

Entwicklung einer passiven Motornachbildung zur Prüfung von Antriebssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen

Sebastian Jeschke M.Sc., Prof.Dr.-Ing. Holger Hirsch, Sergii Tsiapenko
M.Sc., Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl Energietransport und Speicherung

Dr.-Ing. Johann Heyen, Dr.-Ing. Martin Obholz , Volkswagen AG

Dipl.-Ing Jörg Bärenfänger, Dipl.-Ing Marc Maarleveld, EMC Test NRW GmbH

1. Einleitung

Die zunehmende Integration von leitungselektronischen Komponenten in Elektro- und Hybridfahrzeugen hat einen großen Einfluss auf die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) im Fahrzeugbereich. Die elektrischen Antriebssysteme mit Leistungen im 100kW-Bereich werden aus Gründen der Energieeffizienz bei aktuellen Fahrzeugen mit Lithium-Ionen Batterien mit hohen Gleichspannungen [1] betrieben. Der Antriebsumrichter erzeugt an seinen Ausgangsklemmen ein frequenzvariables gepulstes Drehstromsystem, mit dem entweder ein Asynchronmotor oder ein permanent erregter Synchronmotor betrieben wird. Um den Wirkungsgrad des Antriebssystems weiter zu steigern, werden im Antriebsumrichter möglichst schnell schaltende IGBTs [2] eingesetzt. Allerdings verursachen diese schnellen Schalthandlungen im Umrichter breitbandige Störaussendungen, die in andere Teile des Bordnetzes überkoppeln können. Im Vergleich zur klassischen Fahrzeug-EMV, die das 12V Bordnetz beinhaltet, sind die im Antriebsbordnetz entstehenden Störaussendungen wesentlich höher.

Um diesen neuen Gegebenheiten zu begegnen, werden aktuell alle EMV Standards im Fahrzeugbereich um die neuen Antriebsstrangkomponenten ergänzt. Bezüglich des Antriebsstrangs werden in der aktuellen Version der CISPR 25 [3] Komponententests mit dem Antriebssystem beschrieben. Hierbei wird der Umrichter, der im Wesentlichen die Störquelle darstellt, in der Schirmkabine platziert. Um den Umrichter für Messungen sowohl der leitungsgebundenen Störaussendung auf der Antriebs-, wie der Batterieleitung als auch der gestrahlten Störaussendung betreiben zu können, muss er zum einen über eine Gleichspannungsquelle versorgt werden und zum anderen an seinen Motorklemmen eine Last also einen Antrieb antreiben können. Aktuell wird nach CISPR 25 ein realer Antrieb an den zu testenden Umrichter angeschlossen. Um den Umrichter in realitätsnahen Betriebspunkten betreiben zu können, wird die Welle des Antriebs aus der Halle geführt, um dort eine mechanische Belastungsmaschine (in der Regel ein zweiter leistungselektronisch geregelter Antrieb) anzuschließen. Um die Schirmwirkung der Halle nicht zu beeinträchtigen und die Lastmaschine zu entkoppeln wird die Welle entweder isoliert (Kunststoffwelle) oder über eine Wellenfilterung (Wellenschirmung) aus der Halle geführt, was zumindest bei einer bestehenden Halle problematisch ist. Da der Antrieb im Bezug auf die EMV eine passive Komponente darstellt, sind entsprechende Entstörmaßnahmen im Umrichter zielführend.

Um die Belastung für den zu prüfenden Antriebsumrichter bereitzustellen und die Durchführung der Welle durch die Kabinenwand zu vermeiden, kann eine passive Motornachbildung anstelle eines Drehstrommotors zum Einsatz kommen.

Diese Motornachbildung ist ein passives Netzwerk, welches die Gegentakt- und die Gleichtaktimpedanz des Drehstrommotors im betrachteten Frequenzbereich nachbildet. Als Basis für diese Ersatzschaltung dient ein in [4] präsentiertes Ersatzschaltbild, welches in der Lage ist simulativ die Impedanz des Motors nachzubilden. Im Detail wird die Impedanz des Antriebs, der im Prüfstand [5] an der Universität Duisburg-Essen eingesetzt wird, nachgebildet. Zudem wird die Motornachbildung so ausgelegt, dass der zu testende Umrichter auch bei hohen Ausgangsleistungen betrieben werden kann, um unter realen Bedingungen testen zu können. Durch die Verwendung einer passiven Ersatzlast kann eine Störaussendungsmessung an Antriebsumrichtern auch in bestehenden Schirmkabinen ohne eine isolierte bzw. gefilterte Durchführung der Antriebswelle durchgeführt werden. Zur abschließenden Verifikation werden die Messungen (Pulse im Zeitbereich, Störspektrum im Frequenzbereich) an der Ersatzlast mit Messungen am Original Antrieb verglichen.

2. Konzeption und Aufbau der Ersatzlast

Da die Ersatzlast im Wesentlichen für die Messung der leitungsgeführten Störaussendung von Antriebsumrichtern nach dem Aufbau nach CISPR 25 eingesetzt werden soll, wird die Gleichtakt sowie die Gegentaktimpedanz des zu modellierenden Drehstromantriebs im Frequenzbereich zwischen 10kHz und 20MHz nachgebildet. Wie die Untersuchungen in [6], [7] gezeigt haben, treten in diesem Frequenzbereich zudem die höchsten Störpegel im Antriebssystem auf. Somit ist gerade im diesem Frequenzbereich eine möglichst genaue Modellierung des Antriebs nötig.

2.1 Die Gleichtakt- und Gegentaktimpedanz des zu untersuchenden Antriebs

Die in Elektro- und Hybridfahrzeugen eingesetzten elektrischen Drehstrommotoren bestehen aus drei oder mehreren Statorwicklungen, welche isoliert von dem Motorgehäuse in Nuten auf dem Umfang des Stators angeordnet sind. Dieser prinzipielle Aufbau ist im Wesentlichen für die permanent erregte Synchronmaschine und die Asynchronmaschine identisch. Der Antrieb, der in diesem Projekt nachgebildet werden soll, ist eine Asynchronmaschine mit zwei Polpaaren in Sternschaltung und einer Maximalleistung von 47kW. Bild 1 zeigt den nachzubildenden Antrieb und das verwendete Ersatzschaltbild zur Nachbildung seiner Impedanz. Es zeigt sich, dass jede Statorwicklung aus einer Stranginduktivität, einer parasitären Kapazität an beiden Enden gegen das Motorgehäuse und einem parallelen Widerstand zur Nachbildung der Eisenverluste besteht. Wird nun der gesamte Antrieb und im speziellen seine Gleichtakt- bzw. Gegentaktimpedanz betrachtet, so ergeben sich die vereinfachten Ersatzschaltbilder in Bild 2. Bei der Messung der Gleichtaktimpedanz werden alle drei Wicklungen kurzgeschlossen die Impedanz zwischen den Wicklungen und den Motorgehäuse gemessen. Somit sind sowohl Streukapazitäten an den Wicklungsenden als auch die drei Statorwicklungen parallel geschaltet und es ergibt sich das Gleichtaktersatzschaltbild in Bild 2 links. Die Impedanz dieser Ersatzschaltung zeigt im Wesentlichen kapazitives Verhalten.

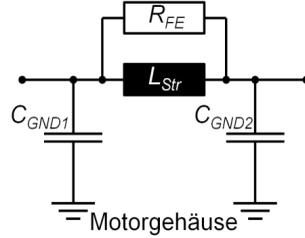


Bild 1 Modellierter Asynchronmaschine links und vereinfachtes Ersatzschaltbild für eine Antriebswicklung rechts

Das bedeutet, dass bis zu einer bestimmten Frequenz hauptsächlich die Streukapazitäten zwischen den drei Statorwicklungen und dem Motorgehäuse die Impedanz bestimmen. Dieses Verhalten zeigt sich auch in den Impedanzmessungen an dem Originalantrieb in Bild 3. Die Gleichtaktimpedanz (blaue Kurve) zeigt bis zur ersten Resonanz kapazitives Verhalten. Bis zu dieser Resonanz kann der Einfluss der Gleichtaktinduktivität vernachlässigt werden und die Gesamtkapazität ergibt sich mit den Werten in Punkt 1 zu

$$C_{Gesamt} = \frac{1}{2\pi f_1 Z_1}. \quad (1)$$

Nach der ersten Resonanz in Punkt 2 ist die Impedanz der drei parallel geschalteten Induktivitäten so hoch, dass im Wesentlichen nur noch die Streukapazitäten C_{GND1} zum Tragen kommen. Somit berechnet sich die Wicklungseingangskapazität (nach Punkt 3) zu

$$C_{GND1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2\pi f_3 Z_3}. \quad (2)$$

Mit (1) und (2) kann abschließend die Wicklungsausgangskapazität C_{GND2} berechnet werden. Im nächsten Schritt wird die Ersatzschaltbild und der Impedanzverlauf der Gegentaktimpedanz betrachtet. Da der Strompfad bei dieser Messung im Wesentlichen über die Reihenschaltung der Antriebswicklungen verläuft, zeigt sich für niedrige Frequenzen bis zur ersten Resonanz in Punkt 5 ein induktives Verhalten. Aus diesem induktiven Verhalten, kann die Induktivität der Antriebswicklungen bestimmt werden.

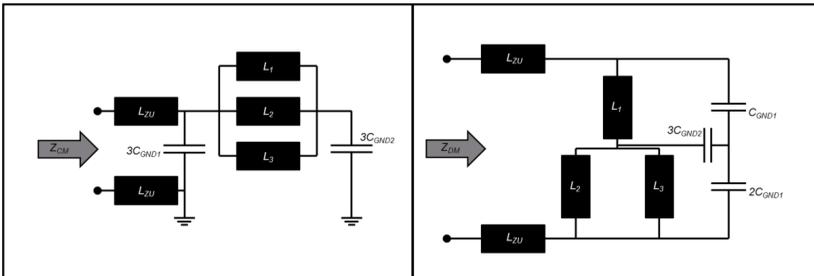


Bild 2 Ersatzschaltbild für die Gleichtaktimpedanz links und Ersatzschaltbild für die Gegentaktimpedanz rechts

Diese ergeben sich bei Betrachtung des Ersatzschaltbildes für die Gegentaktimpedanz zu

$$L_{Str} = \frac{2}{3} \cdot \frac{Z_4}{2\pi f_4} \quad (3)$$

Da die Wicklungskapazitäten bei der Resonanz in Punkt 5 eine hohe Impedanz aufweisen, wird die Dämpfung der Resonanz im Wesentlichen von den Eisenverlustwiderständen parallel zu den Wicklungsinduktivitäten bestimmt. Mit den Werten aus Punkt 5 ergibt sich der Eisenverlustwiderstand zu

$$R_{FE} = \frac{2}{3} Z_5 \quad (4)$$

Die zweite Gleichaktresonanz in Punkt 7 wird durch die Resonanz zwischen den Wicklungseingangskapazitäten und Zuleitungsinduktivitäten bestimmt. Mit Hilfe des Gleichaktersatzschaltbildes ergeben die Zuleitungsinduktivitäten zu

$$L_{zu} = \frac{1}{24\pi^2 c_{GND1} f_{res7}^2} \quad (5)$$

Mit diesen Werten lassen sich die wichtigsten Parameter für die Nachbildung der Motorimpedanz bestimmen. Bei der Realisierung müssen allerdings noch die zusätzlichen Streukapazitäten der Induktivitäten gegen das Gehäuse berücksichtigt werden.

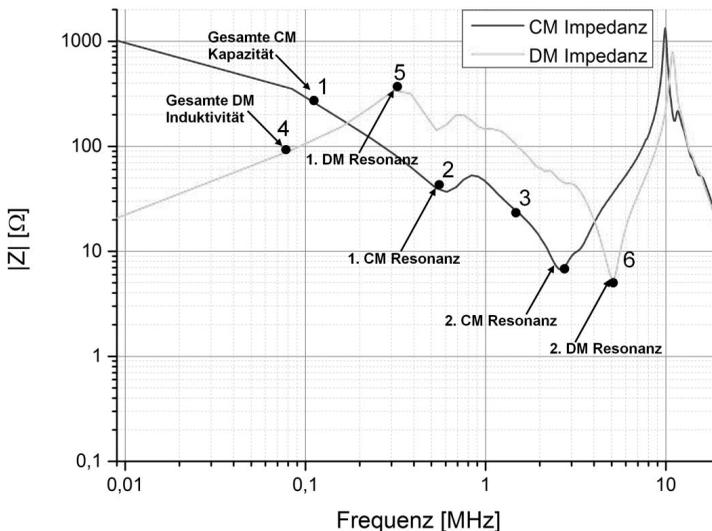


Bild 3 Gleichtakt (CM) - und Gegentakt (DM) Impedanz der Asynchronmaschine mit den charakteristischen Punkten

2.2 Realisierung der passiven Motornachbildung

Im Folgenden wird die realisierte Ersatzlast im Detail vorgestellt. Bild 4 zeigt die realisierte Ersatzlast und das Ersatzschaltbild. Um Sättigungseffekte zu vermeiden, werden die drei Stranginduktivitäten als Luftspulen ausgeführt. Somit ist die Impedanz der Ersatzlast unabhängig vom Laststrom. Da die Ersatzlast für hohe Ströme ausgelegt ist, sind die Abmessungen der Spulen sehr groß wodurch die Stranginduktivität auf $90\mu\text{H}$ begrenzt wird. Diese Induktivität ist zwar kleiner als die des zu modellierenden Motors, was sich aber nur auf die Gegentaktimpedanz auswirkt. Da die vom Antriebsumrichter verursachten Störungen aber im Wesentlichen Gleichtaktstörungen sind, wurde bei der Anpassung der Ersatzlast der Fokus auf eine möglichst genaue Modellierung der Gleichtaktimpedanz gelegt.

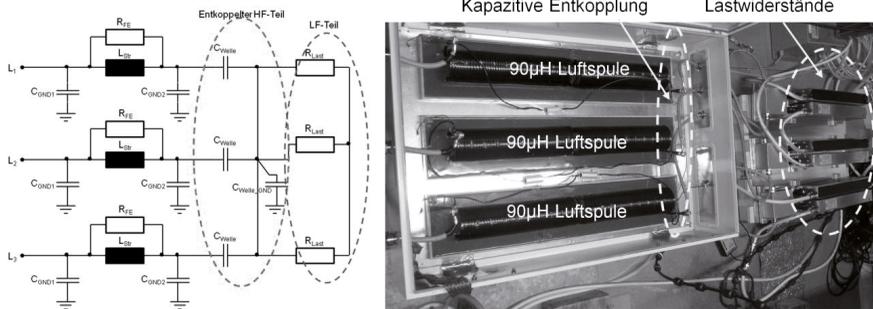


Bild 4 links: Ersatzschaltbild der Motornachbildung rechts: realisierte Motornachbildung

Dies zeigt sich auch beim Vergleich der Impedanz des Motor und der Impedanz der angepassten Motornachbildung in Bild 5. Die Gleichtaktimpedanz wird in betrachteten Frequenzbereich nahezu perfekt nachgebildet. Bei der Gegentaktimpedanz zeigen sich bei der Gesamtinduktivität und bei der Höhe der ersten Gegentaktresonanz kleinere Abweichungen. Um den zu Antriebsumrichter unter realistischen Bedingungen betreiben zu können muss der schlupfabhängige Lastwiderstand aus dem einphasigen Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine [8] nachgebildet werden. Zur Erhöhung der Flexibilität der Ersatzlast wird dieser Lastwiderstand durch einen parallelen Laststernpunkt außerhalb des Gehäuses realisiert. Um die Impedanz der Wicklungsnachbildung nicht zu verfälschen werden die hochfrequenten Anteile des Phasenstroms am Ende jeder Luftspule kapazitiv entkoppelt. Der Hauptlaststrom, beispielsweise bei einer Grundfrequenz von 200Hz , fließt dann über die drei Lastwiderstände. Durch eine Variation dieser Lastwiderstände können somit unterschiedliche ohmsche Lasten für den zu testenden Umrichter realisiert werden, ohne die Gleichtakt- und die Gegentaktimpedanz der Ersatzlast zu beeinflussen. Die Unabhängigkeit der Gesamtimpedanz von dem verwendeten Lastwiderstand zeigen die in Bild 6 dargestellten Ergebnisse. Hier wurde einmal die Impedanz bei kurzgeschlossenem Sternpunkt und einmal die Impedanz mit einem Lastwiderstand von $4,3\Omega$ gemessen. Allerdings ist hierbei darauf zu achten, dass der verwendete Lastwiderstand möglichst ohmsches Verhalten haben muss. Gewickelte Widerstände haben eine hohe Induktivität und verändern somit die Gegentaktimpedanz des Ausbaus. Zudem haben auch die Streukapazitäten des Lastwiderstands Einfluss auf die Impedanz, welche ggf. bei der Anpassung der Ersatzlast berücksichtigt werden müssen.

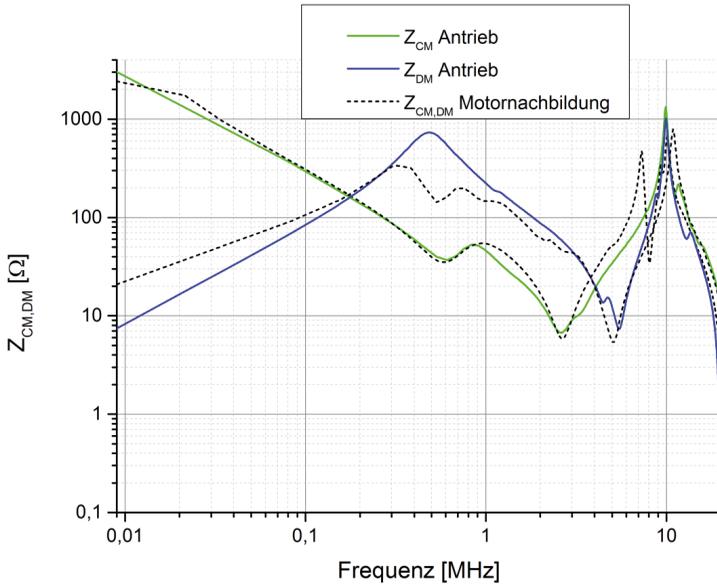


Bild 5 Vergleich der Impedanz des Antriebs mit der Impedanz der angepassten Motornachbildung

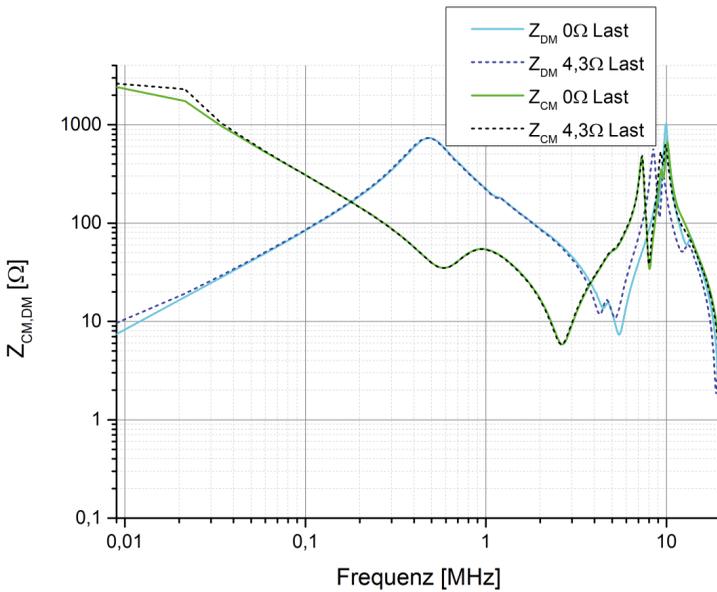


Bild 6 Einfluss des Lastwiderstands auf die Gesamtimpedanz der Motornachbildung

3. Betrieb der Ersatzlast am HiL Prüfstand

Im Folgenden wird die Ersatzlast am Antriebsstrangprüfstand betrieben und die am Originalantrieb und an der Motornachbildung auftretenden Störaussendungen sowohl im Zeit als auch im Frequenzbereich miteinander verglichen. Um möglichst nur den Antrieb mit der Ersatzlast zu vergleichen, wird bei beiden Aufbauten die gleiche Antriebsleitung verwendet. Um die Ersatzlast am Umrichter betreiben zum können, wird zudem für den internen Regler ein Resolverignal benötigt. Um dieses Signal bereitzustellen, wird der Originalantrieb, welcher in diesem Falle nicht mit dem Umrichter verbunden ist, über die Lastmaschine des Prüfstands angetrieben. Somit wird dem Drehzahlregler im Umrichter eine Drehzahl vorgegeben, die dieser dann durch versucht an der Ersatzlast umzusetzen.

3.1 Vergleich der Impulse im Zeitbereich

Durch die schnellen Schalthandlungen im Umrichter kommt es zum Einen zu hochfrequenten Spannungsüberhöhungen in der Schaltflanke und zum Anderen zu Strom- bzw. Spannungspulsen an anderen Stellen des HV-Bordnetzes. Bild 7 zeigt einen Vergleich der im Zeitbereich auftretenden Spannungspulse am Antrieb und an der Ersatzlast am Beispiel der Sternpunktspannung und der unsymmetrischen Spannung an der Batterieplusleitung. Es wird deutlich, dass sowohl im Bezug auf die Impulsform als auch bezüglich der Amplitude nahezu identische Pulse an der Ersatzlast auftreten. Die Unterschiede in der Pulsbreite bei der Sternpunktspannung werden durch leichte Abweichungen bezüglich des Arbeitspunktes verursacht.

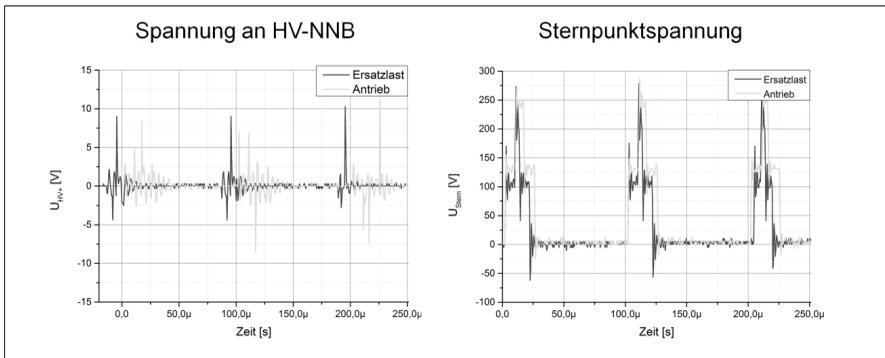


Bild 7 Vergleich der Sternpunktspannung und der Spannung an der HV-NNB am Antrieb und an der Ersatzlast

3.2 Vergleich der leitungsgeführten Störaussendung im Frequenzbereich

Da bei der Prüfung von Antriebsumrichtern im Wesentlichen Messungen im Frequenzbereich durchgeführt werden, zeigt Bild 8 einen Vergleich der Sternpunktspannung im Frequenzbereich zwischen 10kHz und 100MHz. Bis auf leichte Unterschiede im Mittelwellenbereich treten bei der Ersatzlast und dem nachzubildenden Antrieb in etwa die gleichen Störaussendungen auf.

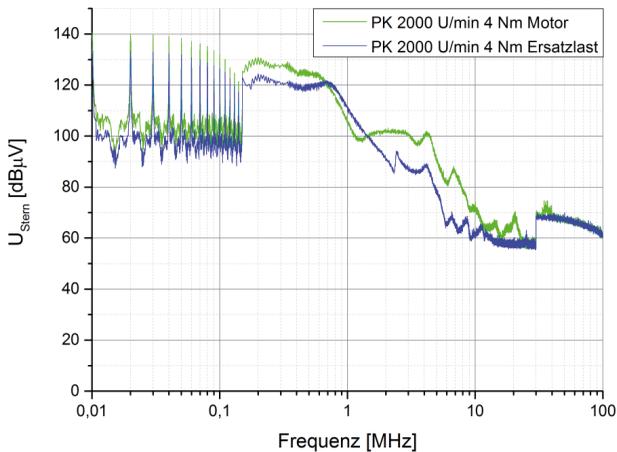


Bild 8 Sternpunktspannung am Antrieb und an der Ersatzlast im Frequenzbereich

4. Zusammenfassung

Die vergleichenden Untersuchungen haben gezeigt, dass die Impedanz einer elektrischen Maschine bei der EMV-Komponentenprüfung von Antriebsumrichtern durch eine passive Ersatzlast nachgebildet werden kann. Sowohl der Vergleich der Impulse im Zeitbereich als auch der Vergleich der Störaussendung im Frequenzbereich zeigt, dass mit der Ersatzlast realistische Ergebnisse erzielt werden können. Zudem kann der zu prüfende Antriebsumrichter mit der Ersatzlast unter realistischen Bedingungen betrieben werden, ohne eine Antriebs- und eine Belastungsmaschine verwenden zu müssen. Die Ersatzlast kann also mit geringem Aufwand für Prüfungen in bereits bestehenden Schirmkabinen eingesetzt werden. Durch die Entkopplung des LF- und des HF-Teils wird die Flexibilität des Systems erhöht, da die Lastwiderstände beliebig variiert werden können.

5. Literatur

- [1] A.Engstle, M.Diemi, A.Angermaier, W.Schelter: *800V for electric vehicles - Voltage level suitable for calibration*, ATZ vol. 115, 09.2013
- [2] Specovious, J.: *Grundkurs Leistungselektronik*, 4. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, 2010.
- [3] IEC/CISPR 25: *Vehicles, Boats and Internal Combustion Engines- Radio Disturbance Characteristics-Limit and Method of Measurement for the Protection of On-Board Receivers - Standard*, IEC working Draft 4th Edition, Mai 2014
- [4] Schinkel et al.: *Efficient HF Modelling and Model Parameterization of Induction Machines for Time and Frequency Domain Simulations*, IEEE APEC, 2006
- [5] S.Jeschke, H.Hirsch, M.Koppers, D.Schramm: *HiL simulation of electric vehicles in different usage scenarios*, IEEE IEVC 2012
- [6] S.Jeschke, H.Hirsch: *Investigation on the EMI of an electric vehicle traction system in dynamic operation*, EMC Europe2014, 2014
- [7] S.Jeschke, H.Hirsch, S.Tsiapenko: *Investigations on the Shaft Currents of an Electric Vehicle Traction System in Dynamic Operation*, EMC 2015, 2015
- [8] E.Spring: *Elektrische Maschinen, eine Einführung*, 2.Auflage, Springer Verlag, 2006