Die Verluste in der Statorwicklung steigen mit dem Wicklungswiderstand sowie dem Quadrat des Leiterstroms. Somit bilden Strom und Widerstand Ansatzpunkte die Kupferverluste zu reduzieren.

3.1.1 Leiterstrom

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Strombedarf der Maschine zu beeinflussen. So ist die Höhe des Stroms zum einen von der ausgewählten Spannungsebene abhängig. Eine davon ist die Ausführung der Statorwicklung. Für die Drehmomentbildung ist vor allem die Grundwelle der von der Wicklung erzeugten Drehdurchflutung von Nutzen. Daher sollte die Wicklung eine hohe Grundwelle erzeugen und möglichst geringe Oberwellen. Um die für ein bestimmtes Drehmoment benötigte Grundwelle der Durchflutung möglichst verlustarm und somit mit möglichst geringem Strom zu erzeugen, muss eine Wicklung mit hohem Wicklungsfaktor der Grundwelle gewählt werden. Eine Einschränkung der Auswahlmöglichkeit der Wicklung ergibt sich zum einen durch eine bereits festgelegte Polpaarzahl. Zum anderen kann bei einem bestimmten Statordurchmesser aus geometrischen Gründen nur eine gewisse maximale Anzahl an Statorzähnen sinnvoll umgesetzt werden, so dass auch hierdurch die zur Auswahl stehenden Kombinationen aus Polpaarzahl und Lochzahl begrenzt werden.

Um die Maschine optimal auszunutzen ist darauf zu achten, dass im späteren Betrieb im Grunddrehzahlbereich mit einer Regelung auf maximales Moment pro Ampere betrieben wird [2]. Das heißt das angeforderte Drehmoment wird mit dem kleinsten Strom gestellt, mit dem dieses Drehmoment erreicht werden kann. Andernfalls würden unnötige Wicklungsverluste erzeugt oder die Maschine müsste unter Einhaltung einer maximalen Stromgrenze überdimensioniert werden. Dies würde zu einem erhöhten Bauraum und einer verringerten Leistungsdichte führen.

3.1.2 Wicklungswiderstand

Maßnahmen zur Verkleinerung des Wicklungswiderstands können ebenfalls zur Reduzierung der Ohm'schen Verluste beitragen. Der Wicklungswiderstand hängt ab von dem spezifischen Widerstand des Leitermaterials, der mittleren Windungslänge sowie der Querschnittsfläche des Leiters.

Aus einer gezielten Materialauswahl ergibt sich der spezifische elektrische Widerstand. Bei der Auswahl eines geeigneten Materials muss ein Kompromiss hinsichtlich spezifischem Widerstand, Dichte und Rohstoffpreis getroffen werden. So könnte durch die Auswahl einer Silberwicklung der Widerstand im Vergleich zu einer Kupferwicklung zwar um 5,7 % reduziert werden, allerdings stehen dem die immensen Mehrkosten von Silber entgegen. Typischerweise wird in Statorwicklungen elektrischer Maschinen Kupfer eingesetzt.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Reduzierung der mittleren Windungslänge. Die mittlere Windungslänge setzt sich zusammen aus der Wicklungslänge in der Statornut, die der Länge der Aktivteile entspricht, sowie der Länge der Leiter im Wickelkopf der Maschine. Der Anteil des Kupfers im Wickelkopf trägt nicht zur Drehmomentbildung bei, sondern steigert die Ohm'schen Verluste. Die Wickelköpfe einer Einzelzahnwicklung sind kleiner als die einer verteilten Wicklung, siehe Bild 2. Somit fällt bei Verwendung einer Einzelzahnwicklung bei konstanter aktiver Länge die Gesamtlänge der Maschine kleiner aus und die Ohm'schen Verluste werden verringert. Bei gleichbleibender Gesamtlänge der Maschine kann bei gleichem Volumen eine größere aktive Länge verbaut werden. In beiden Fällen wird die Leistungsdichte der Maschine gesteigert. Zudem wird die Wickelkopflänge kleiner bei steigender Polpaarzahl, so dass hierdurch ebenfalls eine Erhöhung der Leistungsdichte erreicht werden kann. Durch hohe Polpaarzahlen können höhere Drehmomente erreicht werden, jedoch steigen Eisen- und Magnetverluste überproportional mit der Polpaarzahl.

Vergrößert man den Leiterquerschnitt, wird der Wicklungswiderstand reduziert. Somit wird mehr Platz für die Wicklung im Stator benötigt, der Nutquerschnitt muss steigen und somit auch der Gesamtquerschnitt des Stators. Durch diese Maßnahme wird nicht nur die Leistungsdichte der Maschine reduziert, sondern durch den erhöhten Materialaufwand für Kupfer und Elektroblech auch die Kosten gesteigert. Zudem werden die magnetischen Pfade im Stator länger, was zu einer Erhöhung der Eisenverluste führt. Aus thermischer Sicht wird bei Vergrößerung des Nutquerschnitts die Abfuhr der Verluste durch die größere Kontaktfläche von Wicklung und Statorblech verbessert. Zudem steigt die Kontaktfläche an der Außenseite des Stators zum Kühlmantel.

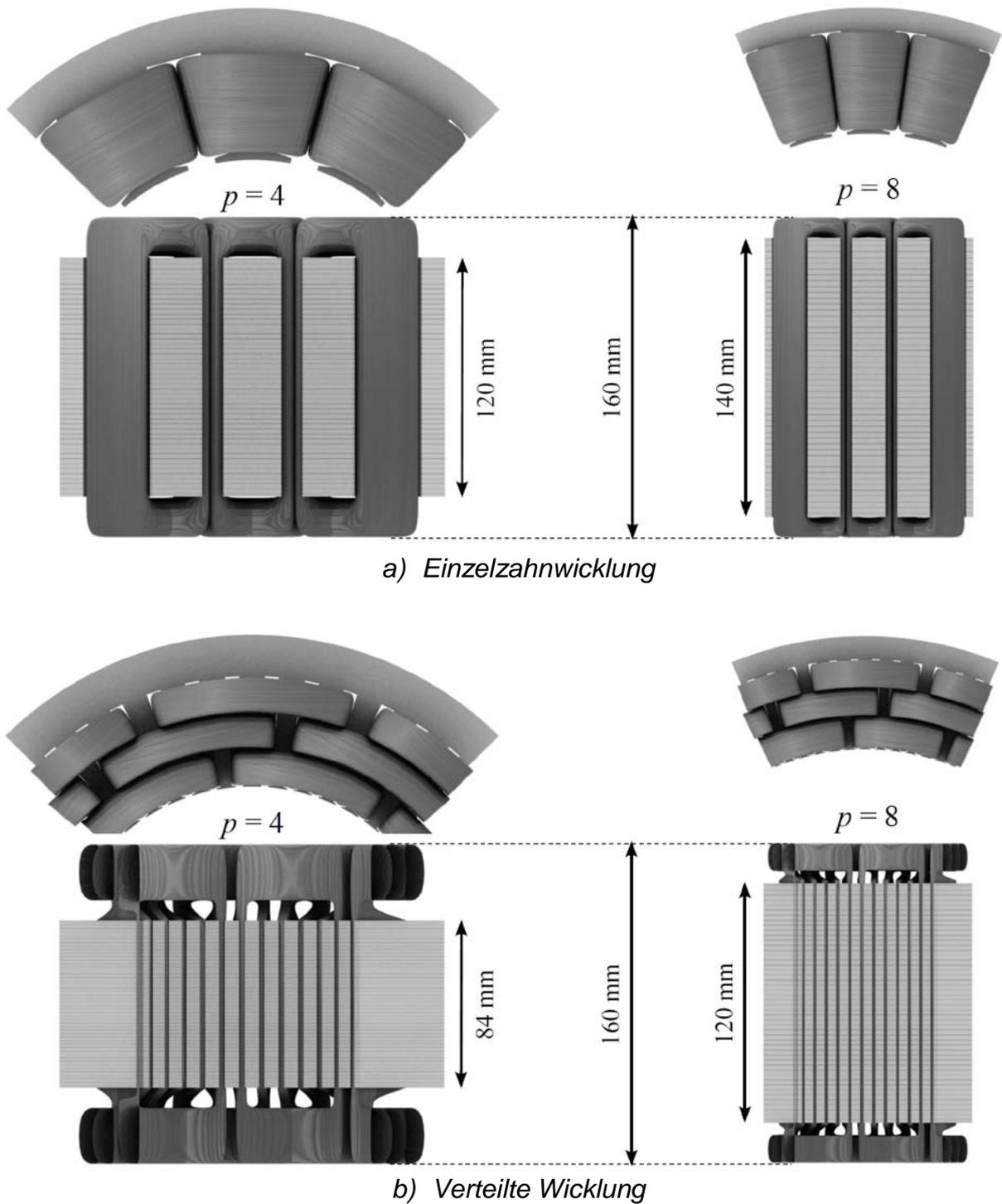


Bild 2: Einfluss der Polpaarzahl und Wicklungsart auf die Wickelkopflänge.

3.2 Eisenverluste

Die Eisenverluste bilden abhängig vom Betriebspunkt einen signifikanten Anteil an den Gesamtverlusten. Sie setzen sich zusammen aus Hystereseverlusten, Wirbelstromverlusten und Zusatzverlusten [3, 4, 5].

Beeinflusst werden sie durch die auftretenden elektrischen Frequenzen, Materialeigenschaften des ausgewählten Elektroblechs sowie der geometrischen Gestaltung des Eisenkreises.

3.2.1 Elektrische Frequenz

Eisenverluste steigen überproportional mit der elektrischen Frequenz und somit dem Produkt aus Drehzahl und Polpaarzahl: $f_{el} = n \cdot p$.

Die Maschinendrehzahl hat maßgeblichen Einfluss auf den Bauraum der Maschine. Wenn die geforderte Leistung mittels hohen Drehzahlen erzielt wird, sinkt dementsprechend das dafür benötigte Drehmoment und somit das Volumen der Maschine. Demzufolge steigt der Bauraumbedarf, wenn die Drehzahl gering ist und die geforderte Leistung über ein hohes Drehmoment erreicht werden muss.

Mit kleiner werdender Polpaarzahl ergeben sich Nachteile in Rotor und Stator. Sinkt die Polpaarzahl, so wachsen bei unveränderter Polbedeckung die Abmessungen der einzelnen Magnete. Aufgrund der damit einhergehenden gestiegenen Magnetmasse steigt die Fliehkraftbelastung und die Eisenstege im Rotor müssen dicker ausgeführt werden um die mechanische Festigkeit weiterhin zu gewährleisten. Durch die dickeren Stege erhöht sich der Streufluss der Magnete und es steht weniger Nutzfluss im Luftspalt zur Drehmomentbildung zur Verfügung. Die Ausnutzung des in den Rotor eingebrachten Magnetmaterials sinkt und die Leistungsdichte der Maschine wird reduziert. Um dem entgegenzuwirken und den Nutzfluss wieder anzuheben, müsste mehr Magnetmaterial in der Maschine verbaut werden, was eine Zunahme der Materialkosten bedeuten würde. Im Stator sorgt eine kleiner werdende Polpaarzahl, wie beschrieben, für größere Wickelköpfe und höhere Ohm'sche Verluste in der Statorwicklung.

3.2.2 Materialauswahl

Durch eine gezielte Auswahl der weichmagnetischen Materialien für Stator und Rotor können die auftretenden Eisenverluste beeinflusst werden. Durch unterschiedliche Legierungszusammensetzungen können verschiedene Blechqualitäten hergestellt werden, die sich in der Höhe der spezifischen Eisenverluste sowie ihrem Magnetisierungsverhalten in verschiedenen Frequenzbereichen voneinander unterscheiden. Neben der Zusammensetzung der Legierung haben auch die Blechdicke durch ihren Einfluss auf die Verringerung der Wirbelstromverluste sowie die Blechverarbeitung eine große Bedeutung. Mit verlustarmen Blechen geringer Dicke, wie beispielsweise NO10, kann der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen signifikant gesteigert werden. Jedoch sind deutliche Preisunterschiede zu Standardblechen, zum Beispiel M270-35A, festzustellen. Des Weiteren erfordert die geringe Blechdicke eine deutlich höhere Anzahl an Einzelblechen, um eine identische Paketlänge zu erreichen. Im angegebenen Beispiel sind beim Einsatz von NO10 um den Faktor 3,5 mehr Einzelbleche notwendig. Die Sensitivere Handhabung der Bleche führt zu einem teureren Fertigungsverfahren. Der erhöhte Fertigungsaufwand bei der Paketierung der Aktivteile schlägt sich zusätzlich negativ auf die Kosten nieder.

3.3.3 Geometrie des Eisenkreises

Auch die Geometrie des Eisenkreises beeinflusst die Höhe der auftretenden Eisenverluste. Um den magnetischen Widerstand zu verringern, sollten die magnetischen Weglängen möglichst kurz sein. Eine mögliche Maßnahme die magnetische Weglänge im Stator zu verkleinern wäre eine Verringerung der Höhe der Statorzähne. Dies hätte einen sinkenden Statoraußendurchmesser und eine kleinere Querschnittsfläche der Nut zur Folge. Die Stromdichte in der Nut und somit in den Leitern würde dementsprechend steigen. In Folge dessen würde der Wicklungswiderstand und somit die Ohm'schen Verluste wachsen. Insgesamt würde also eine Verlagerung der Verluste aus dem Statorblech in die Wicklung erfolgen. Die thermische Belastung der Nut würde sich erhöhen, da neben den größeren Verlusten zudem eine kleinere Kontaktfläche zwischen Nut und Statorblech zur Abfuhr der Verlustwärme zur Verfügung stehen würde.

Neben der Länge des magnetischen Pfades hat auch der Querschnitt, in dem der magnetische Fluss geführt wird, einen Effekt auf die Höhe der erzeugten Eisenverluste. Bei geringerem Querschnitt steigt die Flussdichte und sorgt für höhere Eisenverluste, denn diese hängen überproportional von der Flussdichte ab. In der Literatur finden sich Richtlinien für maximale Flussdichten in den einzelnen Gebieten, die erfahrungsgemäß nicht überschritten werden sollten [6].

3.3 Permanentmagnetverluste

Die Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten werden hervorgerufen durch Flussdichteschwankungen innerhalb der Magnete. Ursachen sind die Rückwirkung des Statorfeldes sowie durch die Statorzähne hervorgerufene periodische Reluktanzschwankungen während der Drehung. Die Verluste steigen mit dem Laststrom der Maschine und quadratisch mit der Änderungsfrequenz der magnetischen Flussdichte.

Um die Ausbreitung der Wirbelströme zu erschweren und die Verluste zu reduzieren, können, analog zu der Blechung der Aktivteile, die Magnete in gegeneinander isolierte Magnetstücke unterteilt werden. Die Segmentierung kann in diesem Fall sowohl in tangentialer als in radialer Richtung erfolgen. Bild 3 zeigt beispielhaft die Verteilung der Wirbelstromdichte in Abhängigkeit der Segmentanzahl in axialer Richtung. Es gilt jedoch zu beachten, dass die aufgrund der Segmentierung angestiegene Anzahl an Einzelmagneten einen erhöhten Fertigungsaufwand und somit gesteigerte Fertigungskosten mit sich bringt.

Eine Auswirkung auf die Höhe der Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten hat auch die Auswahl der Rotortopologie. So hat sich gezeigt, dass für Rotortopologien mit Magneten auf der Oberfläche deutlich höhere Magnetverluste entstehen als in Topologien, in denen die Magnete im Rotor vergraben angeordnet sind. Der Grund hierfür liegt in der besseren Abschirmung der Magnete vor den Rückwirkungen des Statorfeldes, wenn die Magnete im Rotorblech vergraben sind.

Auch die Auswahl der Wicklung hat Auswirkungen auf die Höhe der Wirbelstromverluste in den Magneten. Die periodische Flussdichteänderung in den Magneten hängt stark von der Anzahl der Ständernuten ab. Mit steigender Nutzahl erhöht sich die Frequenz der Flussdichteschwankungen, ihre Amplitude verringert sich jedoch. Das bedeutet der Effekt der Abschirmung der Magnete überwiegt und die Wirbelstromverluste nehmen ab. Daher bewirkt eine verteilte Wicklung, aufgrund ihrer höheren

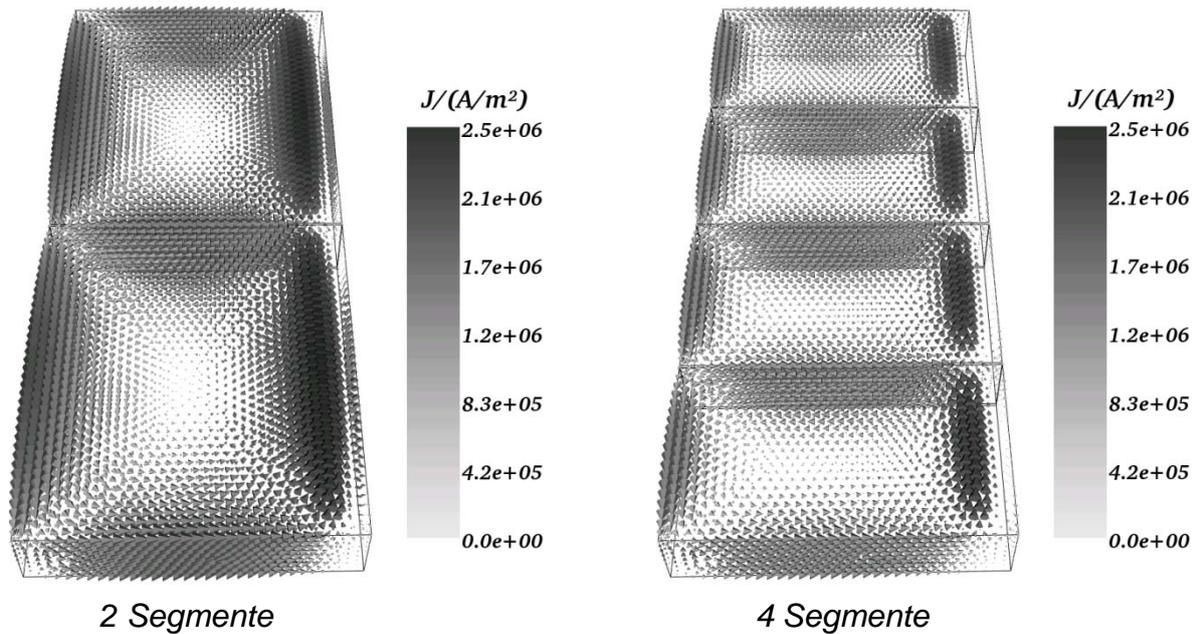


Bild 3: Einfluss der Segmentierung auf die Wirbelströme

Statorzahnzahl, geringere Wirbelstromverluste in den Magneten als eine Einzelzahnwicklung. Mit der Polpaarzahl steigt in der Regel auch die Anzahl an Statorzähnen. Steigende Wirbelstromverluste in den Magneten wären die Folge. Entgegen dieser Erwartung ist jedoch mit steigender Polpaarzahl kein deutlicher Einfluss auf die Magnetverluste zu beobachten. Die Ursache hierfür liegt in der Tatsache begründet, dass bei steigender Polpaarzahl die einzelnen Pole und somit auch die verbauten Magnete kleiner werden. Dies wirkt wie eine weitere Segmentierung der Magnete und trägt zur Reduzierung der Verluste bei.

4. Methodik zum Entwurf einer Traktionsmaschine

Die Betrachtung der grundlegenden Zusammenhänge und Abhängigkeiten der drei Aspekte des Auslegungsdreiecks hat gezeigt, dass die separate Berücksichtigung dieser Aspekte während der Auslegung ein hohes Konfliktpotential mit sich bringt und somit nicht zielführend ist. Im Rahmen des öffentlich geförderten Forschungsprojektes „e-generation“ wurde eine Methodik zur Lösung des Auslegungskonfliktes entwickelt und eine permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) eines elektrischen Sportwagenantriebs ausgelegt. Um eine hohe Leistungsdichte zu erzielen, den Bauraum sowie die Kosten zu reduzieren, wurde im vorliegenden Beispiel die maximale Maschinendrehzahl auf 18.000 min^{-1} festgelegt.

Der Ablauf der Auslegung ist in Bild 4 veranschaulicht. Die wesentlichen Schritte dieser Entwurfsmethodik werden im Folgenden erläutert. Eine detaillierte Vorstellung ist in [7] zu finden.

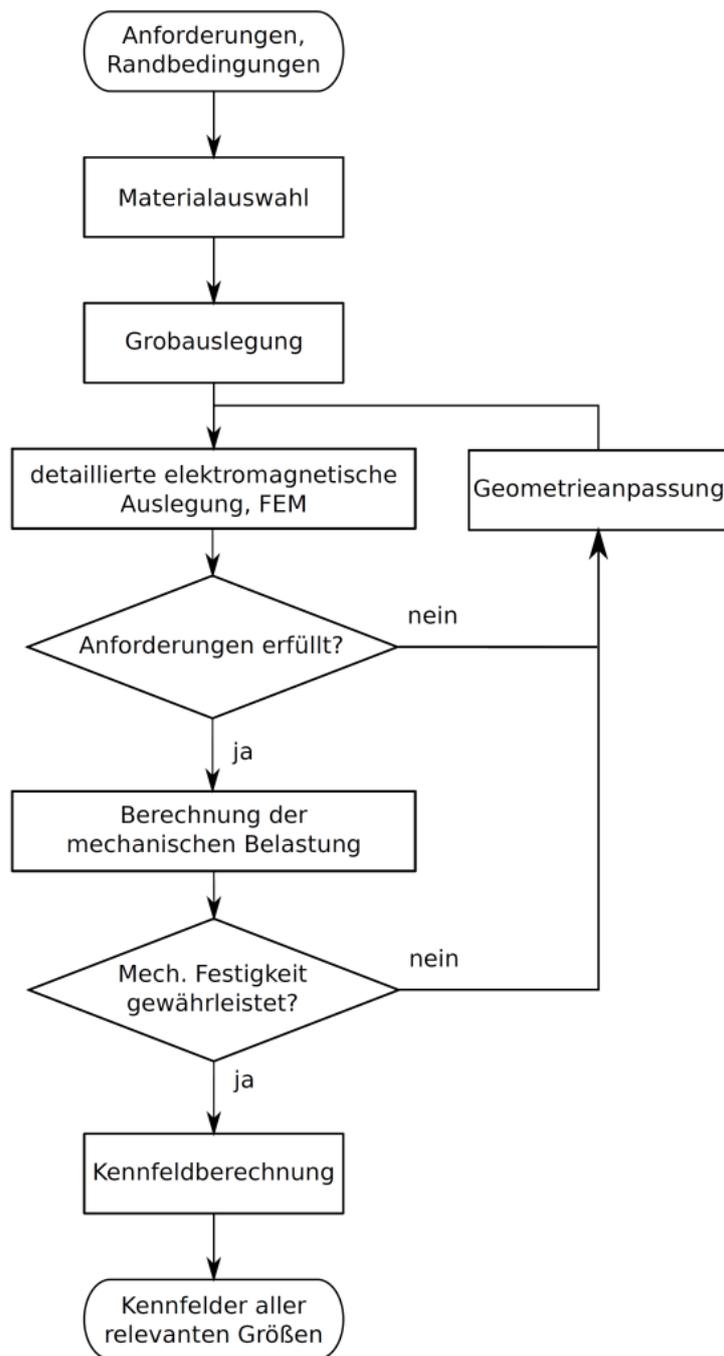


Bild 4: Ablaufdiagramm zur Auslegung einer Hochdrehzahl-PMSM.

4.1 Randbedingungen und Einschränkungen

Durch die Einbausituation im Fahrzeug sowie den weiteren Komponenten des Antriebsstrangs ergeben sich weitere Randbedingungen und Einschränkungen, die vor Beginn der Auslegung zu klären sind. So ist der Bauraum im Fahrzeug limitiert und es ergibt sich ein maximal zu Verfügung stehendes Volumen für die elektrische Maschine. Dies kann dazu führen, dass das Längen- zu Durchmesser-Verhältnis der Maschine nicht frei wählbar ist oder von einem optimalen Verhältnis aus Bohrungsdurchmesser zu Außendurchmesser abgewichen werden muss.

In Abstimmung mit den Getriebekonstrukteuren wird die maximale Maschinendrehzahl festgelegt, denn mittels der Getriebeübersetzung kann die Bauraumaufteilung zwischen Getriebe und Maschine sowie deren Bauformen beeinflusst werden.

Weitere Einschränkungen ergeben sich durch den Aufbau des Hochvolt-Bordnetzes des Fahrzeugs, wodurch beispielsweise die maximale Zwischenkreisspannung und Klemmenspannung vorgegeben ist. Aufgrund der Schaltfrequenz der Leistungselektronik ist die maximale elektrische Frequenz beschränkt, denn es muss eine ausreichende Anzahl an Schaltpulsen pro elektrischer Periode zur Verfügung stehen. Dadurch ist die Auswahl der Polpaarzahl eingeschränkt. Die Leistungselektronik limitiert zudem den maximal möglichen Strangstrom der Maschine.

Da die Leistungsfähigkeit der Maschine im späteren Betrieb maßgeblich durch ihr thermisches Verhalten geprägt ist, sind die Spezifikationen der Kühlung der Maschine ebenfalls im Vorfeld der Auslegung zu klären.

4.2 Verlustberechnung

Um bereits während des Auslegungsprozesses den Wirkungsgrad der Maschine in jedem Betriebspunkt vorhersagen zu können, ist eine zuverlässige Vorhersage der auftretenden Verluste notwendig. Betrachtet werden mechanische Verluste durch Luft- und Lagerreibung, Ohm'sche Verluste in der Statorwicklung, Wirbelstromverluste in den Permanentmagneten sowie Eisenverluste in Stator und Rotor.

Aufgrund der hohen Drehzahl und den damit verbundenen hohen elektrischen Frequenzen verursachen Eisenverluste einen signifikanten Anteil an den Gesamtverlusten. Mit Hilfe des IEM-5-Parameter-Ansatzes können diese auch für in modernen Traktionsantrieben üblicherweise auftretende Frequenzen und Flussdichten bestimmt werden [5].

4.3 Materialauswahl

Die Auswahl der weichmagnetischen Materialien ist ein wichtiger Aspekt um der Anforderung nach einer hohen Fahrzeugeffizienz gerecht zu werden. Durch den Betrieb bei hohen Drehzahlen und den damit verbundenen hohen Fliehkraftbelastungen des Rotors sind neben den elektromechanischen Eigenschaften zudem die mechanischen Materialeigenschaften von wichtiger Bedeutung. Messungen der Eisenverluste und Magnetisierbarkeit bei unterschiedlichen Frequenzen am Eppsteinrahmen bilden die Grundlage für die Materialauswahl. Zudem können aus diesen Messungen die Verlustparameter für die IEM-5-Parameter-Formel bestimmt werden. In [7] wurden beispielhaft die Messergebnisse der Blechsorten M250-35A und 280-30 AP vorgestellt. Die 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ von 280-30 AP liegt etwa 30 % bis 40 % höher als bei Standard-Elektrobleche und ist somit besonders für die Verwendung in Rotoren von Hochdrehzahlmaschinen von Interesse. Mit Blechen erhöhter Festigkeit können gezielt die Stege im Rotor verkleinert werden um Streuflüsse zu reduzieren und die Ausnutzung des eingebrachten Magnetmaterials zu erhöhen. Im Stator dagegen liegt der Fokus auf der Auswahl einer verlustarmen Blechsorte, da im Stator der Großteil der Eisenverluste erzeugt wird.

4.4 Auslegung

Nach der Klärung der Randbedingungen und der Auswahl der weichmagnetischen Materialien folgt die eigentliche Auslegung der Maschine. Diese gliedert sich in die Grobauslegung, die Detailauslegung sowie die mechanische Auslegung des Rotors.

4.4.1 Grobauslegung

Vor der Bestimmung der ersten groben Abmessungen wird im Rahmen der Grobauslegung die Auswahl einer Rotortopologie getroffen. Die Anordnung der Magnete im Rotor der Maschine hat Einfluss auf die Höhe der Wirbelstromverluste in den Magneten, die Leistungsdichte der Maschine sowie auf ihr Betriebsverhalten. Um eine hohe Leistungsdichte zu erzielen fällt die Wahl im vorliegenden Beispiel auf einen Rotor, in dem die Magnete V-förmig vergraben angeordnet sind [8, 9]. Bild 5 zeigt einen Ausschnitt der gewählten Rotortopologie. Diese weist eine hohe magnetische Ausnutzung auf und benötigt somit verhältnismäßig wenig Permanentmagnetmaterial, was den Kosten der Maschine zugutekommt.

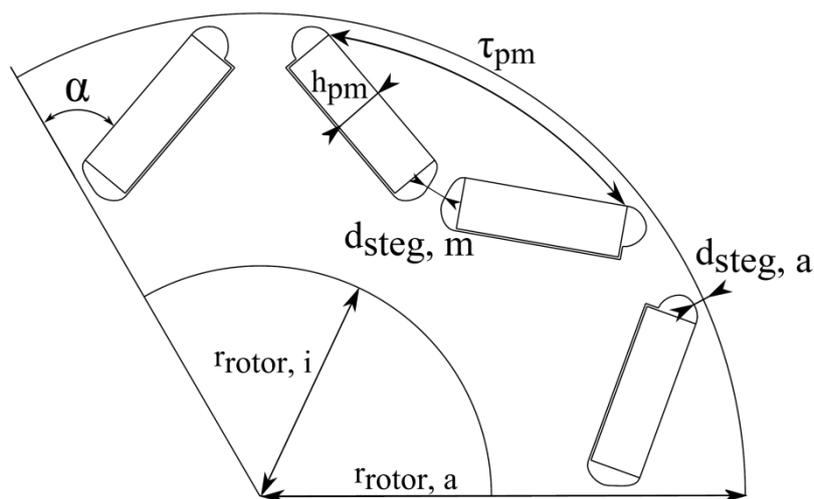


Bild 5: Ausschnitt eines Rotors mit V-förmig vergrabener Magnetanordnung und Kennzeichnung relevanter Parameter.

Eine Einzelzahnwicklung mit $q = \frac{1}{2}$, die sehr kompakte Wickelköpfe aufweist, besitzt aufgrund der sehr großen Einzelzähne einen erhöhten Streuflussanteil, wodurch sie im vorliegenden Fall nicht geeignet ist. Stattdessen wird eine verteilte Wicklung mit einer Lochzahl von $q = 2$ ausgewählt. Ein Ausschnitt des Stators ist in Bild 6 dargestellt. Vor der Bestimmung der ersten groben Abmessungen muss die Polpaarzahl der Maschine festgelegt werden. Bedingt durch die Schaltfrequenz des Umrichters sind die elektrischen Grundfrequenzen im vorliegenden Fall auf ca. 1 kHz begrenzt. Somit ergibt sich für eine maximale Drehzahl von 18.000 min^{-1} eine maximale Polpaarzahl von $p = 3$. Da bei kleinerer Polpaarzahl die Abmessungen der einzelnen Pole, die Magnetgröße und daher auch die Dicke der Eisenstege im Blech zunimmt, was zu erhöhtem Streufluss führt, wird die Polpaarzahl auf $p = 3$ festgelegt. So wird eine möglichst hohe Ausnutzung der Magnete erzielt.

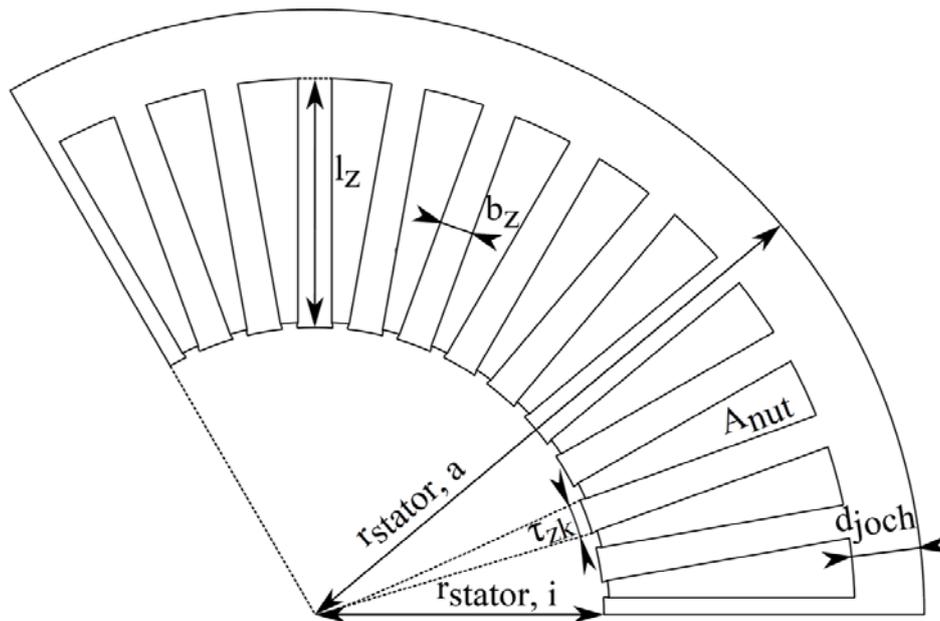


Bild 6: Ausschnitt eines Stators mit verteilter Wicklung mit $q = 2$ und Kennzeichnung relevanter Parameter.

Die groben Abmessungen der Aktivteile können, wie in [6, 10] beschrieben, analytisch ermittelt werden. Dabei muss die Limitierung des Bauraums beachtet werden und gegebenenfalls das Verhältnis aus Länge zu Durchmesser des Entwurfs angepasst werden.

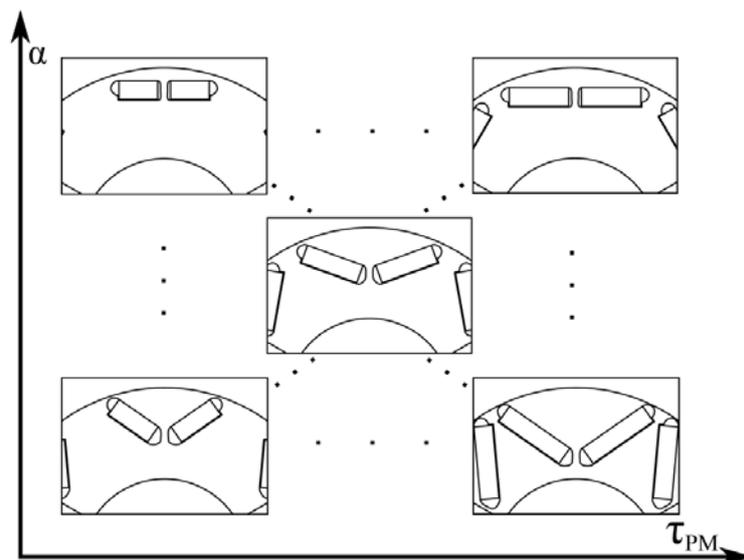


Bild 7: Exemplarische Rotorvariation.

4.4.2 Detailauslegung

Nachdem die Grobabbmessungen ermittelt wurden, schließt sich eine detaillierte elektromagnetische Auslegung an. Um Einflüsse durch Sättigung und Streuflüsse

berücksichtigen zu können, werden numerische Berechnungsverfahren eingesetzt. In [8] werden die einzelnen numerischen Simulationen beschrieben.

Mit Hilfe von Variationsrechnungen wird die Geometrie iterativ verfeinert. Dabei können einzelne Parameter als auch Parameterkombinationen variiert werden um so optimale Parameterkombinationen zu ermitteln. Bild 7 zeigt für den Rotor beispielhaft den aufgespannten Parameterraum über den Öffnungswinkel der V-Anordnung α und die Polbedeckung τ_{PM} . Gut zu erkennen ist die Abhängigkeit der im Rotor verbauten Magnetmasse von diesen beiden Parametern.

Bewertungskriterien können zum Beispiel die Höhe des erreichten Drehmomentes, die Höhe der Drehmomentschwankung, der Verlauf der Klemmenspannung unter Last und im Leerlauf, die auftretenden Verluste sowie das Verhältnis aus erreichtem Drehmoment und dazu benötigtem Materialmengen sein. Als Beispiel für die Bewertung ist in Bild 8 als Maß für die Verzerrung die Total Harmonic Distortion (THD) der induzierten Spannung in Abhängigkeit von Zahnkopfradius r_{zk} und Zahnkopfbedeckung τ_{zk} zu sehen. Der variierte Parameterraum ist in Bild 9 veranschaulicht.

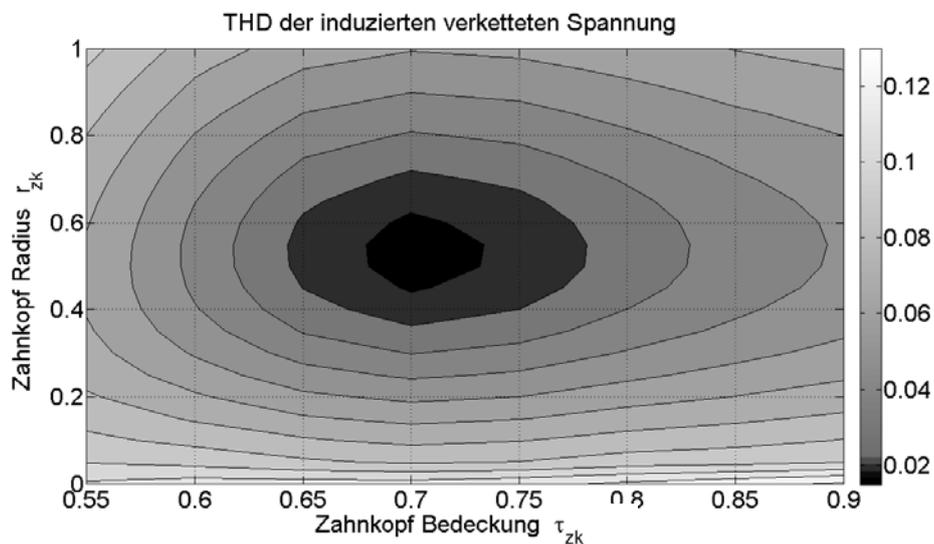


Bild 8: THD der verketteten Leerlaufspannung am Beispiel einer Einzelzahnwicklung bei Variation von Zahnkopfbedeckung und Zahnkopfradius.

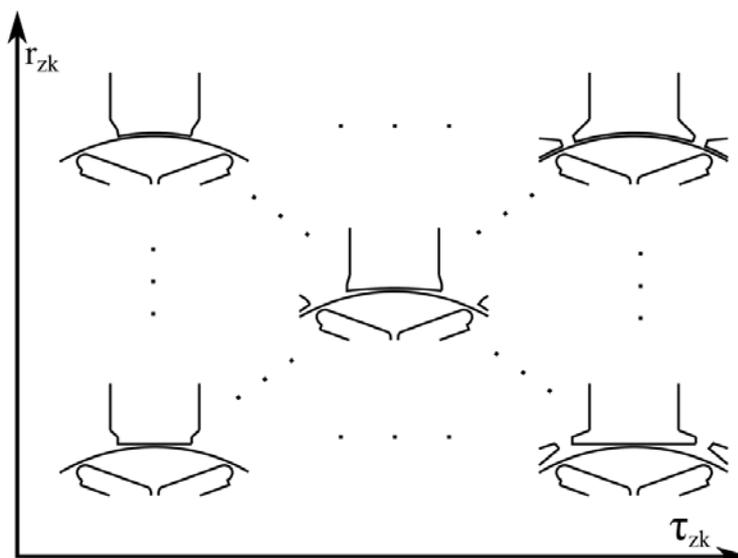


Bild 9: Exemplarische Statorvariation.

4.4.3 Mechanische Auslegung

Die bei Rotation auf den Rotor wirkenden Fliehkräfte steigen quadratisch mit der Drehzahl. Daher ist er vor allem bei hohen Drehzahlen sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Die höchsten Belastungen treten in den äußeren Stegen der V-förmigen Anordnung auf sowie am mittleren Steg zwischen den beiden Magneten innerhalb einer V-Anordnung. Die Stege müssen einerseits ausreichend dimensioniert sein um die mechanische Festigkeit jederzeit zu gewährleisten, andererseits jedoch so dünn wie möglich ausgeführt werden um Streuflüsse im Rotor zu vermeiden.

Dementsprechend muss für jede Parametervariation, bei der die Rotorgeometrie geändert wird, eine Anpassung der Stegbreiten erfolgen. Somit ergibt sich während der Detailauslegung ein iterativer Auslegungsprozess, bis die zu anfangs gestellten Anforderungen erfüllt sind und gleichzeitig die mechanische Festigkeit gewährleistet ist.

4.5 Kennfeldberechnung

Im Anschluss an die Auslegung können alle relevanten elektrischen Größen und Verluste in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl bestimmt und in Form von dreidimensionalen Kennfeldern dargestellt werden. Dies ermöglicht die Beschreibung des Verhaltens der Maschine über den gesamten Betriebsbereich. Die Kennfelder können beispielsweise in weiterführende Systemsimulationen des gesamten Antriebsstrangs einfließen.

5. Zusammenfassung

An den Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs und die einzelnen Komponenten werden vielfältige Anforderungen gestellt, die sowohl von der Art des Fahrzeugs als von dessen Anforderungsprofil abhängig sind. Die wesentlichen Anforderungen sind ein hoher Wirkungsgrad, geringer Bauraumbedarf sowie geringe Material- und Fertigungskosten. Das Ziel der Auslegung ist es alle Anforderungen dieses Auslegungsdreiecks möglichst gut zu erfüllen. Da sich die Aspekte jedoch gegenseitig beeinflussen, können sie nicht unabhängig voneinander betrachtet werden.

Die Beschreibung der grundlegenden Zusammenhänge dieser Aspekte verdeutlicht den Zielkonflikt bei der Auslegung. Am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine wurde eine Entwurfsmethodik entwickelt, mit der dieser Konflikt gelöst werden kann.

6. Danksagung

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Verbundprojektes „e-generation“, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N11867 gefördert wurde.

Literatur / References

- [1] A. Kampker, P. Burggraf, and C. Nee, "Costs, quality and scalability: Impact on the value chain of electric engine production," in *Electric Drives Production Conference (EDPC), 2012 2nd International*, 2012, pp. 1–6.
- [2] D. Schröder, *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [3] G. Bertotti: General properties of power losses in soft ferromagnetic materials, *IEEE Transactions on Magnetics* 24 (1988), Januar, Nr. 1, S. 621 –630.
- [4] G. Bertotti: Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers (Electromagnetism), Academic Press, 1998.
- [5] D. Eggers, S. Steentjes, K. Hameyer: Advanced Iron-Loss Estimation for Non-linear Material Behavior, *IEEE Transactions on Magnetics* 48 (2012), November, Nr. 11, S. 3021 –3024. – ISSN 0018–9464.
- [6] K. Vogt: *Berechnung Elektrischer Maschinen*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 1996.
- [7] M. Hombitzer, G. von Pfingsten, D. Franck und K. Hameyer, „Entwurfsmethodik für eine PMSM als Traktionsantrieb für ein elektrisches Sportfahrzeug“, *ETG Kongress 2013, Fachtagung Forschung und Entwicklung für die Elektromobilität, Berlin, November 2013*
- [8] T. Finken, M. Hafner, M. Felden, K. Hameyer: Design rules for energy efficient IPM motors in HEV applications, *Electromotion*, Vol. 17, No. 3, July 2010, pp. 143-154.
- [9] T. Finken, M. Hombitzer, and K. Hameyer, "Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles," in *Emobility - Electrical Power Train, 2010*, 2010, pp. 1–7.
- [10] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcov: *Design of rotating electrical machines*, Wiley: Chichester, 2008.

Autoren / *The Authors:*

Dipl.-Ing. Marco Hombitzer,
Dipl.-Ing. David Franck,
Georg von Pfingsten, M.Sc.,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer,

Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University, 52062 Aachen
E-Mail: marco.hombitzer@iem.rwth-aachen.de