

# Untersuchung der Kopplungseigenschaften der Antriebslager auf die Wellenströme in Antriebssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen

Sebastian Jeschke, M.Sc., Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und –speicherung

Prof.Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und –speicherung

Sergii Tsiapenko, M.Sc., Universität Duisburg-Essen, Fachgebiet Energietransport und –speicherung

## 1. Einleitung

Die zunehmende Einführung von elektrischen Antriebssystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen führt aktuell zu enormen Herausforderungen bezüglich der EMV Anforderungen dieser Fahrzeuge. Um diese elektrischen Antriebe, wie sie sonst eher im Industriebereich eingesetzt werden, effizient betreiben zu können, werden sie in aktuellen Elektrofahrzeugen bei Batteriespannung im Bereich von 400V betrieben. Im Antriebsumrichter wird aus der Batteriespannung ein frequenzvariables Drehstromsystem zum Betrieb des Drehstrommotors generiert. Hierzu wird die volle Batteriespannung mit sehr steilen Schaltflanken auf die Antriebswicklungen geschaltet. Zur Erhöhung des Systemwirkungsgrads des Antriebssystems ist es notwendig, dass die im Umrichter eingesetzten IGBTs möglichst schnell schalten, was sich allerdings nachteilig auf die Störaussendung der Komponente auswirkt. Aufgrund der deutlich höheren Bordnetzspannung erzeugen die im Antriebsbordnetz eingesetzten leistungselektronischen Komponenten im Vergleich zur klassischen Fahrzeug-EMV höhere Störaussendungen, die zur Sicherstellung der EMV beherrscht werden müssen. Aufgrund des begrenzten Platzangebots innerhalb des Fahrzeugs sind die möglichen Gegenmaßnahmen begrenzt. Zur Abschirmung des Antriebsbordnetzes vom Rest des Fahrzeugs wird dieses in der Regel als vollständig geschirmtes IT-Netz ausgeführt. Aufgrund dieser neuen Anforderungen werden aktuell alle EMV-Standards im Fahrzeugbereich mit Bezug auf die Komponenten des Antriebsbordnetzes überarbeitet. Die Komponententests des elektrischen Antriebsstrangs werden aktuell in neusten Draftversion der CISPR 25 [1] beschrieben. Der Test eines Antriebsumrichters beinhaltet die Messung des leitungsgeführten Störstroms auf der Antriebs- und der Traktionsleitung und eine Messung der Störspannung an einer Netznachbildung auf der 12V und auf der HV-Seite.

Problematisch ist hierbei die Antriebswelle der elektrischen Maschine, da diese nicht in die Systemschirmung integriert ist und somit Gleichtaktstörströme über die Antriebslager in andere Bereiche des Fahrzeugs überkoppeln können. Der Störstrom, der über die Lager auf die Antriebswelle auskoppelt, wird in der aktuellen Norm nicht berücksichtigt. Allerdings haben Messungen im Rahmen der Arbeit [2] gezeigt, dass der Wellenstrom bei einigen Frequenzen die Störstromgrenzwerte nach CISPR 25 überschreitet. Somit können auch diese Wellenströme einen signifikanten Einfluss auf die elektromagnetischen Eigenschaften der Fahrzeuge haben. Des Weiteren zeigte die Untersuchung in [2], dass sich die Wellenströme in Abhängigkeit von der Drehzahl des Antriebs ändern.

Um den Einfluss der Drehzahl auf die Kopplungseigenschaften der Lager und damit die Störaussendung an der Antriebswelle zu untersuchen, wird die in [3] vorgestellte HiL-Umgebung eines elektrischen Antriebsstrangs verwendet. Im Detail wird in dieser Arbeit untersucht, welchen Einfluss der Betriebspunkt des Antriebs auf die Koppelimpedanz zwischen der Störaussendung des Umrichters und dem Strom auf der Antriebswelle hat. Hierzu werden die Wellenströme sowohl im konstanten als auch im dynamischen Betrieb erfasst, um die Kopplungseigenschaften der Lager genauer zu untersuchen.

## 2 Koppelpfade innerhalb der Antriebsmaschine

Neben den Koppelpfaden auf die Schirmung des HV-Bordnetzes im Bereich der Antriebs und Traktionsleitungen sowie im Bereich der einzelnen Komponenten kommt es auch innerhalb der Antriebsmaschine zu Koppelpfaden für die breitbandigen Störaussendungen des Antriebsumrichters. Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau einer Drehstromasynchronmaschine, mit den entstehenden Störströmen und den Koppelpfaden. Der Antriebsumrichter schaltet die PWM Spannungen auf die Statorwicklungen, wodurch nach einer Glättung durch die Wicklungsinduktivitäten ein Drehstromsystem erzeugt wird, welches über das so generierte Drehfeld den Läufer in Rotation versetzt. Allerdings haben die Ausgangsspannungen des Umrichters hohe Frequenzanteile, die innerhalb des Motors hochfrequente Verschiebungsströme erzeugen. Diese breiten sich über die parasitären Kapazitäten zwischen der Wicklung und dem Motorgehäuse und zwischen der Wicklung und dem Rotor aus. Ein weiterer kapazitiver Koppelpfad für die hochfrequenten Störströme wird über den Ölfilm innerhalb der Antriebslager gebildet.

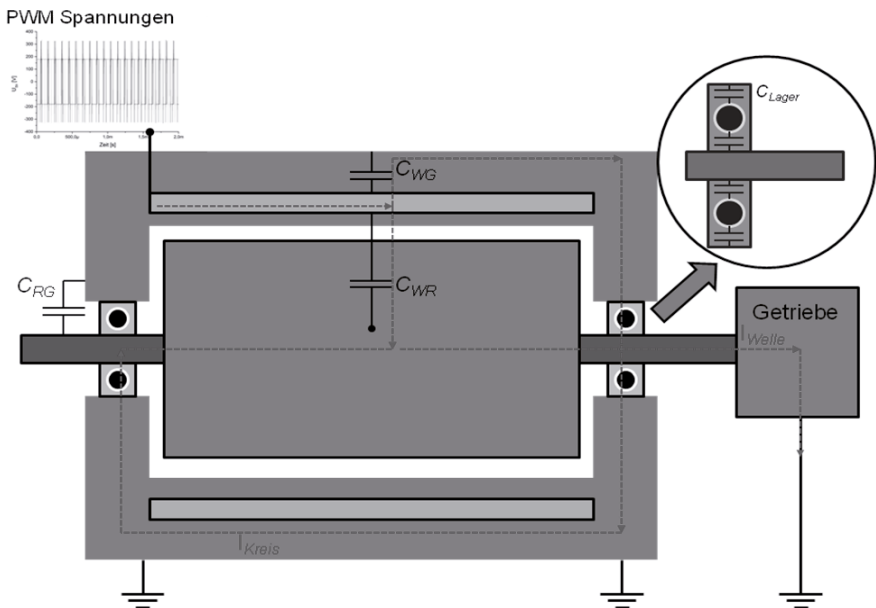
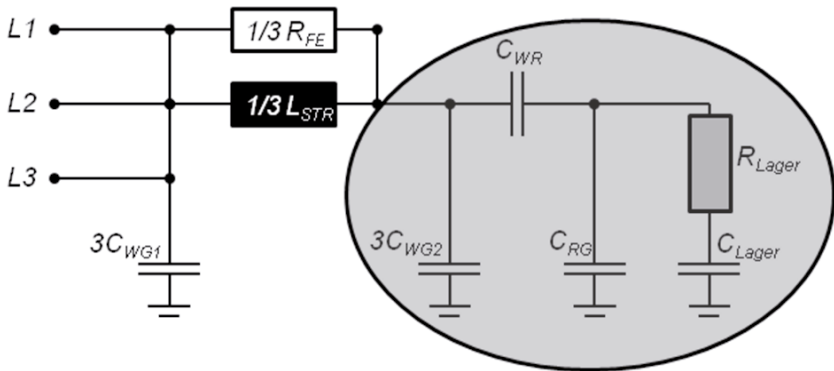


Bild 1 Schematische Darstellung der Koppelpfade innerhalb einer elektrische Antriebsmaschine

Hierüber können beispielsweise Störströme vom Motorgehäuse auf die Welle überkoppeln. Insgesamt ergeben sich so für die hochfrequenten Störströme innerhalb des Motors zwei Strompfade. Zum einen bildet sich ein Kreisstrom aus, der über die Welle und das Motorgehäuse fließt. Dieser wird im Wesentlichen durch den Gleichtaktstrom in den Statorwicklungen verursacht, der einen axialen Spannungsabfall auf der der Welle hervorruft. Diese Spannung treibt dann den Kreisstrom über das Gehäuse und die Welle. Zum anderen kommt es zu einem Wellenstrom, der über die Welle aus dem geschirmten System herausfließt und beispielsweise über das Getriebe gegen Erde fließt. Dieser Strom hängt im Wesentlichen von den Erdungsverhältnissen im System ab. Die Kopplungen für die vom Umrichter verursachten Gleichtaktspannungen innerhalb der Antriebsmaschine können vereinfacht durch das Ersatzschaltbild in Bild 2 beschrieben werden. Es ist klar zu sehen, dass die Koppelimpedanzen zwischen den Wicklungen und dem Gehäuse und zwischen den Wicklungen und der Welle im Wesentlichen kapazitiv sind.



**Bild 2 Ersatzschaltbild des Motors für die Gleichtaktspannung bei drehendem Lager**

Zum besseren Verständnis der Parameter dieses ESB (Speziell dem markierten Bereich in Bild 2) wurden Impedanzmessungen am im HiL-Prüfstand verwendeten Asynchronmotor durchgeführt. Hierbei wurden alle Statorwicklungen des Motors kurzgeschlossen und die Welle über eine Schleifringvorrichtung geerdet. Um die Koppelimpedanzen im rotierenden Betrieb zu erfassen wurde die Welle über eine externe Maschine angetrieben. Diese wurde über eine Welle aus nicht leitendem Material mit der Antriebswelle verbunden, um ausschließlich die Impedanz des Antriebs zu erfassen. Im Detail wurde die Impedanz zwischen der Welle und den Statorwicklungen und zwischen der Welle und dem Motorgehäuse zwischen 10kHz und 20MHz gemessen. Die Impedanzen sind in Bild 3 dargestellt. Bei der Impedanzmessung an der stehenden Welle ergibt sich im Wesentlichen die Gleichtaktimpedanz zwischen den Wicklungen und dem Motorgehäuse [4]. Dies liegt daran, dass die Welle im Stillstand auf dem Gehäusepotential liegt. Bei rotierender Welle zeigt sich zum Einen eine Erhöhung des ohmschen Anteils der Impedanz bei der ersten Resonanz in Punkt A. Untersuchungen an einer Ersatzlast [5] haben gezeigt, dass die Höhe dieser Resonanz durch den ohmschen Anteil der Impedanz bestimmt wird. Da die Eisenverlustwiderstände  $R_{FE}$  und die Lagerwiderstände  $R_{Lager}$  in Bild 2 in Reihe geschaltet sind, erhöht sich der ohmsche Anteil bei drehender Welle. Zudem verschiebt sich die Resonanz (Punkt C) zwischen der gesamten Eingangskapazität (Markierter Bereich in Bild 2) und den Zuleitungsinduktivitäten hin zu höheren Fre-

quenzen, da sich diese bei drehender Welle verringert. Die Impedanz zwischen der Welle und dem Gehäuse wird durch die Kapazitäten der Lager  $C_{Lager}$  sowie die Kapazität zwischen der Welle und dem Gehäuse  $C_{RG}$  bestimmt (Punkt B).

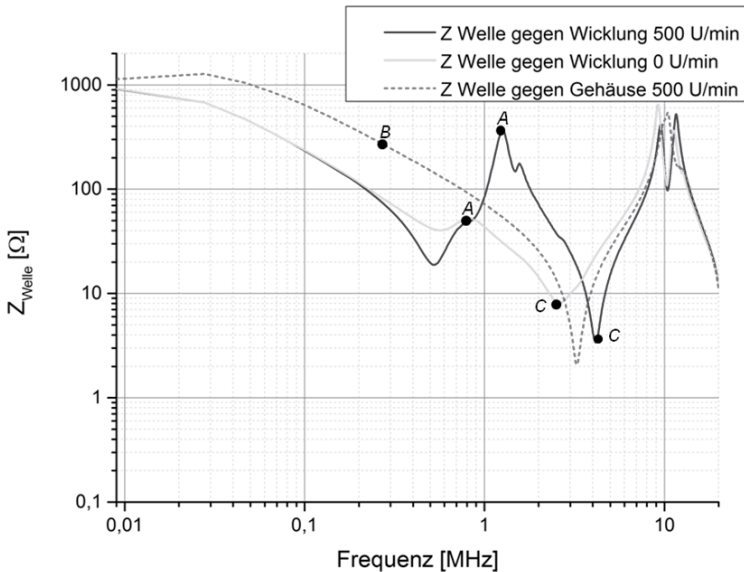


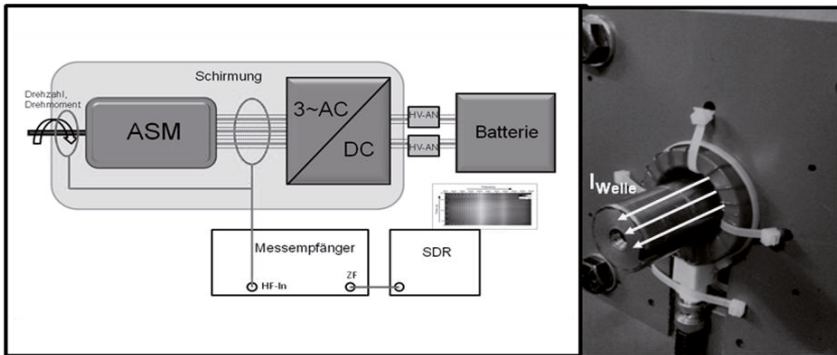
Bild 3 Impedanz zwischen Welle und Wicklung und zwischen Welle und Gehäuse bei stehender und bei drehender Welle (500 U/min)

### 3. HiL-Prüfstand zur Messung der Störaussendung des Antriebsstrangs von Elektrofahrzeugen

Zur Untersuchung der an der Welle auftretenden Gleichtaktstörströme wird der HiL-Aufbau eines elektrischen Fahrzeugantriebsstrangs (siehe Bild 4) genutzt. Dieser besteht aus einer Asynchronmaschine mit 47kW Maximalleistung, die an einem Umrichter betrieben wird. Die Versorgung erfolgt über eine Lithium-Ionen Batterie mit einer Nennspannung von 360V. An der Antriebswelle ist eine fremderregte Gleichstrommaschine als Belastungsmaschine angeschlossen. Ein zweiter Maschinensatz wird zur Regelung der Ankerspannung und somit zur Regelung des Lastmoments verwendet. Für eine detaillierte Beschreibung der Lastregelung sei auf die Arbeit [3] verwiesen. Bezüglich der EMV Messungen hat der Prüfstand den Vorteil, dass die Lastmaschine nicht über einen Umrichter betrieben wird und die Umgebung somit einen geringen Einfluss auf die Störaussendungsmessungen hat. Mit diesem Aufbau ist es nun möglich die Störaussendung des Antriebs an unterschiedlichen Stellen im konstanten wie im dynamischen Betrieb zu untersuchen.



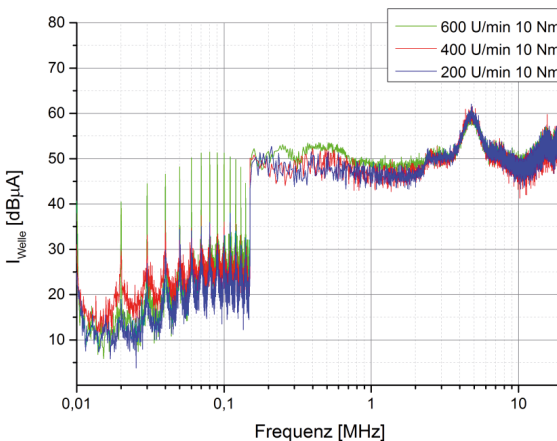
Dieser bestimmt in diskreten Zeitschritten über eine FFT die Störaussendung im Frequenzbereich und stellt die Ergebnisse beispielsweise in Form eines Wasserfalldiagramms dar. Hierüber können die Pegel des Wellenstroms im Frequenzbereich über der Zeit dargestellt werden.



**Bild 5 Links:** Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Messung der Wellenströme in konstanten und im dynamischen Betrieb; **rechts** induktiver Messwertaufnehmer zur Erfassung der Wellenströme

### 3.2 Wellenströme im konstanten Betrieb

Im ersten Schritt werden die an der Welle auftretenden Ströme bei konstanten Betriebspunkten gemessen. Messungen an anderen Punkten des Antriebsstrangs (Schirmung der Antriebsleitung, Störspannung an den Netznachbildungen an den Traktionsleitungen) zeigten kaum Abhängigkeit der Störaussendung von der Drehzahl des Antriebs [7].

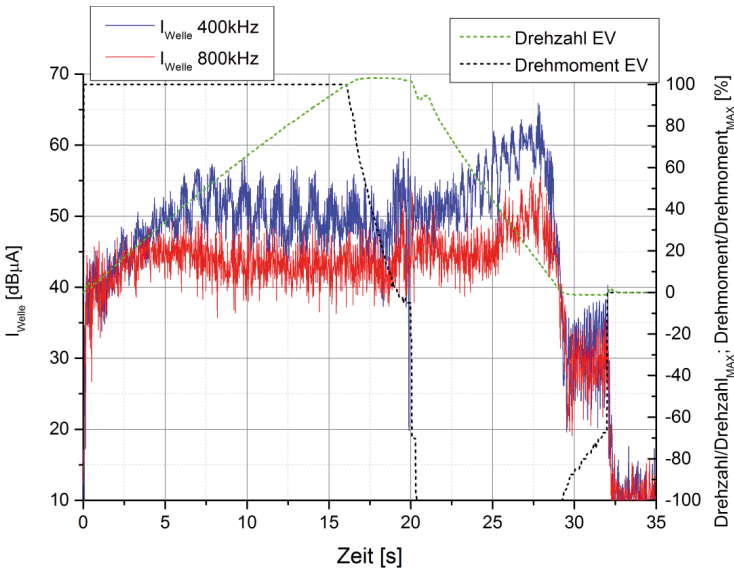


**Bild 6** Wellenströme in konstanten Betrieb bei variabler Drehzahl und konstantem Drehmoment

Bei den Wellenströmen hingegen zeigt sich aufgrund des Koppelpfades über die Lager eine Abhängigkeit der Störaussendung von der Drehzahl der Welle. In Bild 6 sind die gemessenen Wellenströme bei unterschiedlichen Drehzahlen und konstanten Drehmoment dargestellt. Bei niedrigen Frequenzen sind aufgrund der geringen Messbandbreite von 200 Hz Maxima bei Vielfachen der Umrichtertaktfrequenz zu sehen. Zudem steigen die Störströme bei der Maschinenresonanz bei etwa 5 MHz (Impedanz zwischen Welle und Wicklung bei drehender Welle in Bild 3) an. Bei Betrachtung der Drehzahlabhängigkeit zeigt sich zudem gerade bei niedrigen Frequenzen, dass bei steigender Drehzahl auch die Amplitude der Wellenströme ansteigt. Im Frequenzbereich von 10 kHz bis 150 kHz steigen die Amplituden der Maxima um 10 bis 15 dB mit steigender Drehzahl an.

### 3.3 Wellenströme im dynamischen Betrieb

Im nächsten Schritt wird der Antrieb dynamisch betrieben, um die den Einfluss der Drehzahl auf die Amplitude der Wellenströme während eines Beschleunigungsvorgangs zu untersuchen. Das Fahrprofil dieses Beschleunigungsvorgangs ist in Bild 7 dargestellt. Der Antrieb wird mit maximalem Drehmoment bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigt und danach mit maximaler Rekuperationsleistung bis zum Stillstand abgebremst. Gerade während der Beschleunigung wird ein konstantes Drehmoment erzeugt und die Drehzahl steigt linear an. Es ist deutlich zu sehen, dass auch die Amplitude der Wellenströme mit steigender Drehzahl ansteigt. Zudem wird die Maximalamplitude während des Beschleunigungsvorgangs bei höheren Frequenzen schneller erreicht, was das im Wesentlichen kapazitive Verhalten des Koppelpfades bestätigt.



**Bild 7 Wellenströme bei unterschiedlichen Frequenz für einen dynamischen Beschleunigungs- und Abbremsvorgang**

## 4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Kopplungspfad über die Welle einer Antriebsmaschine in Elektro- und Hybridfahrzeugen eingehender untersucht. Die Messung der Impedanz zwischen der Welle und der Wicklung sowie zwischen der Welle und dem Motorgehäuse zeigt, dass der Koppelpfad im Wesentlichen eine kapazitive sowie eine resistive Komponente hat. Beim Stillstand der Maschine sind die Lager leitend und die Welle liegt Gehäusepotential und die Impedanz zwischen der Welle und der Wicklung gleich der Gleichtaktimpedanz zwischen den Wicklungen und dem Gehäuse. Bei drehendem Rotor kommt treten die Koppelkapazitäten der Lager auf, die Maschinenresonanz hin zu höheren Frequenzen verschieben. Zudem erhöht sich der resistive Anteil des Koppelpfades durch den Ölfilm in den Lagern. Bei den Messungen der Wellenströme am HiL-Versuchstand zeigt sich zudem eine drehzahlabhängige Erhöhung der Wellenströme. Die Impedanz des Wellenstromkoppelpfades sinkt gerade bei niedrigen Frequenzen mit steigender Drehzahl. Diese zeigt sich auch bei der Messung der Wellenströme im dynamischen Betrieb während eines Beschleunigungsvorgangs. Die linear ansteigende Drehzahl führt zu einem Anstieg der Wellenstromamplitude bei den betrachteten Frequenzen. Zudem zeigt sich, dass die maximale Wellenstromamplitude während des Beschleunigungsvorgangs bei höheren Frequenzen schneller erreicht wird, was das kapazitive Verhalten des Koppelpfades bestätigt.

## 5. Literatur

- [1] 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 4<sup>th</sup> Edition, Mai 2014
- [2] S.Jeschke, H.Hirsch, S.Tsiapenko: *Investigations on the Shaft Currents of an Electric Vehicle Traction System in Dynamic Operation*, IEEE EMC 2015
- [3] S.Jeschke, H.Hirsch: *Analysing the Impact of Different Electric Traction Drives on the Vehicle's Energy Consumption using HiL Simulation*, IEEE VPPC 2014
- [4] S.Jeschke, H.Hirsch: *Investigation on the influence of the shielding concept on the disturbances from the propulsion system of an electric vehicle*, EMC Europe 2013
- [5] S.Jeschke, H.Hirsch, S.Tsiapenko, J.Heyen, M.Obholz, J.Bärenfänger, M.Maarleveld: *Entwicklung einer passiven Motornachbildung zur Prüfung von Antriebssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen*, EMV 2016
- [6] Perseus Receiver User Manual, Microtelecom s.r.l. , 2008
- [7] S.Jeschke, H.Hirsch: *Investigations on the EMI of an Electric Vehicle Traction System in Dynamic Operation*, EMC Europe 2013