

# **Elektromotorisch unterstützte Abgasturbolader Neuartige Möglichkeiten für High-Performance- Anwendungen**

## **Electric assisted turbochargers Remarkable new possibilities for high-performance powertrains**

**Kay-Horst Dempewolf<sup>a,1</sup>, Leonard Rödl<sup>a,2</sup> und Florian  
Wallrapp<sup>b,3</sup>**

- a WITTENSTEIN cyber motor GmbH  
Walter-Wittenstein-Straße 1, 97999 Igersheim, Deutschland
- b WITTENSTEIN electronics GmbH  
Walter-Wittenstein-Straße 1, 97999 Igersheim, Deutschland

**Kurzfassung:** Maximales Drehmoment so schnell wie möglich ab dem „Kick-Down“ aufzubauen, ist für niedrig motorisierte Fahrzeuge der Kompaktklasse eine nützliche Zusatzoption. Für High-Performance-Sportwagen ist diese Eigenschaft hingegen von allerhöchster Bedeutung.

Elektrische Antriebe liefern speziell in diesem Segment die entscheidenden Zehntelsekunden beim Beschleunigen, indem sie den Ladedruck unabhängig von den thermodynamischen Vorgängen des Verbrennungsmotors bereitstellen. Bei Betriebszuständen mit überschüssigem Ladedruck kann zudem Abgasenergie rekuperiert und zwischengespeichert werden, um diese beim nächsten Beschleunigungsvorgang zu nutzen.

Mit steigender Fahrzeugantriebsleistung steigt dabei in der Regel auch die geforderte elektrische Zusatzleistung, weil die zu beschleunigenden Masenträgheiten der Turbolader größer werden. Gleichzeitig stehen das Package und das Gewicht der Ladedruck erzeugenden Bauelemente bei Sportwagen im Fokus.

In Kombination mit einem hybridisierten Antriebsstrang und einer damit vorhandenen 400 V- oder sogar 800 V-Spannungsversorgung lassen sich

---

<sup>1</sup> E-Mail: [kay-horst.dempewolf@wittenstein.de](mailto:kay-horst.dempewolf@wittenstein.de), URL: <http://cyber-motor.wittenstein.de/>

<sup>2</sup> E-Mail: [leonard.roedl@wittenstein.de](mailto:leonard.roedl@wittenstein.de), URL: <http://cyber-motor.wittenstein.de/>

<sup>3</sup> E-Mail: [florian.wallrapp@wittenstein.de](mailto:florian.wallrapp@wittenstein.de), URL: <http://electronics.wittenstein.de/>

auch größere elektrische Antriebsleistungen hochkompakt darstellen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die E-Maschine in den Abgasturbolader auf einer Welle mit Turbinen- und Verdichterrad integriert ist.

Durch eine Auswahl an innovativen Materialien, z.B. speziellen Elektroblechlegierungen und intelligenten Montageprozessen innerhalb der Abgasturboladerbaugruppe werden die Herausforderungen der E-Maschinenintegration beherrscht.

Im Gegensatz zu konventionellen Anwendungen der elektrischen Antriebstechnik wird der Luftspalt der E-Maschine von dem Lagerungskonzept und der möglichen Biegung der Welle beeinflusst. Die Potentiale und Auswirkungen unterschiedlich großer Luftspalte werden deshalb aus Sicht der E-Maschine betrachtet.

Nicht zuletzt spielt der Wirkungsgrad der elektrischen Antriebskomponenten eine wichtige Rolle. In diesem Beitrag werden die Eigenschaften von Silizium-Carbid-Halbleitermodulen bei hohen Schaltfrequenzen untersucht und spezielle Elektrobleche hinsichtlich mechanischer Festigkeit analysiert.

Der Beitrag stellt die Leistungsfähigkeit und das Innovationspotential der elektrischen Antriebstechnik zur Anwendung in Abgasturboladern heraus. WITTENSTEIN ist daran interessiert, die technischen Potentiale der elektrisch unterstützten Aufladung gemeinsam mit Interessenten aus der Branche „Strömungsmaschinen“ zu realisieren.

**Schlagworte:** Elektrisch unterstützter Abgasturbolader; Permanentmagneterregte Synchronmaschine; Ummagnetisierungsverluste; Rotorverluste; Leistungselektronik; Schaltverluste; Schaltfrequenz; Systembetrachtung; Effizienz; Montageprozess

**Abstract:** Building up maximum torque as soon as possible after „kick down“ is an useful option for small motor passenger cars. In the high performance sports car segment however, this is significantly important.

Electric drives deliver the crucial tenths of a second for the performance segment through building up the manifold pressure independently from the thermodynamic processes of the internal combustion engine. In operating conditions with spare manifold pressure additionally energy can be recovered and stored so that it can be used for the next accelerating operation.

With an increase of the vehicle power, normally the required power of the electric drive increases, too, because the inertia of the turbocharger that needs to be accelerated increases. At the same time weight and package of the manifold pressure creating components are very important focus points in the powertrain design of sports cars.

In combination with a hybrid powertrain architecture and therefore an existing 400 V or even 800 V voltage supply, higher electric drive power ranges can be realized in a compact way. In particular this is achieved if

the electric motor is integrated into the exhaust-driven turbocharger on the same shaft with the turbine and the impeller.

Due to a selection of innovative materials, such as special cobalt-alloy and intelligent assembly processes within the complete turbocharger unit, the challenges of integrating an electric motor are mastered.

In contrast to conventional applications for electric drives, the electric motor's air gap is highly determined by the choice of bearings and possible bending of the shaft. The potential and impact of different air gap sizes are therefore addressed from the viewpoint of an electric motor.

Last but not least the level of efficiency of the electric drive components is playing an important role. In this paper technologies like silicon-carbide-semiconductors at high switching frequencies are analyzed for its characteristics.

This paper underlines the great capabilities and potential for innovation of electric drives in exhaust-driven turbochargers. WITTENSTEIN is interested in realizing the great technical potential of electric assisted turbochargers together with interested parties of the sector "turbomachinery".

**Key words:** Electric assisted turbocharger; permanent magnet synchronous machine, rotor losses, magnetic losses, inverter, switching losses, switching frequency, Efficiency, assembly process

# 1 Einleitung

Der Markt für PKW ist geprägt von politischen Vorgaben für zukünftige Emissionsgrenzen und dem Trend des Downsizings der Verbrennungskraftmaschinen. Hybridisierung und elektrisch unterstützte Aufladung gewinnen deshalb an Bedeutung über alle PKW-Klassen hinweg.

Der Trend der elektrisch unterstützten Aufladung ist deshalb inzwischen regelmäßiger Bestandteil von Fachkonferenzen im Verbrennungskraftmaschinenbereich, wird jedoch hauptsächlich aus dem Blickwinkel der Verbrauchs- und Emissionsoptimierung und unter dem Aspekt der einfachen Integration in das 12 V- bzw. 48 V-Bordnetz betrachtet.

In einem PKW-Bereich abseits der großen Serienstückzahlen, dem Bereich für Sport- und Supersportwagen, ist ein anderer Erfolgsfaktor entscheidend: Die stetige Steigerung der Performance als Differenzierungsmerkmal und Verkaufsargument.

Allerdings befindet sich der Markt in dem Spannungsfeld, schneller als die Konkurrenz Performance-gesteigerte Modelle an den Markt zu bringen, gleichzeitig jedoch ein umfangreiches Redesign der wertigsten und in der Entwicklung teuersten Komponenten des Verbrennungskraftmaschinen-Antriebsstrangs zu umgehen.

Die elektrisch unterstützte Aufladung bietet eine ideale Möglichkeit diese sportwagenspezifischen Ziele zu vereinen und z.B. durch den Einsatz eines größeren und gleichzeitig elektrisch unterstützten Abgasturboladers die Gesamtleistung im Antriebsstrang zu steigern und time-to-torque zu minimieren, ohne komplexe Registerkonzepte zu implementieren.

WITTENSTEIN ist auf diesen Bereich der High-Performance-Anwendungen spezialisiert und Technologieführer im Bereich spezieller elektrischer Antriebslösungen, unter anderem für Onroad- und Offroad-Traktionsantriebe. Der Bereich für elektrisch unterstützte Aufladung ist ein neuer Technologiebereich, der weiter ausgebaut wird.

Auch wenn elektrisch unterstützte Aufladesysteme ebenfalls in Großserienfahrzeugen der mittleren Leistungsklasse vorkommen, werden im High-Performance-Segment andere Anforderungen an die elektrische Antriebstechnik gestellt:

Ein elektrischer Leistungsbedarf von mehr als 5 kW ist nicht sinnvoll über das 12 V- / 48 V-Bordnetz abzudecken, da die Kabel und die Verbindungstechnik zu groß und zu schwer werden, selbst wenn das Bordnetz in der Lage wäre, den benötigten Strom bereitzustellen. Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen in diesem Beitrag der für High-Performance-Anwendungen übliche Spannungsbereich zwischen 400 V und 800 V gewählt.

Bei der Produktentwicklung von E-Maschinen integriert in die Mittelgruppe von Abgasturboladern, profitiert WITTENSTEIN von Technologiesynergien aus anderen Branchen. Die Materialbeständigkeit bei hohen Temperaturen ist bereits aus der Branche Öl- und Gasexploration mit bis zu 270°C Umgebungstemperatur an Applikation ein bekanntes Thema. Die Beherrschung von hohen Rotorumfangsgeschwindigkeiten und Fliehkräften, die

auf die Permanentmagnete wirken, und die generellen Bedürfnisse der Automotive-Branche begegnen WITTENSTEIN ebenfalls regelmäßig im Bereich elektrischer Traktionsantriebe für batterieelektrische und hybridisierte Fahrzeuge. Die geberlose Lageregelung ist eine Kernkompetenz, die auch in industriellen Vakuumpumpen Anwendung findet. Hinsichtlich der Reduzierung von Gewicht sowie Massenträgheit profitiert WITTENSTEIN von den Leichtbauerfahrungen aus dem Luftfahrtbereich.

Zunächst wird eine Auswahl wesentlicher Ansätze zur Verlustreduzierung und Effizienzsteigerung mit dem Ziel der Baugrößenreduktion bzw. Leistungssteigerung vorgestellt. Im Anschluss sind die Potentiale benannt, die sich aus einer intelligenten mechanischen Integration ergeben.

Dieser Beitrag bietet Beispiele für Potentiale, die sich aus einer branchenübergreifenden, technischen Kooperation ergeben. WITTENSTEIN ist daran interessiert, diese technischen Potentiale gemeinsam mit Interessenten aus der Branche „Strömungsmaschinen“ zu realisieren.

## **2 Reduzierung von Verlusten innerhalb eines schnelllaufenden Antriebssystems**

Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels befassen sich mit der Optimierung des elektrischen Antriebssystems bestehend aus Leistungselektronik und schnelllaufender permanentmagneterregter Synchronmaschine (PMSM) zum Einsatz in einem elektrisch unterstützten Abgasturbolader. Dabei wird auf die Reduzierung von drei verschiedenen Verlustarten der jeweiligen Komponenten eingegangen, was letztlich zur Steigerung der Effizienz des elektrischen Antriebssystems beiträgt.

Die technischen Betrachtungen beziehen sich auf eine in die Mittelgruppe integrierte E-Maschine in einer High-Performance-Fahrzeuganwendung.

### **2.1 Reduzierung von Stromüberschwingungen bei schnelllaufenden Antriebssystemen**

Hochtourige, permanentmagneterregte Synchronmaschinen werden typischerweise an Frequenzumrichtern in geberloser Drehzahlregelung betrieben. Diese Frequenzumrichter erzeugen durch ihre Pulsmuster neben der gewünschten Stromgrundschwingung auch ein Spektrum an Stromüberschwingungen, welche zusätzliche Induktionswellen im Luftspalt der E-Maschine hervorrufen, die letztlich Wirbelströme in den elektrisch leitfähigen Gebieten des Rotorrückschlusses oder der Permanentmagnete verursachen. Diese parasitären Wirbelströme wiederum führen insbesondere bei niederpoligen Schnellläufern zur zusätzlichen Erwärmung des Rotors und damit weiterer Bauteile, wie Welle oder Lagerung des Abgasturboladers [1].

Abbildungen 2.1 und 2.2 zeigen die Strangströme  $I_U$ ,  $I_V$ ,  $I_W$  einer PMSM an einem 2-Punkt-Frequenzumrichter mit Zwischenkreisspannungsversor-

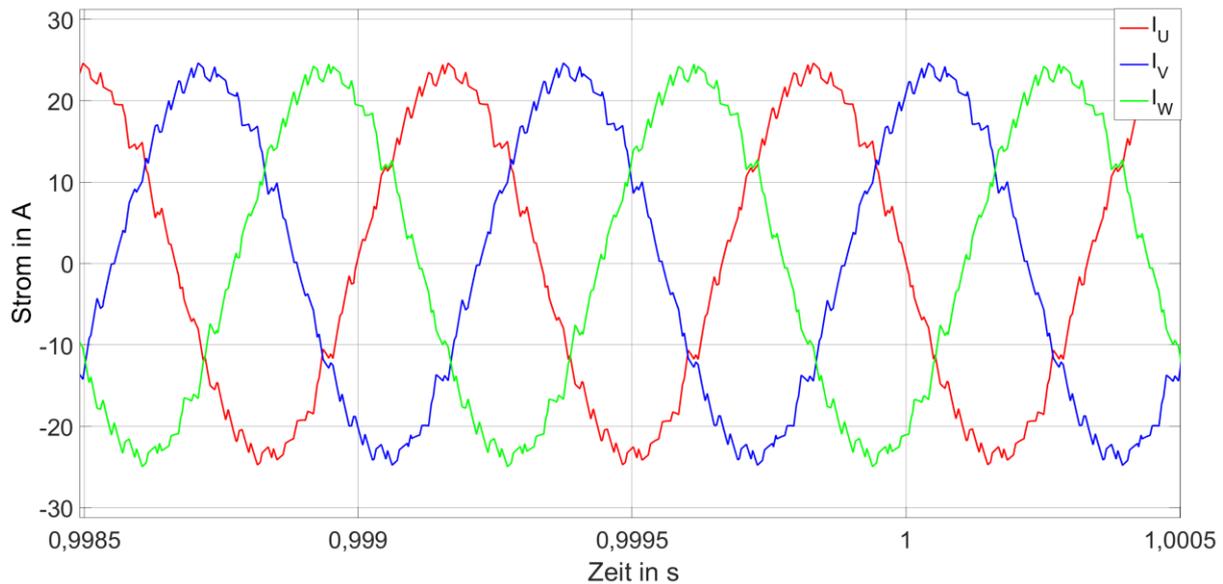


Abbildung 2.1: Strangströme  $I_U$ ,  $I_V$ ,  $I_W$  einer PMSM bei einer Zwischenkreisspannung  $U_{DC} = 800$  V und einer Schaltfrequenz von  $f_{S1} = 24$  kHz

gung  $U_{DC} = 800$  V bei einer Schaltfrequenz von  $f_{S1} = 24$  kHz im Vergleich zu  $f_{S2} = 48$  kHz. Deutlich sind die unterschiedlichen Ausprägungen der Stromüberschwingungen abweichend von der rein sinusförmigen Stromgrundschiwingung in den Strangströmen  $I_U$ ,  $I_V$ ,  $I_W$  zu erkennen.

In den Abbildungen 2.3 und 2.4 ist der Vergleich des Stromüberschwingungsspektrums bei einer Schaltfrequenz von  $f_{S1} = 24$  kHz und  $f_{S2} = 48$  kHz bei pulsweitenmoduliertem Betrieb und maximaler Spannungsaussteuerung ersichtlich. Die Grundfrequenz des Ausgangstroms beträgt  $f_1 = 1.600$  Hz.

Aus dem Spektrum der Strangströme bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen ist ersichtlich, dass die hochfrequenten Anteile stark um den Bereich der Schaltfrequenz vertreten sind. Je höher die Schaltfrequenz gewählt wird, desto geringer fallen die Amplituden der Stromüberschwingungen aus. Aus der Theorie folgt, dass die daraus resultierenden Verluste auf dem Rotor bei einer Schaltfrequenz von  $f_{S1} = 48$  kHz geringer ausfallen [2].

Schnelllaufende PMSM haben im Allgemeinen aufgrund der hohen gewünschten Drehzahl eine Statorwicklung, die eine relativ geringe Strang- bzw. Anschlussinduktivität aufweisen. Die Einflussfaktoren auf das Stromüberschwingungsspektrum sind neben der geringen Induktivität des Motors auch die Zwischenkreisspannung des Frequenzumrichters. Die Änderung des Stromes ist definiert nach Gleichung 2.1.

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U_L}{L}$$

Gl. 2.1

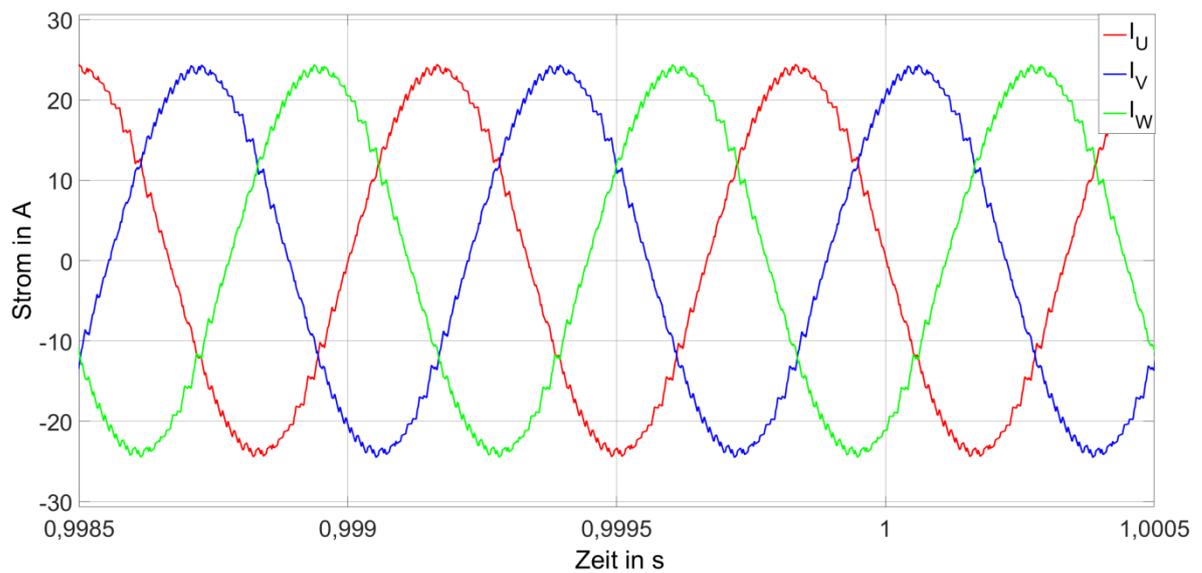


Abbildung 2.2: Strangströme  $I_U$ ,  $I_V$ ,  $I_W$  einer PMSM bei einer Zwischenkreisspannung  $U_{DC} = 800$  V und einer Schaltfrequenz von  $f_{S1} = 48$  kHz

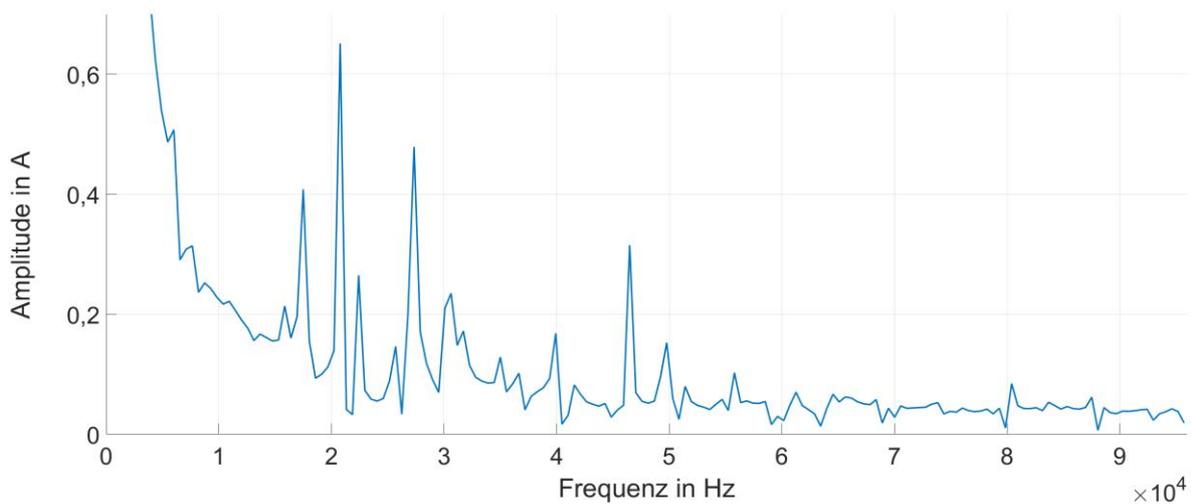


Abbildung 2.3: Stromüberschwingungsspektrum eines Strangstroms  $I$  einer PMSM bei  $U_{DC} = 800$  V und  $f_{S1} = 24$  kHz

Mit der Spannung  $U_L$ , welche im direkten Zusammenhang mit der Zwischenkreisspannung steht, bildet sich eine Stromänderung über die Induktivität  $L$  aus. Diese Stromänderung ist mit  $\Delta t$  indirekt proportional zur Schaltfrequenz  $f_s$  des Frequenzumrichters.

Damit die Stromschwankungsbreiten und darin der einhergehende Strom-

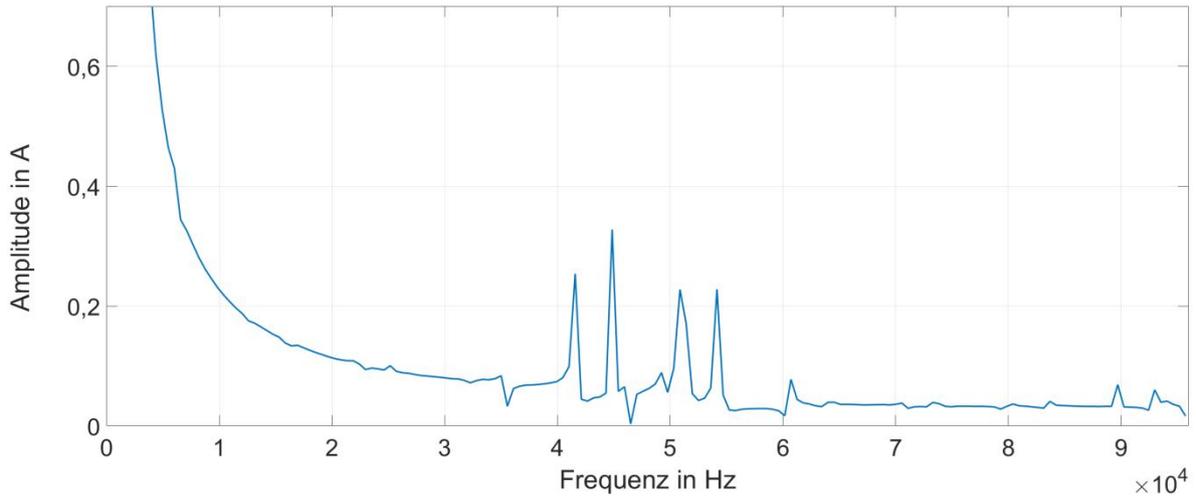


Abbildung 2.4: Stromüberschwingungsspektrum eines Strangstroms  $I$  einer PMSM bei  $U_{DC} = 800 \text{ V}$  und  $f_{S1} = 48 \text{ kHz}$

überschwingungsgehalt minimiert werden können, sind hohe Schaltfrequenzen des Frequenzumrichters unabdingbar. Abbildung 2.5 veranschaulicht die Rotorverluste in Abhängigkeit von der E-Maschinendrehzahl, der Puls-Amplituden-Modulation (PAM) und der Schaltfrequenz der Puls-Weiten-Modulation (PWM) eines Frequenzumrichters.

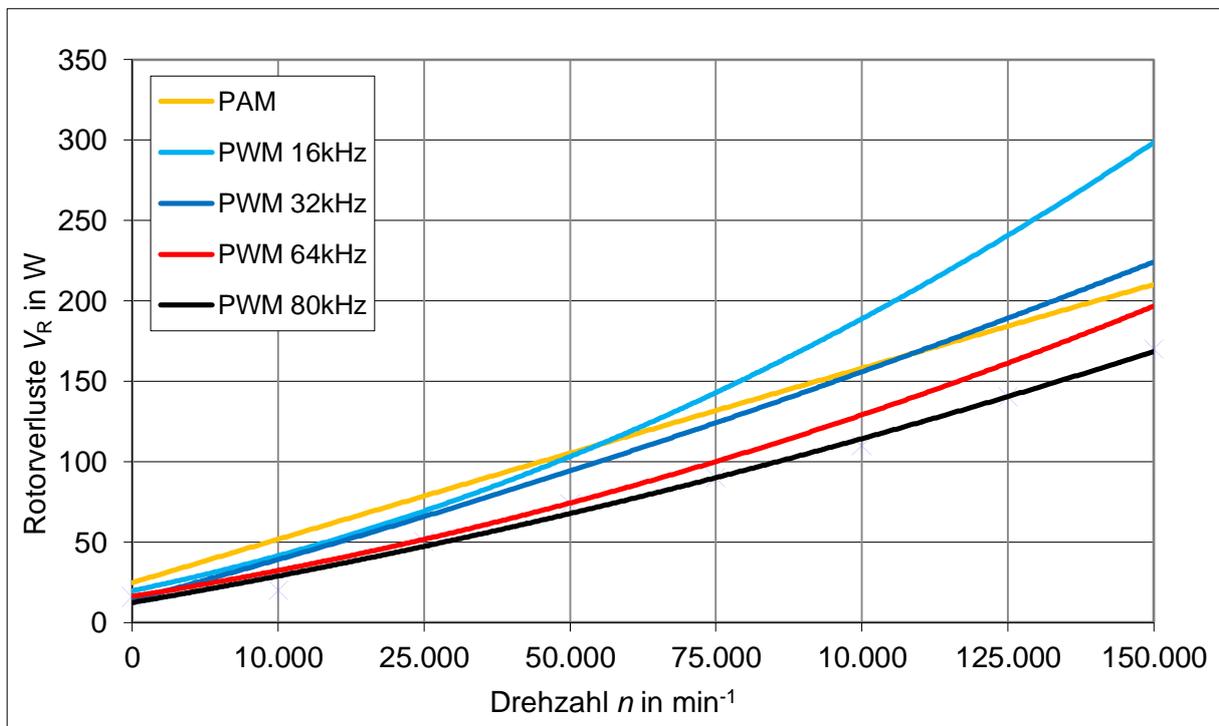


Abbildung 2.5: Rotorverluste in Abhängigkeit von der Drehzahl, der PAM und der Schaltfrequenz der PWM eines Frequenzumrichters

Es ist zu erkennen, dass sich mit steigender Schaltfrequenz der PWM des Frequenzumrichters die Rotorverluste einer PMSM reduzieren.

Aus wirtschaftlicher Sicht liegt nahe, ein Antriebssystem mit möglichst hoher Zwischenkreisspannung zu dimensionieren, weil hierbei die gewonnene Leistung mit geringeren Strömen und daher mit geringeren Stromwärmeverlusten erzielt werden kann. Ebenfalls kommen durch die hierbei geringere benötigte Stromtragfähigkeit auch kleinere Leiterquerschnitte zum Einsatz. Dies spart gerade bei den Zuleitungen zum einen Material und Kosten und zum anderen ergeben sich weniger Bauraum und Gewicht. Diesbezügliche Einsparungen stehen grundsätzlich immer im Fokus, insbesondere bei Antriebssystemen, die in der mobilen Traktion ihren Einsatz finden. Darüber hinaus ist weiterhin die Bestrebung schnelllaufende elektrische Antriebssysteme ohne Verwendung zusätzlicher Filter auszuführen, deren Aufgabe letztlich die Glättung der besagten Stromüberschwingungen wäre. Da ein wie auch immer ausgeführtes Filter eine zusätzliche Komponente darstellt, dementsprechend Bauraum benötigt und Gewicht für das Gesamtsystem bedeutet, ist es sinnvoll, diese Komponente nur bei tatsächlichem Bedarf zu integrieren.

Um Stromüberschwingungsspektren von getakteten Endstufen ohne Veränderung der Schaltfrequenz zu reduzieren, können 3-Punkt- bzw. Multilevel-Frequenzumrichter zum Einsatz kommen. Sie zeichnen sich im Gegensatz zu einem 2-Punkt-Frequenzumrichter durch eine bessere Nachbildung der gewünschten Ausgangsspannung aus und erzeugen daher einen glatteren Stromverlauf, so dass letztlich weniger Wirbelströme in elektrisch leitfähigen Gebieten des Rotors der PMSM auftreten werden. Ihr

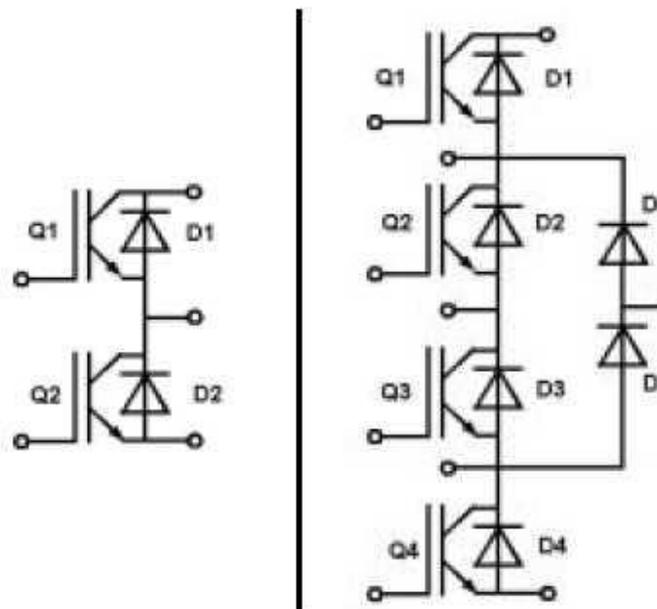


Abbildung 2.6: Schaltbild einer Phase eines 2-Punkt-Frequenzumrichters links und eines 3-Punkt-Frequenzumrichters rechts [7]

Aufbau sowie die Ansteuerung ist allerdings sehr komplex und erfordert eine intensive Komponentenauswahl, wodurch sich die Kosten generell steigern, sich aber die Zuverlässigkeit des Umrichters reduziert.

Abbildung 2.6 veranschaulicht in einem Schaltbild exemplarisch den höheren Bauteilbedarf zwischen einem 2-Punkt-Frequenzumrichter und einem 3-Punkt-Frequenzumrichter anhand einer Phase. Eine Prinzipskizze auf Ersatzschaltbildebene des allgemeinen Aufbaus eines dreiphasigen 3-Punkt-Frequenzumrichters verdeutlicht Abbildung 2.7. Dreiphasige 2-Punkt-Frequenzumrichter benötigen lediglich sechs Halbleitermodule mit notwendiger Freilaufdiode.

Abbildung 2.8 zeigt den Unterschied im Pulsmuster und der Ausgangsspannung zwischen 2-Punkt- und 3-Punkt-Frequenzumrichter.

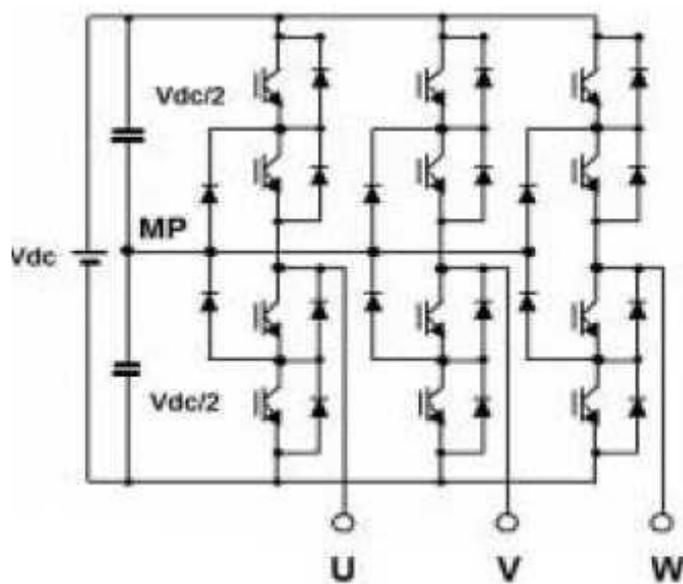


Abbildung 2.7: Prinzipskizze auf Ersatzschaltbildebene eines 3-Punkt-Frequenzumrichters [7]

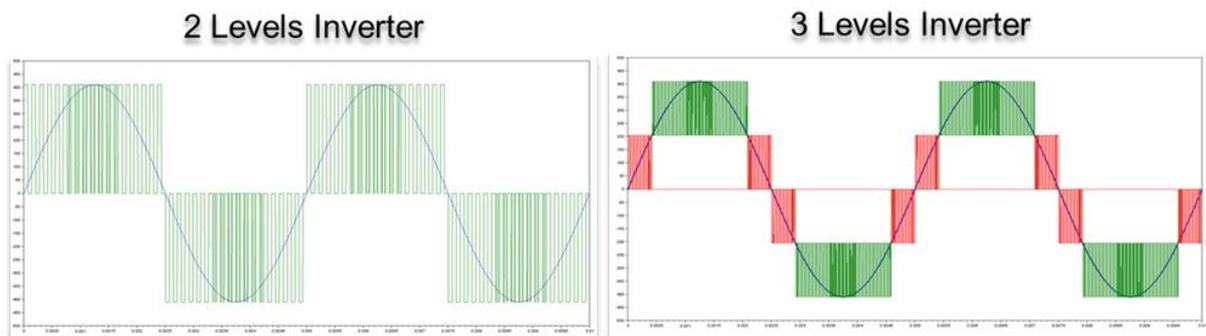


Abbildung 2.8: Unterschiede im Pulsmuster und der Ausgangsspannung zwischen 2-Punkt- und 3-Punkt-Frequenzumrichtern [7]

## 2.2 Reduzierung von Schaltverlusten innerhalb der Leistungshalbleiter

Um die Oberschwingungsanteile der Ströme bei hochdrehenden Applikationen mithilfe der Schaltfrequenzerhöhung möglichst gering zu halten, folgen für die Bauteile des Frequenzumrichters höhere Anforderungen. Innerhalb der Leistungselektronik entstehen Durchlassverluste beim Schalten der Leistungshalbleiter. Diese Verluste hängen maßgeblich mit der Schaltfrequenz der Halbleitermodule zusammen.

Derzeitige Halbleiterelemente auf Silizium-Materialbasis (Si) können Schaltfrequenzen von bis zu  $f_s = 40$  kHz erreichen, nehmen jedoch einen größeren Bauraum in Anspruch, der notwendig ist, um eine ausreichende Kühlung zu erzielen.

Um hinreichend geringe Rotorverluste im Vergleich zu alternativen Modulationsverfahren wie z.B. Puls-Amplituden-Modulation (PAM) erzielen zu können, sind Schaltfrequenzen einer Puls-Weiten-Modulation (PWM) größer 60 kHz anzustreben. Ausführungen mit neuartigen Silizium-Carbid-Halbleitermodulen (SiC) besitzen den Vorteil, Schaltfrequenzen der Frequenzumrichter deutlich zu steigern und somit die Ausgangsströme für die PMSM ausreichend zu glätten, um die Rotorverluste zu verringern. Trotz erhöhter Schaltfrequenz benötigen die SiC-Halbleitermodule jedoch einen identischen Bauraum wie Si-Halbleitermodule. Damit folgt eine höhere Leistungsdichte der Elektronik und damit auch für das Gesamtsystem.

Die folgende Abbildung 2.9 zeigt den dauerhaft möglichen Strom eines Frequenzumrichters in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz im Vergleich

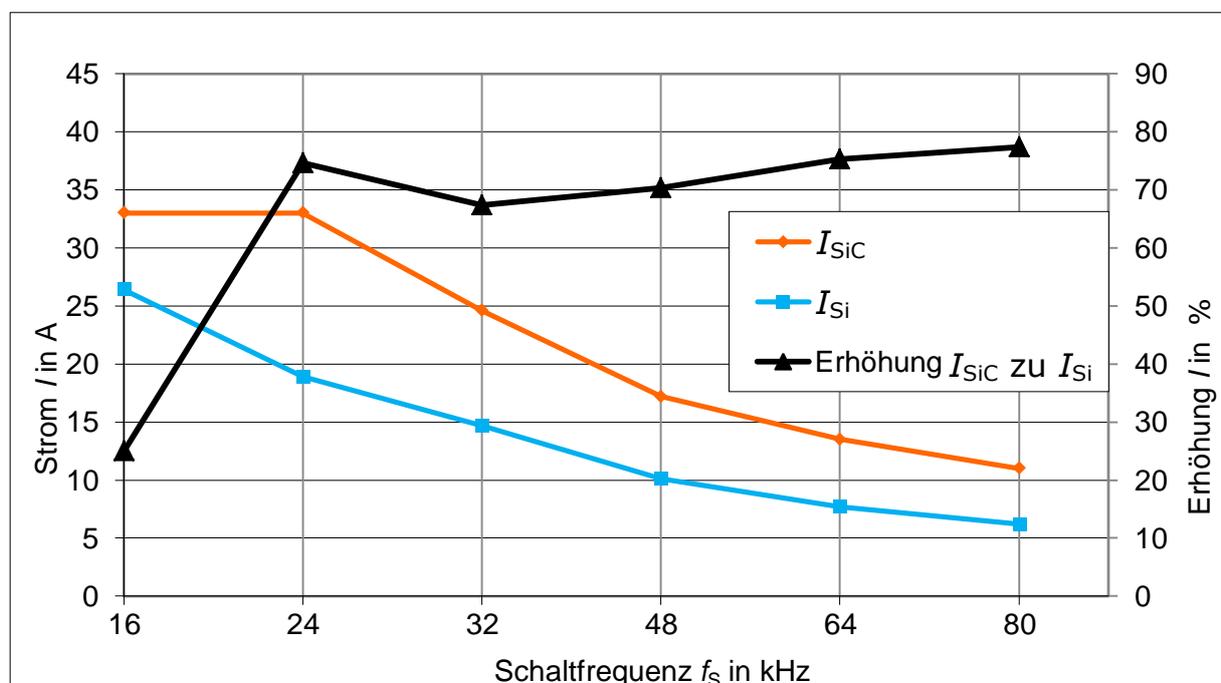


Abbildung 2.9: Ströme der zwei verschiedenen Halbleitermodule in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz  $f_s$

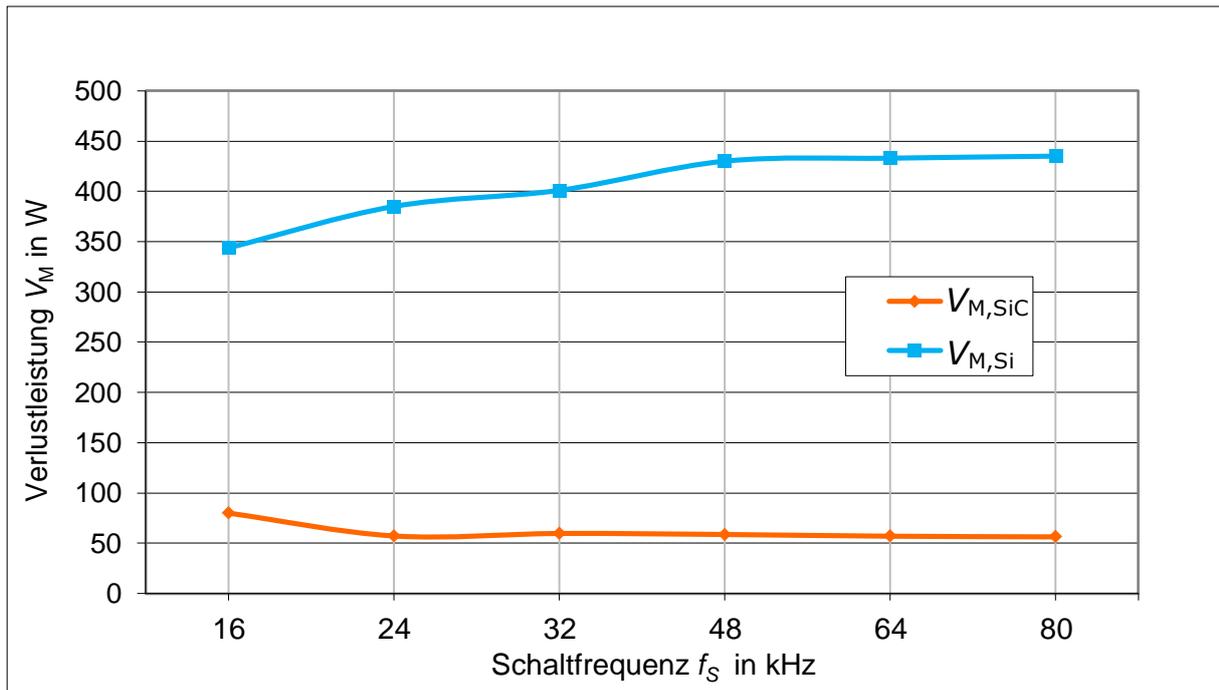


Abbildung 2.10: Verlustleistung  $V_M$  der zwei verschiedenen Halbleitermodule (SiC und Si) bei gleichem Modulstrom in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz  $f_S$

zwischen Si- und SiC-Halbleitermodulen. Beide Module benötigen den gleichen Bauraum und sind für eine Spannungslage von 800 V und 65 °C Umgebungstemperatur dimensioniert.

Die Verlustleistung  $V_M$  im Vergleich von beiden Halbleitermodulen veranschaulicht die Abbildung 2.10 bei gleichen oben genannten Randbedingungen. Die Diagramme verdeutlichen, dass im Allgemeinen bei SiC-Halbleitermodulen bei gleicher Schaltfrequenz weniger Gesamtverluste als bei Si-Halbleitermodulen auftreten und damit eine höhere Ausgangstrombelastbarkeit im gleichen Bauraum erreicht wird. Sie können darüber hinaus auch für höhere Schaltfrequenzen eingesetzt werden.

### 2.3 Reduzierung von Verlusten der schnelllaufenden permanentmagneterregten Synchronmaschine

Generell bestehen zwei Verlustarten im Stator einer PMSM, welche als Stromwärmeverluste und Ummagnetisierungsverluste definiert sind. Stromwärmeverluste ergeben sich aus dem Stromfluss durch die widerstandsbehaftete Wicklung des Stators. Die Ummagnetisierungsverluste bestehen aus Eisenverlusten und Hystereseverlusten innerhalb des Stators einer PMSM, weil in diesem Bereich ein zeit- und amplitudenveränderliches Magnetfeld aufgrund des eingprägten Stromes in der Wicklung resultiert. Dementsprechend ist es üblich, in elektrischen Drehfeldmaschinen den Stator aus aneinander gefügten Elektroblechen aufzubauen, um die Um-

magnetisierungsverluste auf ein Minimum zu reduzieren [3]. Gerade bei schnelllaufenden PMSM im Bereich von über  $60.000 \text{ min}^{-1}$  werden niederpolige Motorvarianten eingesetzt, um die Grundfrequenz  $f_1$  der PMSM und den damit verbundenen Ummagnetisierungsverlusten im Stator gering zu halten. Prinzipbedingt bildet bei elektrischen Maschinen mit Polpaarzahl  $p = 1$  die Welle einen Teil des magnetischen Rückschlusses. Aufgrund der unter Abschnitt 2.1 beschriebenen Stromüberschwingungen, die zu Induktionsswellen auf dem Rotor führen, werden in dort befindlichen elektrisch leitfähigen Gebieten, wie z.B. Permanentmagneten oder der Welle, Spannungen induziert, welche sich zu Wirbelströmen kurzschließen, die zur Erwärmung des gesamten Rotors führen. Additiv dazu kommen Erwärmungen durch Wirbelströme resultierend aus Induktionsoberwellen, die durch die Wicklungsverteilung im Stator hervorgerufen werden. Nach [4] ergeben sich bei symmetrisch gespeister Wicklung nur Durchflutungswellen, deren vorzeichenbehaftete Feldwellenparameter  $\tilde{v}'$  folgenden Zusammenhang besitzen:

$$\tilde{v}' = p \cdot (1 + 2m_1 g) \quad \text{mit } g = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3 \dots g \in \mathbb{Z} \quad \text{Gl. 2.2}$$

In dieser Gleichung bilden  $p$  die Polpaarzahl und  $m_1$  die Strangzahl der Wicklung. Es folgen vorzeichenbehaftete magnetische Durchflutungswellen  $-5p, 7p, -11p, 13p$ , usw. [5]. Diese lassen sich nicht gänzlich auslöschen, weil sie durch das Prinzip von in Nuten eingelegten symmetrischen Wicklungssystemen bedingt werden. Durch eine geeignete Sehnung der Wicklung lassen sich die Amplituden dieser Wicklungsoberwellen reduzieren, bleiben jedoch generell erhalten. Diese besagten Induktionsoberwellen verursachen in elektrisch leitfähigen Gebieten des Rotors induzierte Spannungen, die sich ebenfalls zu Wirbelströmen kurzschließen. Zu diesen Gebieten zählen erneut Permanentmagnete und die Welle, aber auch der Magnetträger. Um Verluste auf dem Rotor zu reduzieren, können Permanentmagnete in axialer Richtung segmentiert werden, und der Magnetträger geblecht ausgeführt werden. Eine Vielzahl der Rotoren von schnelllaufenden PMSM werden mit einem Magnetträger aus Stahl auf der Welle aufgebaut, auf den halbschalenförmige Magnete geklebt werden. Wie in [1] beschrieben, können in einem derartigen Magnetträger Wirbelströme entstehen, welche die Permanentmagnete schlimmstenfalls bis zur Entmagnetisierung erwärmen. Um die Magnete gegen ein Ablösen durch die Fliehkraft zu sichern, finden Armierungen aus Kohlefaser eine Verwendung. Die Rotorwelle bei schnelllaufenden PMSM muss im Allgemeinen als Vollmaterial bestehen bleiben, um eine ausreichende Festigkeit zu gewährleisten.

Bei der Dimensionierung eines geblechten Magnetträgers ist zwingend auf die Einhaltung der notwendigen Festigkeit bei hohen Drehzahlen und der elektromagnetischen Verhältnisse zur Erreichung des geforderten Drehmoments und der spezifizierten mechanischen Leistung zu achten.

### **3 Entwicklung einer permanentmagneterregten Synchronmaschine für einen elektrisch unterstützten Abgasturbolader**

Innerhalb eines Entwicklungsprojekts wurden bei WITTENSTEIN cyber motor Stator und Rotor einer PMSM entwickelt, um diese Komponenten in einen eigens dafür dimensionierten Abgasturbolader zwischen der Lagerung des Läufers zu integrieren. Dabei bestand die Einigung, als Schnittstelle die Welle des Abgasturboladers zu dem Rotor der PMSM zu definieren. Der Stator der PMSM wurde mit spezifizierten Schnittstellen in das Gehäuse des Abgasturboladers mit einer Flüssigkeitskühlung eingebunden. In diesem Kapitel sind drei wesentliche Aspekte bei der Entwicklung des Rotors der PMSM herausgestellt.

#### **3.1 Entwicklung eines geblechten Magnetträgers mit vergrabenen Magneten**

Die Entwicklung wurde in Richtung eines geblechten Magnetträgers mit vergrabenen Magneten für den Rotor der PMSM angestoßen. Die Anforderung hinsichtlich der maximalen Drehzahl und des gewünschten Drehmoments wurde im Voraus definiert. Bei der Entwicklung standen zwei wichtige Punkte in Bezug auf das mechanische Design des geblechten Magnetträgers im Fokus.

1. Es musste ein Material ausgesucht werden, das eine ausreichende Festigkeit aufweist, um bei der maximalen Drehzahl den angreifenden Fliehkräften standzuhalten.
2. Das mechanische Design des Magnetträgers in Verbindung mit dem ausgewählten Material muss zudem optimale elektromagnetische Randbedingungen erfüllen, damit das definierte Drehmoment und die mechanische Leistung realisiert werden können.

Um den Rotor in Bezug auf die zwei obigen Punkte zu optimieren, wurde die Finite-Elemente-Methode für die mechanische und die elektromagnetische Berechnung verwendet. Dementsprechend waren Iterationsschleifen zwischen mechanischer Festigkeit und elektromagnetischen Verhältnissen notwendig, um die optimale Konfiguration von beiden Elementen zu finden. Bei maximalen Drehzahlen ist je nach Durchmesser des Rotors darauf zu achten, dass die mechanischen Spannungen im Blechpaket aufgrund der Fliehkraft nicht zu groß werden. Daraus könnte letztlich ein Reißen, Aufstellen und/oder Aufplatzen der Bleche verursacht werden. Dies führt zwangsläufig zu einer Unwucht des Rotors und somit im Betrieb zum Ausfall des gesamten elektrisch unterstützten Abgasturboladers.

Abbildung 3.1 zeigt hierbei einen Auszug aus den notwendigen Iterationsschleifen zwischen mechanischer Festigkeit und elektromagnetischer Berechnung.

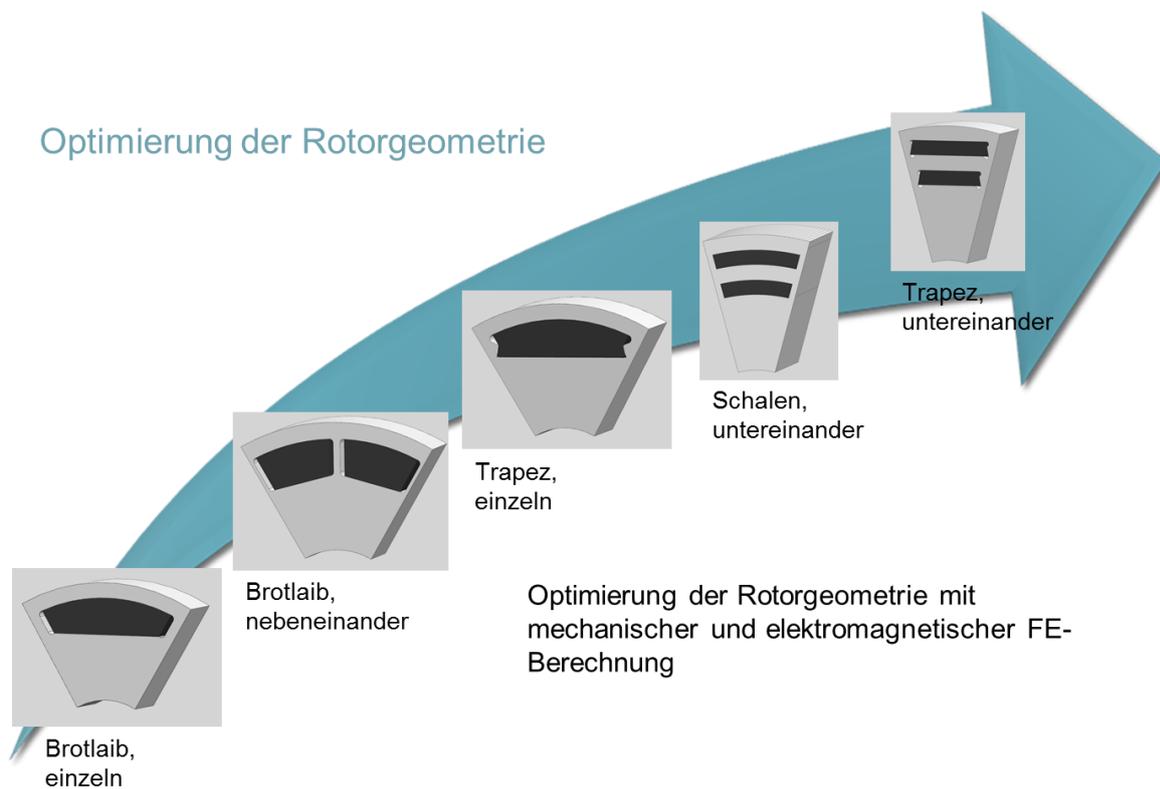


Abbildung 3.1: Iterationsschleifen zur Optimierung der Rotorgeometrie der PMSM mithilfe von mechanischen und elektromagnetischen FE-Berechnungen

Den durchgeführten Berechnungen zu Folge ergibt sich, dass herkömmliche Elektrobleche, wie z.B. M270-35A oder NO20, von den elektromagnetischen Eigenschaften zwar geeignet sind, um im vorgegebenen Bauraum das spezifizierte Drehmoment und annehmbare Ummagnetisierungsverluste zu erreichen. Jedoch genügen die Grenzwerte der mechanischen Spannungen dieser Elektrobleche nicht den Anforderungen, die sich mithilfe der FE-Simulationen bei maximalen Drehzahlen ergeben. Daher wurden in die FE-Berechnungen Elektroblechmaterialien aufgenommen, deren Grenzwerte deutlich oberhalb von herkömmlichen Elektroblechen liegen und somit den mechanischen Spannungen bei maximalen Drehzahlen und zusätzlichen Sicherheiten genügen. Es fiel die Wahl auf ein spezielles Elektroblech, das nahezu doppelte mechanische Festigkeiten im Vergleich zu M270-35A besitzt und trotzdem hinreichende elektromagnetische Eigenschaften besitzt, um ausreichend magnetischen Fluss zu führen.

Des Weiteren musste innerhalb der Iterationsschleifen ein mit dem Verdichter- und Turbinenrad in optimale Beziehung gebrachtes Massenträgheitsmoment des Rotors realisiert werden, damit ein Feinwuchten der gesamten Läuferbaugruppe bestehend aus Welle, Verdichterrad, Turbinenrad und E-Maschinenrotor möglich bleibt. Bei deutlichen Unterschieden in den Massenträgheitsmomenten der genannten Komponenten wäre ein einwandfreier Betrieb des elektrisch unterstützten Abgasturboladers nicht zu realisieren.

### **3.2 Schnittstelle Welle des Abgasturboladers zu E-Maschinenrotor**

Voraussetzung innerhalb des Entwicklungsprojekts war, dass der Rotor der PMSM auf der Welle des Abgasturboladers zwischen der Lagerung der Welle montiert und auch demontiert werden kann. Dies ermöglicht das Feinwuchten des Läufers bestehend aus Dummy-Welle, Turbinenrad, Verdichterrad und E-Maschinenrotor mit einer vorläufigen Lagerung außerhalb des Gesamtsystems. Im Anschluss lässt sich das Gesamtsystem aufbauen, wobei die endgültige Lagerung des Läufers und Welle zum Einsatz kommen und vor dem Montieren der Verdichter- und Turbinenradgehäuse ein letztes Feinwuchten eben dieser Räder bei Bedarf erfolgen kann.

Um die Montage und Demontage zu gewährleisten, wurde das Blechpaket auf einer sogenannten Rotorhülse fixiert, damit sich im letzten Bearbeitungsschritt des Rotors definierte Toleranzen an der Bohrung der Rotorhülse realisieren lassen. Ein zusätzliches Härten der Rotorhülse wurde gewählt, um ein Fügen des Rotors auf die Welle ohne Beschädigungen an den Komponenten zu ermöglichen. Die Toleranzen liegen im Bereich von wenigen Mikrometern hinsichtlich Innendurchmesser, Parallelität und Konzentrität.

Mithilfe dieser engen Toleranzen ließ sich nachweisen, dass eine Montage und Demontage des E-Maschinenrotors auf der Welle des Abgasturboladers reproduzierbar bei gepaartem Rotoren und Wellen möglich ist.

### **3.3 Wahl des Luftspalts zwischen Rotor und Stator der PMSM**

Bei der Dimensionierung von PMSM für spezielle Applikationen kommt der Größe des Luftspalts zwischen Stator und Rotor eine entscheidende Bedeutung zu. Im Allgemeinen wird versucht diesen in Abhängigkeit von z.B. Baulänge, Rotordurchmesser, maximaler Drehzahl, biegekritischen Drehzahlen, Lagerungswahl, Lagerungsposition und statischen und/oder dynamischen Exzentrizitäten relativ gering zu gestalten. Einseitige Luftspaltgrößen sind in Baugrößen bis 100 mm Außendurchmesser des Blechpakets bei 0,2 bis 0,6 Millimetern keine Seltenheit.

Gerade bei schnelllaufenden Applikationen und damit verbundenen kleinen Rotoraußendurchmessern bis z.B. 20 mm spielt ein geeignetes Lagerungskonzept eine wichtige Rolle, um Exzentrizitäten oder Schiefstellungen des Rotors in gewissen Toleranzen aufzufangen. Vom Lagerungskonzept hängt auch ab, wie gering der Luftspalt der PMSM ausgeführt werden kann. Mit einem geringen Luftspalt verkleinert sich der Theorie nach der magnetische Widerstand des magnetischen Kreises der PMSM, was zu einer Drehmoment- und Leistungssteigerung führt. Jedoch sind die Auswirkungen einer Luftspaltverringern bei PMSM nicht in dem Maße drehmoment- und leistungssteigernd wie bei Asynchronmaschinen, die sich hier wesentlich stärker beeinflussen lassen. Dementsprechend sind im Allge-

meinen Steigerungen durch Luftspaltverringerungen bis auf ein Minimum je nach Aufbau bis ca. 10 % realistisch.

Leider bringt eine derartige Maßnahme gerade bei schnelllaufenden zwei-poligen PMSM nicht ausschließlich Vorteile mit sich. Wird der Luftspalt verringert, bildet sich zum einen aufgrund des kleineren magnetischen Widerstands ein größerer Hauptfluss des gesamten magnetischen Flusses in der Maschine aus, der die Hauptkomponente des resultierenden Drehmoments bildet. Zum anderen können auch Flusskomponenten aus harmonischen Induktionswellen größer werden, die parasitäre Verluste in Form von Wirbelströmen erzeugen. Bei Betrachtung von Magnetfeldlinien können sich diejenigen, die sich bei einem größeren Luftspalt über die Nut (Nutstreuung) oder über zwei Zahnköpfe (Zahnkopfstreuung) des Stators schließen, bei einem kleineren Luftspalt über den Rotor schließen. Zweitgenannte Variante kann zu Rotorverlusten führen, die gerade bei hohen Drehzahlen in den Vordergrund treten.

Somit kann es bei geringen Luftspaltgrößen bei niedrigeren Drehzahlen zu einem Drehmomentgewinn gegenüber einem größeren Luftspalt kommen. Jedoch kann die geringe Größe des Luftspalts bei hohen bis maximalen Drehzahlen zu zusätzlichen Verlusten führen, die den gesamten Läufer des elektrisch unterstützten Abgasturboladers stark erwärmen und das maximale Drehmoment und die maximale Leistung deutlich reduzieren. Hier ist die Gesamtsystembetrachtung notwendig, um unter anderem den Abgasturbolader mit Lagerungskonzept, die biegekritischen Drehzahlen, das Design der PMSM, die Regelungsstrategie, die Schaltfrequenz und das Modulationsverfahren des Frequenzumrichters zu berücksichtigen.

## **4 Ergebnis auf dem Prüfstand von Verbrennungsmotor mit elektrisch unterstützten Abgasturboladern**

Nachdem eine den Anforderungen gerecht werdende Variante mit numerischen Berechnungen identifiziert worden war, wurden Muster aufgebaut und diese hinsichtlich der maximalen Drehzahl geprüft. Die Muster bestanden den Test, so dass Gesamtsysteme von elektrisch unterstützten Abgasturboladern aufgebaut werden konnten. Nach einem erfolgreichen Ausgangstest jedes elektrisch unterstützten Abgasturboladers, standen Untersuchungen zum Verhalten des Verbrennungsmotors mit aktiven und inaktiven elektrisch unterstützten Abgasturboladern im Fokus des Entwicklungsprojekts.

Abbildung 4.1 zeigt eine durchgeführte Testprozedur. Dabei wurde eine definierte Verbrennungsmotordrehzahl eingestellt, bei der die motorspezifische Vollast auch rein thermodynamisch im stationären Betrieb erreicht wird. Es folgte ein Lastsprung aus einem unteren Teillastbereich in die Vollast des Verbrennungsmotors, bei dem die Zeitdauer zum Erreichen des maximalen Drehmoments aufgezeichnet wurde.

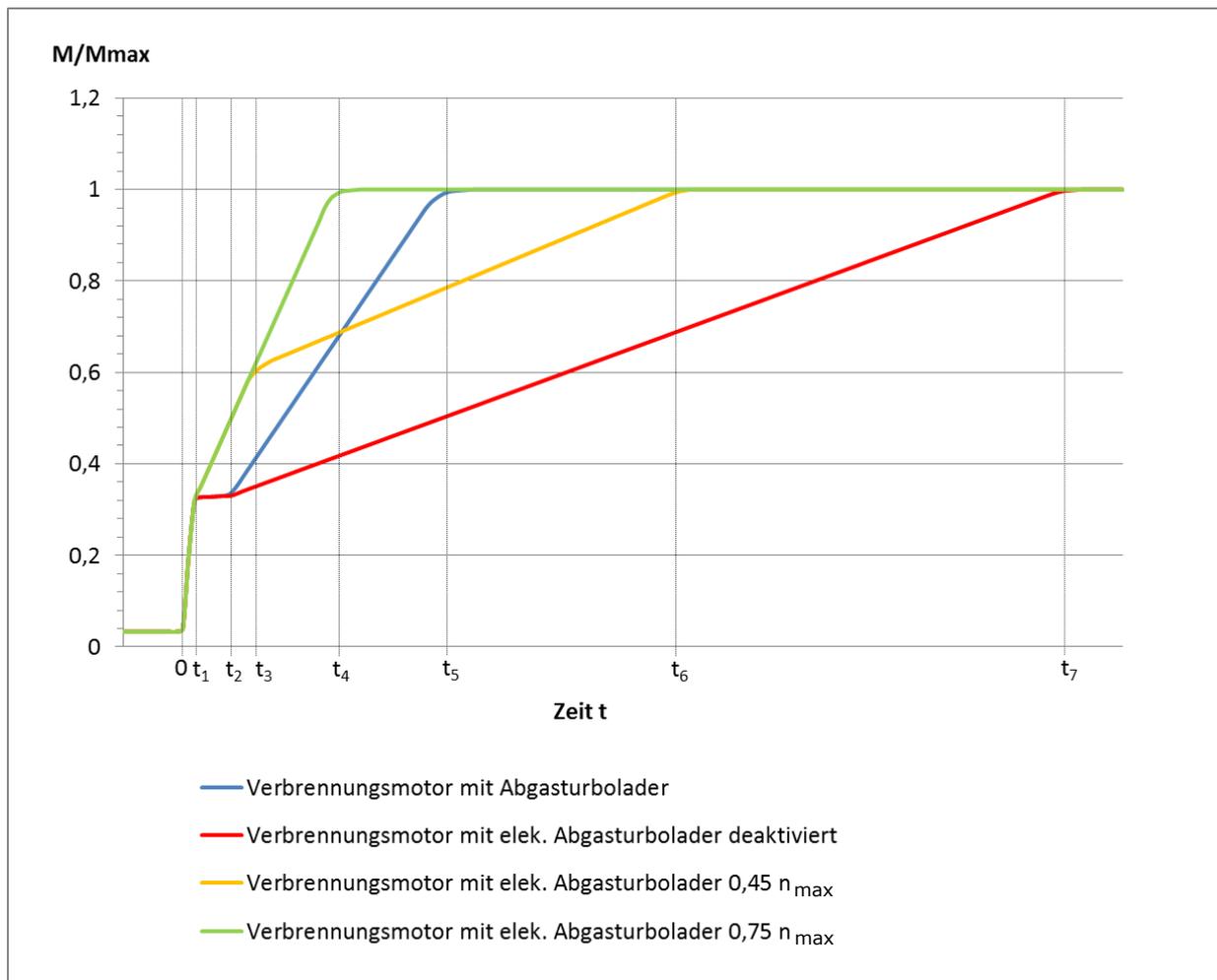


Abbildung 4.1: Lastsprünge von Verbrennungsmotoren mit konventionellen ATL und EATL

Abbildung 4.1 beinhaltet vier geglättete Drehmomentsprünge von zwei identischen Verbrennungsmotoren mit charakteristischen Eckpunkten. Obwohl die Zeit- und Drehmomentachse normiert wurden und keine Zahlenwerte niedergeschrieben sind, kann der Abbildung ein interessanter Zusammenhang zwischen den beiden Varianten entnommen werden.

Ein Verbrennungsmotor war mit konventionellen Abgasturboladern, siehe blauer Drehmomentverlauf, und der andere mit elektrisch unterstützten Abgasturboladern, siehe roter, orangefarbener und grüner Drehmomentverlauf, ausgestattet.

Es ist ersichtlich, dass der Verbrennungsmotor mit Abgasturbolader nach dem Erreichen der Saugervolllast ( $t_1$ ) in ein „Turboloch“ fällt, welches erst ab  $t_2$  einem nahezu linearen Anstieg bis zum maximalen Drehmoment folgt, das bei  $t_5$  erreicht ist. Die rote Kennlinie verdeutlicht den Verbrennungsmotor mit elektrisch unterstützten Abgasturboladern, wenn diese deaktiviert sind. Aufgrund des zusätzlichen Massenträgheitsmoments des Rotors der PMSM benötigt der somit nur noch als konventioneller Abgasturbolader wirkende elektrisch unterstützte Abgasturbolader deutlich län-

ger ( $t_7$ ), um den Drehmomentsprung zu realisieren. Die Steigung bis zum maximalen Drehmoment ist erkennbar geringer als die des Verbrennungsmotors mit konventionellem Abgasturbolader.

Wird der elektrisch unterstützte Abgasturbolader mit der integrierten PMSM auf  $0,45 \cdot n_{\max}$  beschleunigt, ist eine größere Steigung des Drehmomentanstiegs im Diagramm bei der orangefarbenen Kennlinie zu verzeichnen. Das vorher identifizierte „Turboloch“ ist gänzlich nicht mehr zu detektieren. Bei Zeitpunkt  $t_3$ , an dem die E-Maschine ab  $0,45 \cdot n_{\max}$  keinen Beitrag mehr liefert, ist zu erkennen, wie die Steigung des Drehmomentverlaufs den Wert bei deaktivierter PMSM annimmt und im Anschluss nahezu parallel bis auf das maximale Drehmoment hochläuft ( $t_6$ ). Gerade das Ausbleiben des Turbolochs und die anfängliche Steigung des Drehmomentsprungs veranschaulicht den deutlichen Mehrwert des elektrisch unterstützten Abgasturboladers gegenüber dem konventionellen Abgasturbolader.

Die grüne Kennlinie veranschaulicht den Drehmomentsprung des Verbrennungsmotors mit elektrisch unterstütztem Abgasturbolader, wenn die PMSM den Rotor bis auf  $0,75 \cdot n_{\max}$  beschleunigt. Erneut ist zu erkennen, dass das „Turboloch“ nicht auftritt und die Steigung des Drehmomentsprungs gleich gegenüber der orangefarbenen Kennlinie erscheint. Jedoch bleibt das Abknicken der grünen gegenüber der orangefarbenen Kennlinie bei  $t_3$  aus, so dass die Steigung bis zum Erreichen des maximalen Drehmoments bei  $t_4$  gleich bleibt. Die Zeitdauer von 0 bis zu  $t_4$  ist deutlich kürzer als bei dem Verbrennungsmotor mit herkömmlichen Abgasturboladern, der bei  $t_5$  den Lastsprung vollendet hat. Das bedeutet aus anderer Sicht, dass der Verbrennungsmotor mit konventionellem Abgasturbolader erst ca.  $0,6 \cdot M_{\max}$  erreicht hat, wenn der Verbrennungsmotor mit elektrisch unterstütztem Abgasturbolader bereits  $M_{\max}$  vorweisen kann.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit den Optimierungsmöglichkeiten von elektrischen Komponenten bei elektrisch unterstützten Abgasturboladern.

Kapitel 2 beschreibt die Reduzierung von drei möglichen Verlustarten bei den elektrischen Komponenten bestehend aus permanentmagneterregter Synchronmaschine und Frequenzumrichter, die vor allem im System zu betrachten sind.

Effekte aus Stromüberschwingungen innerhalb der E-Maschine, die zu Erwärmungen des gesamten Läufers des Abgasturboladers führen können, lassen sich durch die Erhöhung der Schaltfrequenz des Frequenzumrichters reduzieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, das Stromspektrum maßgeblich zu reduzieren, in dem 3-Punkt- oder Multilevelfrequenzumrichter eingesetzt werden. Jedoch ist bei diesen Frequenzumrichtern ein höherer Bedarf an Bauteilen notwendig, der die Kosten erhöht und die Ausfallsicherheit verringert.

Durch höhere Schaltfrequenzen des Frequenzumrichters steigen die Schaltverluste innerhalb der Leistungsmodule der gesamten Elektronik an. Werden Leistungsmodule aus Silizium-Carbid verwendet, treten bei gleichen Strömen, Schaltfrequenzen und Kühltemperaturen deutlich geringere Verluste in dem Frequenzumrichter auf, als bei herkömmlichen Leistungsmodulen aus Silizium.

Um Rotorverluste einer schnelllaufenden E-Maschine zu verringern, besteht die Möglichkeit, den Rotor größtenteils aus Elektroblech aufzubauen und auf Magnetträger aus Vollmaterial zu verzichten. Auf diese Weise entstehen in dem Magnetträger weniger Ummagnetisierungsverluste, die letztlich zu einer Erwärmung des gesamten Läufers des Abgasturboladers führen. Hierbei ist wichtig, die mechanischen Festigkeiten des Elektroblechs zu beachten und das Design derart zu gestalten, dass der Rotor den angreifenden Fliehkräften bei den maximalen Drehzahlen Stand hält.

Kapitel 3 zeigt drei wichtige Aspekte auf, die bei der Entwicklung eines schnelllaufenden Rotors zur Integration in einen Abgasturbolader zu beachten sind.

Bei der Dimensionierung dieses Rotors ist eine Iteration von mechanischer Festigkeit gegenüber elektromagnetischen Verhältnissen durchzuführen, um eine optimierte Variante zu entwickeln. Diese Variante muss zum einen eine hinreichende Festigkeit aufweisen und zum anderen elektromagnetisch geeignet sein, um das geforderte maximale Drehmoment und die mechanische Leistung zu realisieren. Es zeigte sich, dass Finite-Elemente-Simulationen hier für beide Anforderungen zum Ziel führen können.

Um eine Montage und Demontage des Rotors der E-Maschine auf der Welle des Abgasturboladers für eventuelles mehrmaliges Feinwuchten beim Montageprozess zu ermöglichen, wurden sehr enge Toleranzen zwischen Rotor und Welle gewählt. Eine spezielle Konstruktion des Rotors konnte hierbei die Anforderungen an die Montage, die Demontage und die Genauigkeit erfüllen.

Die Vor- und Nachteile bei der Wahl der Luftspaltgröße zwischen Stator und Rotor der E-Maschine ist ebenfalls innerhalb dieses Kapitels dargestellt. Hierbei ist entscheidend, das Gesamtsystem zu betrachten, um unter anderem den Abgasturbolader mit Lagerungskonzept, die biegekritischen Drehzahlen, das Design der PMSM, die Regelungsstrategie, die Schaltfrequenz und das Modulationsverfahren des Frequenzumrichters zu berücksichtigen.

Kapitel 4 veranschaulicht mithilfe einer Abbildung das Verhalten von zwei identischen Verbrennungsmotoren mit herkömmlichen und mit elektrisch unterstützten Abgasturbolader. Bei dem Verbrennungsmotor mit herkömmlichen Abgasturbolader ist ein „Turboloch“ nach der Saugervolllast zu erkennen. Bei dem Verbrennungsmotor mit elektrisch unterstützten Abgasturbolader verzeichnet sich ab der Saugervolllast ein bis zur maximalen Drehzahl nahezu stetig steigender Drehmomentverlauf. Dieser halbiert die Zeitdauer zur Erreichung des maximalen Drehmoments im Gegensatz zum herkömmlichen Abgasturbolader. Auf diese Weise konnte

messtechnisch ein deutlicher Mehrwert des elektrisch unterstützten Abgasturboladers nachgewiesen werden.

Als Ausblick sind weiterführende Messungen hinsichtlich der elektrischen Komponenten seitens WITTENSTEIN auf einem eigens dafür konzipierten Prüfstand angedacht.

Zum einen sind detaillierte Versuche hinsichtlich der optimalen Schaltfrequenz des Frequenzumrichters im Vergleich zu den Rotorverlusten der E-Maschine vorgesehen. Es kann in Abhängigkeit von der induzierten Spannung gemessen werden, bei welchen Drehzahlen und Strömen der Rotor die höchsten Temperaturen erfährt. Hierbei ist zu bewerten, welche Rortemperaturen letztlich auch negative Auswirkungen auf den Läufer des Abgasturboladers haben könnten.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Schaltfrequenzen während des Betriebs des Antriebssystems für unterschiedliche Betriebspunkte derart anzupassen, dass bewusst Verluste zwischen dem Frequenzumrichter und der E-Maschine hin- und hergeschoben werden. Je nachdem welche Komponente die Verlustwärme in definierten Betriebspunkten besser abführen kann, wird dementsprechend diese stärker belastet.

Der Beitrag verdeutlicht, dass die elektrische Antriebstechnologie bereits einen Entwicklungsstand erreicht hat, der eine Integration in Turboladersysteme von High-Performance-Fahrzeuganwendungen ermöglicht. Besonders die Integration der Elektromaschine in die Mittelgruppe und die verhältnismäßig hohen Spannungslagen von 400 V bzw. 800 V Zwischenkreisspannung sind für Sportwagen- und Supersportwagenapplikationen zielführend. Die Technologie des elektrisch unterstützten Abgasturboladers in hoher Spannungslage ist reif für einen Übergang aus dem Rennsport in erste High-Performance-Kleinserien.

Der Beitrag identifiziert zugleich auch Potentialfelder innerhalb der elektrischen Antriebstechnologie, die aus Sicht von WITTENSTEIN im Fokus stehen, um zukünftig das Gewicht der elektrischen Komponenten weiter zu reduzieren und die Leistungsfähigkeit zu steigern.

Die effiziente und umfangreiche technische Kooperation der Branchen „Strömungsmaschinen“ und „elektrische Antriebstechnik“ ist in diesem Zusammenhang entscheidend. WITTENSTEIN steht deshalb der Turboladerbranche gerne für einen tiefgehenden technologischen Austausch zur Seite, um die Entwicklungsziele zu erreichen und die Technologie wirtschaftlich in Serie zu überführen.

## 6 Literaturverzeichnis

- K.-H. Dempewolf, T. Getschmann, V. A. Ganesan, A. Mertens und B. Ponick, „Transiente Simulation eines Antriebssystems zur Bestimmung der frequenzabhängigen Verluste in schnelllaufenden permanentmagneterregten Synchronmaschinen,“ *Internationaler ETG-Kongress*, pp. 261-268, 2007.
- [1] G. Müller und B. Ponick, Theorie elektrischer Maschinen. 6. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- [2] G. Müller und B. Ponick, Grundlagen elektrischer Maschinen, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [3] G. Müller, K. Vogt und B. Ponick, Berechnung elektrischer Maschinen. 6. Auflage, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & CO. KGaA, 2008.
- [4] H. O. Seinsch, Oberfelderscheinungen in Drehfeldmaschinen, Stuttgart: B. G. Teubner, 1992.
- [5] „QDESYS S/W for Embedded Systems,“ [Online]. Available: <http://www.qdesys.com/3-level-inverter.php>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [6] M. Di Lella und R. Ramin, „PowerGuru – Power Electronics Information Portal,“ [Online]. Available: <http://www.powerguru.org/igbts-for-3-level-inverters/>. [Zugriff am 8. August 2016].
- [7]