1

Einleitung

Die Elektromobilität ist prinzipiell nichts Neues, sondern existiert annähernd solange wie das Automobil selbst. Ende des 19. Jahrhunderts hat der Franzose Gustave Trouvé das erste Elektroauto entwickelt [1]. Im Vergleich zu den Verbrennungskraftmaschinen hatten die elektrischen Antriebe den Vorteil der leichteren Regelung und der besseren Kraftübertragung [2]. Durch die Entwicklung des elektromagnetischen Starters verloren jedoch die Elektromotoren ihre entscheidenden Vorteile gegenüber Verbrennungskraftmaschinen, deren Erfolgsgeschichte nicht mehr aufzuhalten war. Alle weiteren Versuche der frühen Elektromobilität scheiterten zudem an der geringen Reichweite [3, 4].
Erst mit dem Ziel der Verringerung der Treibhausgase und des CO_2-Ausstoßes [N1] wegen der globalen Klimaerwärmung hat die Elektromobilität auf der ganzen Welt wieder an Fahrt aufgenommen. Speziell für Deutschland sieht die Bundesregierung Chancen für Wirtschaft und Industrie in der Elektromobilität [5] und hat als Ziel eine Million Elektrofahrzeuge bis zum Jahre 2020 ausgegeben [6]. Alle renommierten Automobilkonzerne arbeiten nun an hybridelektrischen (HEV) und batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Dies führt zu neuen Herausforderungen in der Entwicklung, beispielsweise bei der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) im Kraftfahrzeug (KFZ).
Der folgende Passus erläutert zunächst die Motivation und die Zielstellung dieser Dissertation. Anschließend wird auf die Herausforderung der EMV im elektrischen Antrieb näher eingegangen. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels beschreibt den Aufbau der gesamten Arbeit.

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

1.1 Motivation

Durch die Integration des elektrischen Antriebs in das Automobil entstehen neue Herausforderungen für Entwicklung und Forschung. Eine dieser Thematiken ist die EMV. Die Definition besagt, dass keine elektrische Einrichtung ein anderes System beziehungsweise sich selbst unzulässig beeinflussen darf und dass dieses einwandfrei in dieser Umgebung funktionieren muss [7, N2]. Das pulsierende Betriebsverhalten der Leistungselektronik (LE), welches Kapitel 1.3 näher erläutert, kann dies aber unter Umständen nicht mehr gewährleisten, was zu folgenden Herausforderungen in einem Fahrzeug führt:

- Störung der Sensorik oder des Radioempfangs
- Lagerströme in Getriebe und elektrischer Maschine (EM)
- Nichtzulassung des Fahrzeugs aufgrund von EMV-Normen und Gesetzgebung

Einfache Maßnahmen können die Störungen der Sensorik bereits in der E-Maschine reduzieren. Als Beispiel hierfür können Kondensatoren und Ferrite zur Entstörung von Temperatursensoren genannt werden. Sie filtern die Störungen in diesem Fall wirkungsvoll, da die Zeitkonstante der Temperaturmessung um ein Vielfaches größer ist. Jedoch beeinflusst die Leistungselektronik den Radioempfang, im Speziellen die Mittelwelle mit der Amplitudenmodulation (AM). Die AM basiert auf einer Multiplikation des Informationssignals und einer Trägerfunktion [8]. Dadurch überträgt die Amplitude des Ausgangssignals die Information, was im Frequenzbereich als Seitenbänder zur Trägerfrequenz erkennbar ist. Da das Betriebsverhalten der LE, welches auch auf einer Art AM basiert, mit der Empfangsart des Radios übereinstimmt, wird der Mittelwellen (MW)-Bereich im Radio besonders beeinträchtigt. Aus diesem Grund ziehen die Störungen durch die LE hauptsächlich diesen Frequenzbereich ($300\,\mathrm{kHz} - 3000\,\mathrm{kHz}$) in Mitleidenschaft. Im äußersten Fall ist kein Empfang des Radios im Fahrzeug mehr möglich.
Als eine weitere Herausforderung bedingt durch den pulsierenden Betrieb zeigen sich Lagerströme in der elektrischen Maschine beziehungsweise im nachfolgenden Getriebe in einem BEV oder HEV. Solche treten in unterschiedlichen Ausprägungen auf [9–13], aber vor allem die Electrostatic Discharge Machining (Entladeströme) (EDM) und die zirkulierenden Ströme können die Lebensdauer der Lagerung verringern. EDM-Ströme entstehen durch eine kapazitiv übertragene Spannung von der Wicklung auf die Welle. Im Gegensatz dazu stammen

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

die zirkulierenden Ströme von einer induzierten Spannung auf der Welle. Diese Spannung entsteht durch eine induktive Kopplung der Ableitströme der Wicklung im Stator [10] auf die Welle. Dennoch entwickeln sich beide Arten der Lagerströme durch die Störspannung des Pulswechselrichters (PWR), die Abschnitt 1.3 genauer beschreibt.
Als letzte Thematik ist die Zulassung der Fahrzeuge zu nennen. Es gibt unterschiedlichste EMV-Normen in den verschiedenen Regionen [N3–N7]. Für eine Zulassung auf dem Markt muss das Fahrzeug all diese Normen einhalten.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Aufgabenstellung dieser Dissertation ist eine EMV-gerechte Gestaltung einer elektrischen Maschine für das KFZ. Im Antriebsstrang existieren mehrere Stellschrauben für die Verringerung der elektromagnetischen Beeinflussung (EMI) in LE/PWR und EM. Der optimale Bereich, abgeleitet aus Kosten, Komplexität und Bauraum, befindet sich jedoch in der E-Maschine. Daher wird eine EMV-Maßnahme in die elektrische Maschine integriert. Warum Lösungen im PWR nicht zum Ziel führen, erläutert der Stand der Technik in Kapitel 2.4. Für die Entwicklung dieser EMV-gerechten elektrischen Maschine (IM EMC) gelten folgende Punkte als Zielsetzung:

- Verminderung der Lagerspannung
  - Reduzierung des leitungsgebundenen Störspektrums auf der mechanischen Welle
  - Vermeidung von Lagerströmen
- Keine negativen Auswirkungen auf die Maschinenperformance
  - Wirkungsgrad
  - maximales Drehmoment
  - maximale Leistung

Die entwickelte Maschine soll die Welle-zu-Erde- beziehungsweise Lagerspannung soweit wie möglich vermindern. Da die Anforderungen durch die EMV ($\approx$ mV) höher als durch die Reduzierung der Lagerströme ($\approx$ V) sind, werden diese ebenso durch die gestellten Anforderungen vermieden.
Als zweites Ziel ist die Beibehaltung der Maschinenperformance zu nennen. Die Änderung in der elektrischen Maschine soll keine Auswirkung auf die Performance haben. Der Wirkungsgrad sowie die maximale Leistung sollen erhalten

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

bleiben. Um die beiden Maschinen, konventionelle und EMV-gerechte, vergleichen zu können, wird von einer Änderung des Blechschnitts abgesehen.
Für die Untersuchung der Lösungsvarianten wird ein Berechnungswerkzeug mit einem Hochfrequenz (HF)-Modell der EM entwickelt. Die Ergebnisse dieses Tools lassen eine Bewertung der Lösungen im Frequenzbereich zu. Anschließend setzt ein Prototyp der IM EMC die am aussichtsreichsten wirkende Maßnahme in einer Maschine um. Zum Abschluss validieren Messungen am Komponentenprüfstand die Berechnungsergebnisse der Simulation mit dem HF-Modell. Zusätzlich führt ein Vergleich der IM EMC mit einer konventionellen elektrischen Maschine zur Einschätzung des Einflusses der Maßnahme auf die Maschinencharakteristik. Eine Vorgabe für diese Arbeit liegt in den zu verwendenden Tools für die Berechnungen und Simulationen, die außer in Matlab® nur in Freeware ablaufen sollen (Finite Element Method Magnetics (Version 4.2, 15 Nov. 2013) (FEMM) und Linear Technology Spice Simulator (Version IV) (LTspice)).

1.3 EMV im elektrischen Antrieb

Alle folgenden Betrachtungen basieren auf dem in Abbildung 1.1 dargestellten elektrischen Antriebsstrang eines BEV oder HEV. Dieser setzt sich aus einem Energiespeicher auf der Gleichstrom (DC)-Seite, der LE oder PWR und einer EM zusammen.
Der PWR verbindet die DC- mit der Wechselstrom (AC)-Seite. Die Transformation von Gleichspannung zum Drehstromsystem erfolgt über Pulsdauermodulation (PDM). Aus diesem Grund sendet die LE leitungsgebundene HF-Störsignale aus. Dadurch stellt diese die sogenannte Störquelle aus Sicht der EMV dar. Die galvanische Übertragung der jeweiligen Störungen erfolgt über die Hochvoltlei-

Abbildung 1.1: Prinzipdarstellung des elektrischen Antriebsstrangs in einem Kraftfahrzeug

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

tungen (HVL)[1] zur EM beziehungsweise über die sogenannten Traktionsleitungen zur Batterie. Den Einfluss der Batterie und die Auswirkungen auf die EMI der DC-Seite erläutern [14–17] näher. Da die elektrische Maschine und damit einhergehend die AC-Seite im Fokus steht, verzichtet diese Arbeit auf eine detaillierte Betrachtung der DC-Seite.

1.3.1 Leistungselektronik als Störquelle

Für die Transformation der Gleichstromseite auf ein Drehstromsystem können zwei prinzipielle Methoden, das Unterschwingungsverfahren und die Raumzeigermodulation, verwendet werden. Das Unterschwingungsverfahren, auch als Trägerverfahren bezeichnet, nutzt zur Generierung der Schaltimpulse Referenzkurven [18]. In dieser Methode tastet ein Dreieckssignal das Referenzsignal ab. Dadurch erzeugt die Ansteuerung des PWRs die Taktung mit variierender Pulsdauer für die einzelnen Phasen. Dieses Verfahren bezeichnet die Literatur als Sinus-Dreieck-Methode [19]. Eine Injektion der dritten Harmonischen führt zur Erhöhung des Modulationsgrads [18]

$$M = \frac{\widehat{u}_{\mathrm{u0,1}}}{U_{\mathrm{d}}/2}, \tag{1.1}$$

den Gleichung (1.1) als Verhältnis der Grundschwingungsamplitude $\widehat{u}_{\mathrm{u0,1}}$ der Phasennullspannung zur halben Zwischenkreis (ZK)-Spannung U_{d} definiert. Diese Aufprägung mit einem Sinus- oder Dreiecksignal ist auch unter dem Begriff Supersinus-Dreieck-Modulation bekannt [20, 21]. Dadurch erreicht der Modulationsgrad sein Maximum von $M = \frac{2}{\sqrt{3}}$ [18] ohne diskontinuierliches Ansteuerverfahren. Abbildung 1.2 zeigt als Beispiel das Verfahren mit einer Überlagerung der dritten Harmonischen. In der oberen Darstellung ist die Referenzkurve mit einem Modulationsgrad $M = 0{,}9$ und das Abtastdreieck mit der zehnfachen Frequenz $f_{\mathrm{c}} = 10 f_{\mathrm{a}}$ zu sehen. Das untere Diagramm stellt die daraus resultierenden Impulse für die Ansteuerung der Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)-Halbbrücke dar. Die PDM durch das Unterschwingungsverfahren ist deutlich zu erkennen.

Als zweite Methodik kommt die Raumzeigermodulation (SVM) zum Einsatz. Dieses rein mathematische Verfahren für die Impulserzeugung ist durch die einfache Implementierung auf Mikrocontrollern weit verbreitet. Zusätzlich ermög-

[1] Unter dem Begriff *Hochvolt* werden in der Fahrzeugtechnik alle Spannungen $> 60\,\mathrm{V\,DC}$ und $> 30\,\mathrm{V\,AC}$ definiert [N8]. Im Vergleich dazu werden in der Elektrotechnik Spannungen $> 1\,\mathrm{kV\,AC}$ als Hochspannung bezeichnet [N9].

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