

Bewertung der Störaussendung von Hochvolthalbleitern für Elektrofahrzeuge

Dipl.-Ing. (FH) M. Trebeck, Prof. Dr.-Ing. M. Richter, Westsächsische Hochschule Zwickau

Dr.-Ing. Bernd Körber, FTZ e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau

M. Eng. T. Enzinger, AUDI AG, Ingolstadt

Dr.-Ing. T. Rinkleff, Volkswagen AG, Wolfsburg

1. Einleitung

Um die Störaussendung von Hochvoltsystemen für Kraftfahrzeuge gezielt bewerten zu können, sind EMV-Messungen und messtechnische Untersuchungen zur Verkopplung der Störgrößen auf den verschiedenen Integrationsebenen notwendig.

Zur gezielten EMV-Optimierung des Traktionssystems sind Messverfahren zur Analyse der Einzelkomponenten notwendig. Ausgehend vom Entwicklungsprozess werden die Untersuchungen bei Hochvolthalbleitern auf Schaltkreisebene (Modul) begonnen. Bei getakteter Arbeitsweise ist der Halbleiter im Umrichtermodul die Störquelle. Ein geeignetes Messverfahren für diese Module muss grundsätzliche Einflüsse auf die Störaussendung, die sich aus dem Aufbau der Module ergeben, aufzeigen können.

Da auf dem Gebiet der Elektromobilität noch keine EMV-Messverfahren für diese Anwendung genormt sind, wird nachfolgend eine solche Messspezifikation beschrieben.

2. Entwicklung der Messspezifikation

2.1 Zielstellung und Vorüberlegungen

Die hier vorgestellte Messspezifikation soll die Störaussendung des Umrichtermoduls bewerten. Ziel ist die Vergleichbarkeit verschiedener Umrichter bei gleichen Randbedingungen.

Für die Ermittlung der Störaussendung der Traktionssysteme sind in den Vorschlägen für die neue Version der CISPR25 komplexe, geschirmte Aufbauten mit Antriebs- und Belastungsmaschinen aufgeführt. Für die Bestimmung der Störungen, welche die Halbleiterschalter im Modul erzeugen, ist ein vereinfachter Ansatz geeigneter.

Insbesondere der Wegfall der Schirmung und der Verzicht auf eine dreiphasig angesteuerte und mechanisch bewegte Last führen zu einer deutlichen Verringerung der Komplexität des Aufbaus und der Anforderungen an den Messplatz.

Gleichzeitig sind die relevanten Störquellen und die applikationsbedingten Pfade für die Gegentakt- und Gleichtaktstörungen soweit wie möglich nachzubilden.

Auf Basis dieser Vorgaben wird ein ungeschirmter Messaufbau mit minimaler externer Beschaltung des Umrichtermoduls vorgeschlagen, der folgende weitere Bestandteile ausweist:

- Zwischenkreiskondensator,
- Kühlkörper für Umrichtermodul,

- ohmsch-induktive Last,
- definiert angeschlossene Hochvolt- und Niedervoltversorgung sowie
- Ansteuerschaltung mit Hilfsspannungsversorgung für Umrichtermodul.

Die elektrischen Verbindungen erfolgen über möglichst kurze Leitungen.

Die leitungsgebundenen Messungen finden in einem geschirmten Raum statt.

2.2 Störquellen und EMV-relevante Bestandteile des Halbleitermoduls

Aufgrund der geschalteten Spannungen und der notwendigen Leistungen kommen in den Umrichtern für den Kfz.-Einsatz Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) zum Einsatz. Diese arbeiten hier als aktiv geschaltete Halbleiter. Da diese auf einen Motor als überwiegend induktive Last arbeiten, werden als weiteres Halbleiterelement zusätzlich Freilaufdioden benötigt, um den Strom in Rückwärtsrichtung zu führen. Die Dioden sind aufgrund ihres unterschiedlichen Schaltverhaltens ebenfalls EMV-relevant. Die Eigenschaften dieser Bauelemente bestimmen zusammen mit dem Modulaufbau das EMV-Verhalten des Moduls.

Bei Betrieb des Umrichtermoduls mit einer ausreichend großen Induktivität als Last im Prüfaufbau für einen nicht lückenden Stromverlauf bleiben die relevanten Störquellen mit ihrem charakteristischem Verlauf im Zeitbereich erhalten (Bild 1).

Weitere applikationsbedingt vergebene Bestandteile auf der Modulseite sind der Zwischenkreiskondensator, der Kühlkörper und die Ansteuerschaltung der Schalterstufen.

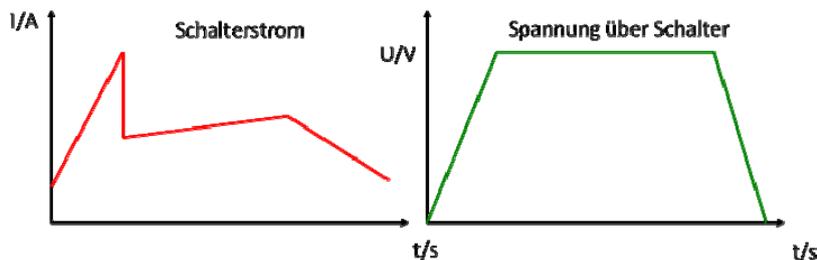


Bild 1: Strom- und Spannungsverläufe am Beispiel eines Tiefsetzstellers mit IGBT und Freilaufdiode an ohmsch-induktiver Last

2.3 Störstrompfade

Der Gleichtaktpfad für den Störstrom, der sich in der Applikation im Fahrzeug ergibt, wird maßgeblich durch die Kapazität des Moduls und des Motors nach Bezugsmasse bestimmt (Bild 2). Da dieser Strompfad signifikant zur Störaussendung in der Applikation beiträgt, muss er im Prüfaufbau nachgebildet werden. Dazu wird sowohl das Modul als auch die Last auf der Bezugsmasseplatte positioniert. Die Last hat damit eine definierte, für alle Messungen gleiche Kapazität nach Masse.

Der Gegentaktstörstrompfad entspricht dem Arbeitsstromkreis (Bild 2).

Relevante Beeinflussungsgrößen stellen die parasitär vorhandenen Induktivitäten und Widerstände im Strompfad dar, die Störspannungen hervorrufen. Diese sind bis auf das Modul mit dem zugehörigen Zwischenkreiskondensator im Aufbau immer gleich.

Ein weiterer EMV-relevanter Parameter der HV-Module ergibt sich aus der Größe und Symmetrie der Kapazitäten gegen die Hochvoltpotentiale und Bezugsmasse.

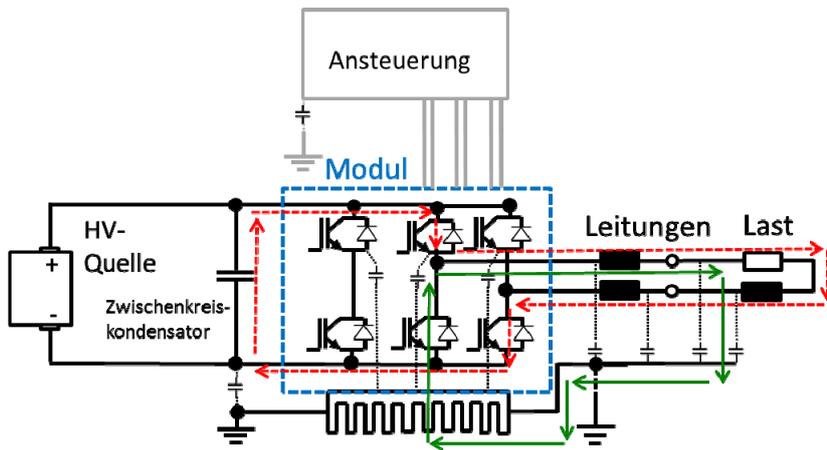


Bild 2: Beispielhafte Darstellung von Störstrompfaden grün: Gleichtakt / rot gestrichelt: Gegenteil

2.4 Erläuterung und Darstellung des Prüfaufbaus

Für den Betrieb des Umrichters sind eine Hochvoltspannungsquelle und eine Last sowie die jeweilige Anbindung notwendig.

Die Spannung wird außerhalb der Kabine erzeugt und über Kabinenfilter an den Messaufbau geführt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kabinenfilter zu einer Beeinflussung der Dynamik und der Gleichtaktimpedanz der Traktionsleitungen führen. Daher wird die Traktionsseite noch mit einer ausreichend großen Kondensatorbatterie am Messaufbau gepuffert.

Die definierte Anbindung der Hochvoltspannung (HV+, HV-) an den Prüfaufbau erfolgt über KFZ-Bordnetznachbildungen (BNN). Bei den notwendigen Versorgungsleitungen im Spannungsbereich des konventionellen Bordnetzes ist dies ebenso. Die Ansteuerung mit der Pulsweitenmodulation (PWM) erfolgt optisch entkoppelt

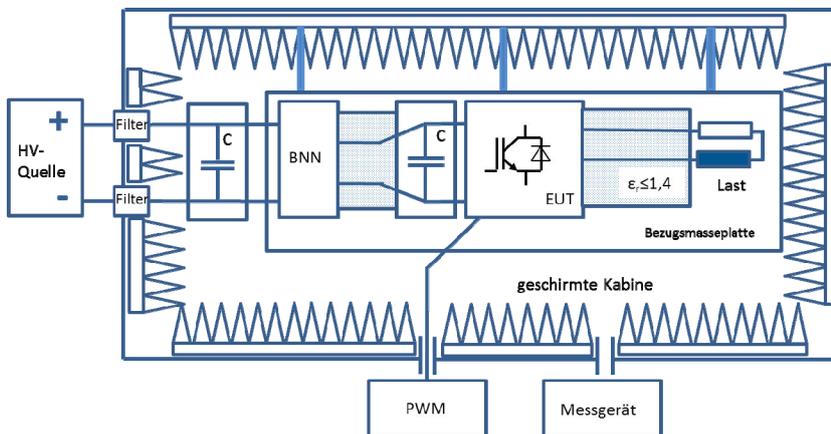


Bild 3: Messaufbau zur Bestimmung der Störaussendung des Moduls

2.5 Betriebsarten und Ansteuerung für die Hochvolthalbleiter

Für die Messungen wird das HV-Modul als Tiefsetzsteller betrieben. Dabei ist nur ein IGBT eines Brückenweiges aktiv gesteuert und die korrespondierende Diode des zweiten IGBT's im Brückenweig als Freilaufdiode genutzt. Ein zweiter IGBT eines anderen

Brückenzweiges ist statisch eingeschaltet, um den Stromfluss durch Modul und die Lastnachbildung zu gewährleisten (Bild 4).

Im Unterschied zur Applikation, dem dreiphasigen motorischen Betrieb, ergibt sich dadurch für die Messung eine geringere Anzahl der zur Störaussendung beitragenden Schaltelemente als auch eine geringere maximale Taktfrequenz für die PWM.

Das Schalten erfolgt mit festgelegten Gate-Vorwiderständen an einer definierten R-L-Last.

Da die Module unsymmetrisch aufgebaut sein können, ist die Messung von mindestens zwei aktiv geschalteten IGBTs notwendig, um die maximale Störaussendung zu ermitteln.

Folgende Betriebsfälle sind zu messen:

- Messung mit aktiven Top Side IGBT eines Brückenzweiges
- Messung mit aktiven Bottom Side IGBT eines Brückenzweiges

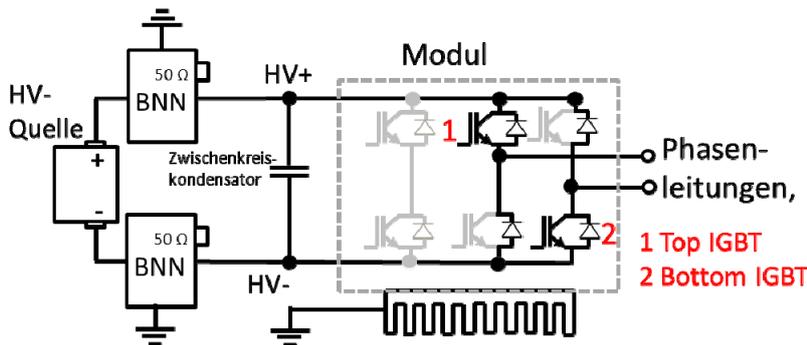


Bild 4: Darstellung der aktiven Schalter und des Anschlusses zur Last im vereinfachten Messaufbau

Ein Top Side IGBT schaltet von HV+ auf die Phasenleitung, ein Bottom Side IGBT schaltet zwischen Phasenleitungsanschluss und HV-.

Die Ansteuerschaltung des Gates des aktiven Halbleiterschalters muss so ausgelegt sein, dass die Schaltung in keinem Betriebszustand die vom Wechselrichtermodul verursachten Störpegel erreicht.

Die Leiterplatte mit der Ansteuerschaltung muss so platziert werden, dass die Verkopplung mit dem Modul so gering wie möglich ist.

Für die Untersuchungen sollte die Beschaltung des Testaufbaus soweit möglich mit der der Applikation im Fahrzeug übereinstimmen.

2.6 Messpunkte und Messgrößen

| Messung | Gleichtaktstörstrom | Gegentaktstörstrom | Störspannung |
|--------------------------------|---|--|---|
| Traktionsseite / Eingangsseite | Stromzangen summarisch über beide Hochvoltleitungen | Stromzange über einzelne Hochvoltleitung | Messabgang der BNN bis 108 MHz |
| Lastseite / Ausgangseite | Stromzangen summarisch über beide Lastleitungen | Stromzange über jeweils eine Lastleitung | hochohmig abgeschlossener Rohrkoppler als Spannungssonde bis 30 MHz |

Tabelle 1: Übersicht über Messgrößen und Messmittel an verschiedenen Messpunkten

Funktional und auch messtechnisch sind Traktions- und Lastseite zu unterscheiden. Für die Bewertung der Störungen können an beiden Seiten sowohl Störstrom- als auch Störspannungsmessungen durchgeführt werden.

Zur Bestimmung der relevanten leitungsgebundenen Störgrößen kommen verschiedene Messmittel zum Einsatz. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt.

3. Analyse verschiedener Einflussfaktoren im Prüfaufbau

3.1 Anzahl der aktiven Schalter

Ein wesentlicher Unterschied des vereinfachten Aufbaus zum dreiphasigen Betrieb ist die Anzahl der aktiven Schalter. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden an einem Messaufbau mit Motor im dreiphasigen Betrieb und Belastungsmaschine Störaussendungsuntersuchungen durchgeführt.

Für die Vergleichsmessung wurde ein IGBT statisch eingeschaltet und ein zweiter eines anderen Brückenweiges mit der nominalen Taktfrequenz weiterbetrieben. Der Motor blieb als induktive Last erhalten. Der Laststrom fließt somit bei stehendem Rotor über zwei Statorwicklungen des Motors.

Im Bild 5 ist zu sehen, dass die Charakteristik der Störaussendung erhalten bleibt. Die tendenziell höhere Störaussendung für den dreiphasigen Betrieb resultiert vor allem aus der größeren Anzahl aktiver Schalter der damit insgesamt höheren Taktrate. Die unterschiedlichen Rauschpegel ergeben sich aus den unterschiedlichen Dämpfungseinstellungen.

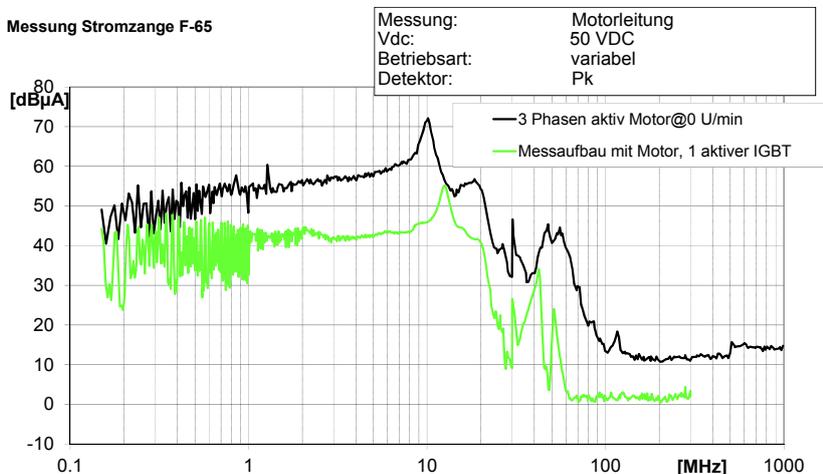


Bild 5: Vergleich der Störaussendung, dreiphasiger Betrieb sowie Aufbau mit einem aktiv geschaltetem IGBT und Motor als induktive Last

3.2 Einfluss der Gleichtaktimpedanz zur Last auf die Emissionscharakteristik

Für den vereinfachten Messaufbau wurde der Motor durch eine Spule mit magnetischem Kern ersetzt. Ist der Kern leitend mit der Bezugsebene verbunden, ergeben sich vergleichbare Verhältnisse wie in der Applikation für den Gleichtaktstörpfad an der Last, der über die Kapazität der Windungen zum Kern bestimmt wird.

Für verschiedene E-Maschinen im Traktionssystem ergeben sich aufbaubedingt unterschiedliche Koppelkapazitäten bis zu 20 nF zur Bezugsmasse. Entsprechend der Größe dieser Kapazität ergeben sich unterschiedlich hohe Gleichtaktstörströme. In Bild 6a ist der Einfluss dieses Störstrompfades auf die Gleichtaktstörströme auf den Traktionsleitungen aufgezeigt, in Bild 6b entsprechend für die Phasenleitungen. Die Höhe dieser Koppelkapazität lässt sich am vereinfachten Aufbau mit zusätzlichen diskreten Kapazitäten an der Last bei Bedarf applikationsnah anpassen.

Die nominale parasitäre Kapazität der verwendeten Last beträgt 1 nF.

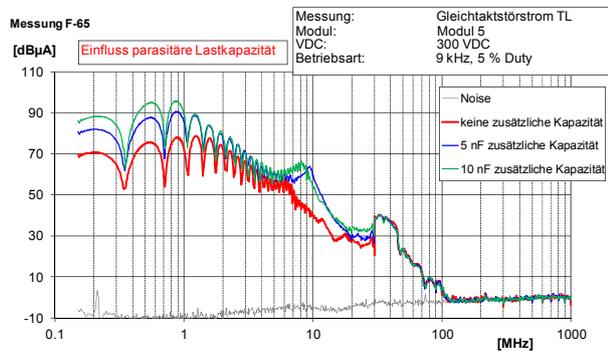


Bild 6a: Einfluss der parasitären Kapazität der Last nach Bezugsmasse auf die Gleichtaktstörstrom auf den Traktionsleitungen

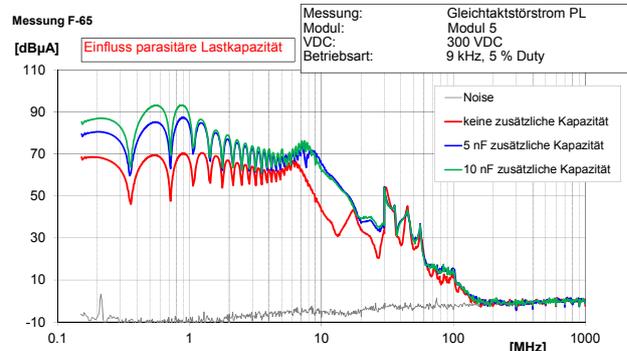


Bild 6b: Einfluss der parasitären Kapazität der Last nach Bezugsmasse auf die Gleichtaktstörstrom auf den Phasenleitungen

Bild 6: Einfluss der Gleichtaktimpedanz der Last auf die Störaussendung

3.3 Einfluss der Hochvoltspannung

Die verwendete Hochvoltspannung beeinflusst erwartungsgemäß die Störaussendung. Am deutlichsten wirkt sich dieser Einfluss bei Messungen mit der BNN an der Traktionsseite aus. Hier erhöhte sich der Störpegel bei den getesteten Modulen um bis zu 9 dB bei Variation der Hochvoltspannung von 100 V auf 400 V.

3.4 EMV-relevante Parameter der Ansteuerung

Die Ansteuerung der Gates der IGBT's erfolgt in der Applikation über spezielle Treiberschaltkreise und Booster-Schaltungen. Weiterhin sind im Allgemeinen Überspannungsschutzdioden und ein Kurzschlusschutz integriert. Diese Beschaltung ist auch im vereinfachten Aufbau vorhanden. Hier allerdings nur für 2 Schalter. Damit wird auch die notwendige Anzahl der Gate-Spannungen reduziert.

Die Schaltgeschwindigkeit kann über Gate-Vorwiderstände oder RC-Netzwerke für Ein- und Ausschaltvorgang eingestellt werden. Für die Umsetzung der Ansteuerung im vereinfachten Messverfahren sind – soweit bekannt – die Werte aus der Applikation zu nutzen. Für eine rückwirkungsfreie Ansteuerung empfiehlt es sich, den Anschluss des Gates und den Hilfsanschluss zum Emitter über eine ausreichend dimensionierte und symmetrische Gleichtaktdrossel zu entkoppeln.

Im dreiphasigen Umrichterbetrieb variiert die Pulsbreite je Schalter. Im vereinfachten Aufbau wird nur mit einem festen Tastverhältnis gemessen, um die Ansteuerungsschaltung so einfach wie möglich zu halten.

Mit dem Fokus auf eine Vereinfachung der Anforderungen bietet sich eine PWM mit einer möglichst kurzen Einschaltdauer an. Dadurch werden die Anforderungen an Kühlung und die Leistungsfähigkeit der Spannungsversorgung signifikant minimiert. Im aviierten Bereich des Tastverhältnisses unterscheiden sich die Störpegel nur minimal (Bild 7).

Die Taktrate sollte applikationsabhängig gewählt werden.

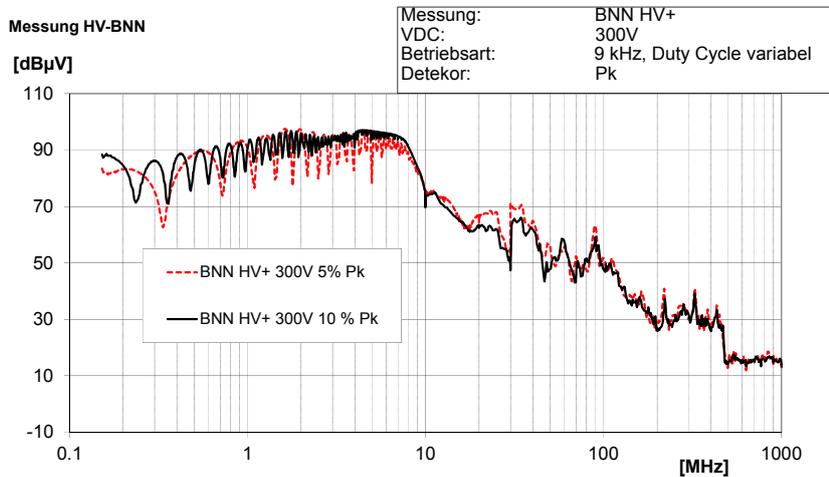


Bild 7: Einfluss des Tastverhältnisses auf die Störaussendung

3.5 Modulvergleich

Mit dem Verfahren wurde die Störaussendung verschiedener Wechselrichtermodule verglichen. Ergeben sich hier unter gleichen Randbedingungen unterschiedliche Störaussendungskurven, sind diese nur dem Aufbau der Module geschuldet. Somit können verschiedene Modulvarianten verglichen werden.

Für vergleichende Messungen zum Nachweis der Eignung des vorgeschlagenen Ansatzes standen spezielle EMV-optimierte Prototypen von IGBT-Modulen zur Verfügung. Die hier integrierten unterschiedlichen Maßnahmen zur EMV-Optimierung wirken sich auf die Gleichtaktstörpfade aus.

In Bild 8 ist der Vergleich der Gleichtaktstörströme auf den Traktionsleitungen dargestellt. Es wurden jeweils die Maximalwerte aus den Messungen von Top und Bottom Side IGBT zusammengefasst.

Modul 1 enthält keine Optimierungen, die Module 2 – 4 sind in Bezug auf die internen, aufbaubedingten Kapazitäten optimiert.

Es wurden folgenden Optimierungen durchgeführt:

- Modul #3: niedrige Ausgangskapazität, unsymmetrische Kapazitäten zu HV+ und HV-
- Modul #2, niedrige Ausgangskapazität, symmetrische Kapazitäten zu HV+ und HV-
- Modul #4, niedrige Ausgangskapazität, symmetrische Kapazitäten zu HV+ und HV- mit zusätzlichen internen Kondensatoren

Die optimierten Varianten zeigen im Bereich von 10 MHz bis 150 MHz eine teilweise deutlich geringere Störaussendung.

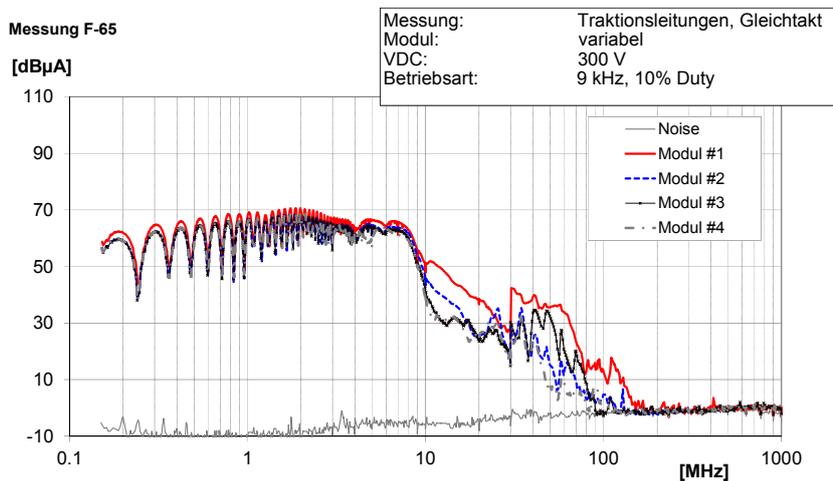


Bild 8: Vergleich des Gleichtaktstörstromes verschiedener Module unter gleichen Randbedingungen

3.6 Zusammenfassung

Die Messungen zeigen, dass sich auf Basis des hier vorgestellten Verfahrens unter normierten Bedingungen EMV-Messungen für Halbleitermodule durchführen lassen. Es sind sowohl Störströme als auch Störspannungen sowie Gleich- und Gegentaktanteile der Störungen erfassbar. Einen zum Vorgehen bei z. B. Bustreibern vergleichbaren Bewertungsmaßstab für Halbleiter kann mit Hilfe von Messungen und noch zu definierenden Grenzwerten erfolgen. Es lassen sich auch Optimierungsmaßnahmen an der Last messtechnisch bewerten.

3.7 Ausblick

Das Messverfahren wird künftig für vergleichende Messungen an Wechselrichtermodulen genutzt. Weiterhin dient es als Basis für die Auslegung und Bewertung von Filtermaßnahmen für Traktionssysteme.

4. Literatur

- [1] Hoene, Eckart: Methoden zur Vorhersage, Charakterisierung und Filterung elektromagnetischer Störungen von spannungsgespeisten Pulswechselrichtern, Dissertation TU Berlin, VDI Verlag, 2001
- [2] Klotz, Frank: Leitungsgebundene elektromagnetische Störemissionen von Leistungshalbleitertopologien, Dissertation TU Ilmenau, Ilmenau, 1997
- [3] Igarashi, S.; Takizawa, S.; Kuroki, K.; Shimizu, T.: Analysis and Reduction of Radiated EMI Noise from Converter Systems, Electrical Engineering in Japan, Vol. 130, No. 1, 2000
- [4] Trebeck M., Körber B.: Störaussendungsmessverfahren für IGBT-Module für den Einsatz in Traktionssystemen V0.4, FTZ e.V. an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, 2013