

# Methodologie und Prüfverfahren zur EMV Qualifizierung von Leistungsmodulen

Referent: Dr. Ing.-habil. Sergey, Kochetov, BMW AG, Taunusstr. 41, 80807 München,  
sergey.kochetov@bmw.de

Co-Referent und Co-Autor: Thomas Smazinka, Fraunhofer IISB, Schottkystr. 10, 91058  
Erlangen, thomas.smazinka@iisb.fraunhofer.de

## 1 Einleitung

Für Hersteller von leistungselektronischen Systemen sind Qualifizierungsergebnisse hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eines einzelnen Leistungsmoduls oft kein primäres Entscheidungskriterium für die Auswahl bzw. den Vergleich unterschiedlicher Lösungsangebote. Dennoch beeinflussen Leistungsmodule als primäre Störquelle auch insbesondere durch ihre integrierten Leistungshalbleiter die Störemission in einem erheblichen Maße. So können sich zum Beispiel je nach gewähltem Leistungsmodul deutliche Unterschiede im Emissionsspektrum ergeben.

Die sich daraus ergebende Diskrepanz aufgrund der technischen Notwendigkeit und einer nicht vorhandenen qualitativen Absicherung auf der Leistungsmodulebene ist letztlich der Unvergleichbarkeit zwischen den einzelnen Messergebnissen unterschiedlicher Modulhersteller geschuldet. Häufig werden innerhalb von Entwicklungsabteilungen EMV Messungen in Form eines Delta-Vergleiches unterschiedlicher Leistungsmodule verschiedener Generationen durchgeführt, welche aber keine echte Vergleichbarkeit liefern können. „State-of-the-Art“ EMV-Prüfungen werden aktuell auf Leistungsmodulebene häufig in einer vereinfachten, generischen Systemumgebung durchgeführt. D.h., das Leistungsmodul wird aktiv betrieben, dabei sind sowohl die Leistungselektronikkomponenten (Leistungsmodul, Zwischenkreis, interne Verbindungstechnik und Gehäuse) als auch die Systemumgebung (Bordnetznachbildung, E-Maschine, HV Leitungen und Gehäuse) vereinfacht und zum Teil nicht aussagefähig im Vergleich zu einem realen Fahrzeug aufgebaut. Aufgrund dieser Problematik ist es sinnvoll, zusätzliche Untersuchungen mit einem umgebungsunabhängigen Prüfverfahren durchzuführen, welches Aussagen über das reine Bauteil (Leistungsmodul) liefern kann. Innerhalb dieses Beitrags wird ein für die Leistungselektronik neuartiges passives Prüfverfahren vorgestellt, welches eine umgebungsunabhängige Charakterisierung von unterschiedlichen Leistungsmodulen erlaubt.

Dieses Papier zeigt anschaulich das Potential, welches sich in einer rein passiven Leistungsmodulbewertung befindet. Innerhalb des BMBF geförderten Projektes „InSel“ treibt das Fraunhofer IISB zusammen mit der BMW AG die Forschung im Bereich der passiven Leistungsmodulmessung voran und entwickelt dazu die nötigen Grundlagen für diese spezielle Messanwendung innerhalb der Leistungselektronik. In dem Beitrag wird das all-gemeingültige Verfahren exemplarisch am Beispiel eines Fahrzeugumrichter-Modules erklärt.

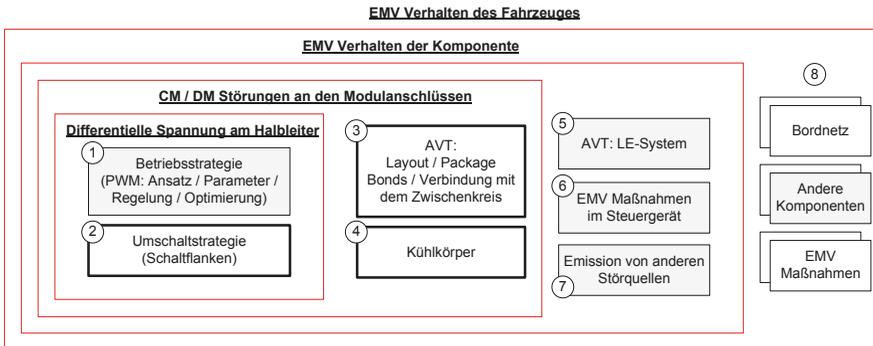
## 2 Charakterisierung der Leistungsmodule ohne Systemumgebung

Ein Leistungsmodul besteht aus den Leistungshalbleitern, einem Package sowie einem Kühlkörper. Dabei sind die Leistungshalbleiter in der Regel auf einem DCB-Layout (direct copper bonding) durch eine Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) mithilfe von Bonddrähten verbunden. Die Leistungshalbleiter sind aktive, nicht lineare Bauelemente mit ei-

nem komplexen Umschaltverhalten und verschiedenen, spannungsabhängigen, parasitären Kapazitäten. Im Gegensatz zu den Halbleitern besitzen die restlichen Bauteile des Leistungsmoduls sowie die AVT des leistungselektronischen Systems (LE-Systems) mit dem HV-Fahrzeugbordnetz ein passives lineares Verhalten. Aus den obengenannten Fakten ergibt sich somit die Möglichkeit der hierarchischen Darstellung eines Koppelpfades vom Leistungsmodul bis hin zum EMV-Fahrzeugverhalten (siehe Abbildung 1). Die Betriebs- (1) und Umschaltstrategie (2) definiert eine differentielle Spannung und einen Strom am Halbleiter, deren Wellenform sehr stark von den nichtlinearen Eigenschaften des Halbleiters sowie der Gate Unit abhängig ist. Die ursprünglich differentiellen Störgrößen werden über passive Verbindungsstrukturen getrieben und in Gleich- und Gegentaktstöranteile aufgeteilt. Diese Teilung wird vollständig durch die linearen Eigenschaften der AVT (3) und der Kühlkörperanbindung (4) definiert, da alle gleichaktwirkenden, parasitären Kapazitäten und Induktivitäten linear sind. Die Ausbreitungen der Störgrößen über das Fahrzeug durchlaufen im Weiteren die Verbindungsstrukturen im LE-System sowie des Fahrzeugs mit seinem wirksamen Rückpfad. Die in der Einleitung genannte Testanordnung mit einer generischen Systemumgebung betrachtet mehrere Faktoren, die in der Abbildung 1 grau markiert sind. Da der Leistungsmodulhersteller diese Informationen in der frühen Projektphase nicht besitzt, können diese bisher vom Fahrzeughersteller nur generisch bzw. nicht exakt berücksichtigt werden. Deshalb wird eine passive Charakterisierung des Leistungsmoduls in Form einer Gegentakt-Gleichtakt Transferadmittanz zwischen den Halbleitern und den Modulanschlüssen bezüglich des Kühlkörpers mit folgender Definition vorgeschlagen:

$$I_{CM} = Y_t(j\omega) \cdot U_{DM}, \tag{1}$$

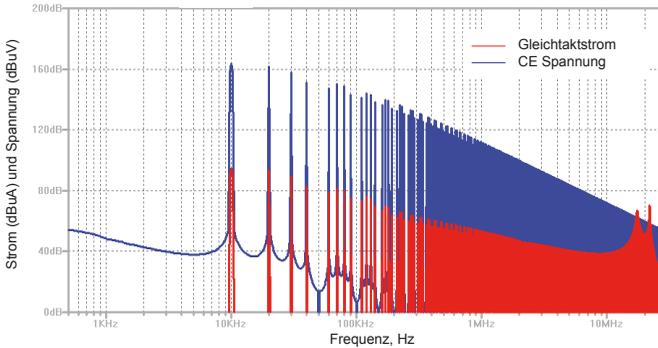
wobei  $U_{DM}$  ein differentieller Einspeisepunkt (z. B. Spannung zwischen Kollektor und Emittter des IGBTs) und  $I_{CM}$  ein Gleichtakt Messpunkt mit Rückpfad über den Kühlkörper ist.



**Abbildung 1:** Einflussfaktoren vom Leistungsmodul bis zum Fahrzeug

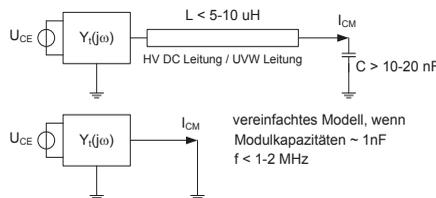
Wenn wir davon ausgehen, dass das Spannungsspektrum an den Halbleitern bekannt ist, kann der in das LE-System (1) emittierte Gleichtaktstrom als Produkt aus der Transferadmittanz (linearen Verbindungsstrukturen) und des Spektrums  $U_{DM}$  berechnet werden. Abbildung 2 stellt ein Beispiel dieses Zusammenhangs dar. Das Produkt der gemessenen Transferadmittanzkurve (siehe Abbildung 12) und des Spannungsspektrums entspricht einer Blockkommutierung eines Fahrzeuginverters. Es ist gut zu erkennen, dass der vor-

geschlagene Ansatz eine frühzeitige EMV Charakterisierung ohne kompletten Kommutierungskreis ermöglicht. Die EMV Bewertung der Ansteuerung mit der Betriebsstrategie und die EMV Qualifizierung des Leistungsmoduls mit den Verbindungsstrukturen der Modulbindung im LE-Systems sind gleichwertig anzusehen. Jedoch liegt der erste Teil der Problematik nicht im Aufgabenbereich des Modulherstellers, sondern in der Verantwortung der Funktions- und Hardwareentwicklung des Anwenders. Somit ist die Erweiterung der EMV Qualifizierung um ein passives Messverfahren auf Leistungsmodullebene in einer früheren Projektphase höchst sinnvoll.



**Abbildung 2:** Exemplarische Zusammenstellung des Spektrums einer differentiellen Halbleiterspannung mit dem zugehörigen Gleichtaktstrom über die Phasenleitung

Neben der gut reproduzierbaren Messbarkeit liefert die vorgeschlagene Transferadmittanzmessung eine klare physikalische Interpretation wie auch des Weiteren einen definierten Zusammenhang mit den Streuparametern [2]. Im unteren Frequenzbereich (siehe Abbildung 12) weisen übliche Leistungsmodullayouts noch keine Resonanzen auf. Somit ist hier die Reihenkapazität in Form der Transferadmittanz messbar. In diesem Frequenzbereich gilt die Transferadmittanz als Maß für alle gleichaktwirksamen Kombinationen der parasitären Kapazitäten. Da die Y-Kapazitäten sowie die parasitären Kapazitäten der E-Maschine wesentlich größer sind als die parasitären Kapazitäten des Leistungsmoduls, wird die Transferadmittanz das EMV Verhalten in einer Fahrzeugumgebung physikalisch widerspiegeln (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Approximation Gleichtaktlast bei Frequenzen unter 1-2 MHz

Im oberen Frequenzbereich stellt die Transferimpedanz das Resonanzverhalten des Leistungsmoduls dar. Die eigenen Modulresonanzen korrelieren zum Teil auch mit den bekannten Resonanzfrequenzen eines Gesamtfahrzeuges.

### 3 Prüfverfahren

Das Prüfverfahren, welches für die Charakterisierung und die Vergleichbarkeit von Leistungsmodulen entwickelt wurde, basiert auf den Möglichkeiten der modernen vektoriierten Netzwerkanalyse (VNA), bei welcher ein „Indirektes Verfahren“ [1] angewendet wird. Dabei werden die Messgrößen aus den hochfrequenten Wellengrößen auf der Basis des Reflexionsfaktors  $\Gamma$  berechnet. Die Gleichungen (2) bis (4) zeigen die möglichen Werte des Reflexionsfaktors in Abhängigkeit der zu messenden Impedanz  $Z_W$ .

$$(Totalreflexion) \Gamma = 1 \mid Z_W = \infty \quad (2)$$

$$(Anpassung) \Gamma = 0 \mid Z_W = Z_0 \quad (3)$$

$$(Totalreflexion): \Gamma = -1 \mid Z_W = 0 \quad (4)$$

Grundsätzlich gibt es hinsichtlich der Anzahl der verfügbaren Ports eines VNAs unterschiedliche Möglichkeiten in Bezug auf die Messdurchführung.

Um die Messung von 2 unsymmetrischen Toren (balanced 2-Port) zu realisieren, können 4 physikalische Ports des VNA (siehe Abbildung 4a) mittels der im Messinstrument enthaltenen „Mixed-mode S-Parameter Funktion“ beliebig stimuliert bzw. mathematisch umgeformt werden. Dadurch ist es möglich insgesamt 16 „Mixed-mode S-Parameter“-Funktionen einzusetzen:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} & S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} & S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} & S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} & S_{cc21} & S_{cc22} \end{pmatrix}.$$

Für die alternative Variante wird lediglich ein 2-Port VNA benötigt (siehe Abbildung 4b), dabei wird z.B. die Generierung eines differentiellen Stimulus über eine Balunschaltung realisiert. Vom Prinzip her kann somit durch den Einsatz eines Baluns aus einem unsymmetrischen Tor (single-ended) ein symmetrisches Zweitor (balanced) entstehen (siehe Abbildung 5). Nach der schaltungstechnischen Auslegung des Baluns ist diese Methode relativ einfach in der Handhabung.

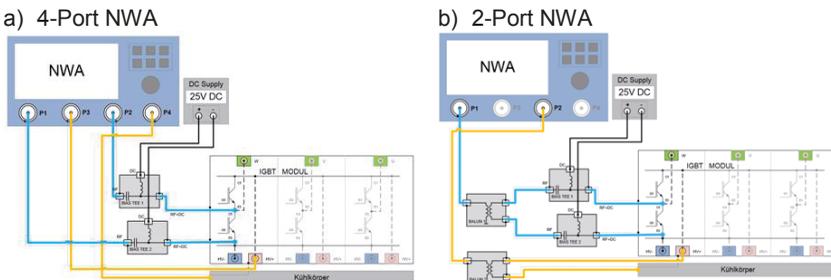
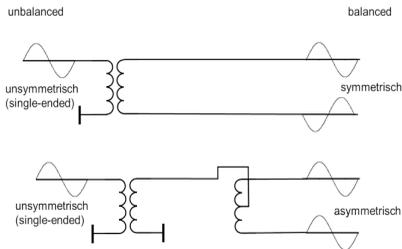
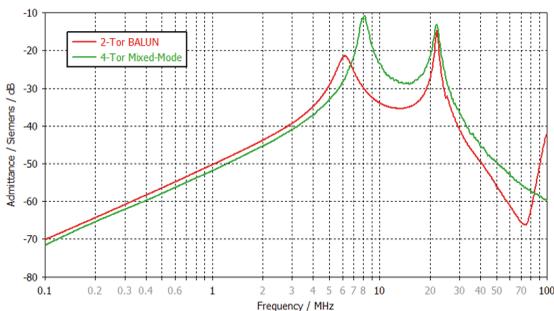


Abbildung 4: Messaufbau mit 2 und 4-Port NWA



**Abbildung 5:** Möglichkeiten des Stimulus mittels Balunschaltschaltungen

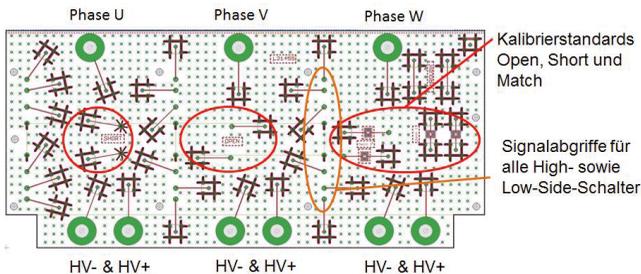
Es bleibt noch festzuhalten, dass grundsätzlich beide Möglichkeiten a) und b) gleichwertig angewendet werden können, jedoch sind Messungen nur innerhalb eines Verfahrens exakt vergleichbar, wie es das Ergebnis der Messung in Abbildung 6 zeigt.



**Abbildung 6:** Vergleich 2-Port (Balun) 4-Port Messung

### 3.3 Prüfhalterung (Adapterplatine)

Um ein Leistungsmodul mit einem VNA zu verbinden bedarf es eines komplexen Kontaktierungsadapters mit exakt definierten Eigenschaften. So muss es möglich sein, den differentiellen Kontaktierungspunkt am jeweiligen Leistungsschalter sowie den Auskopelpfad beliebig zu wählen, um Transmissions- und Reflektionsparameter zu messen.



**Abbildung 7:** Prüfhalterung für ein 3-ph. Leistungsmodul mit Kalibriermöglichkeit

Wie in der Abbildung 7 ersichtlich, befinden sich neben allen Kontaktierungspunkten für die Messung der Transmissions- und Reflektionsparameter auch die Kalibrierstandards TOSM (Through-Open-Short-Match) sowie die OS Kompensationsmöglichkeiten auf dem Adapter. Somit ist es möglich Unterschiede der Signallaufzeiten aufgrund von Chargenschwankungen bei der Herstellung des Adapters zu kompensieren. Zur Verbindung der Prüfhalterung mit dem Leistungsmodul dienen einzelne Hohlzylinder, welche mittels Schrauben für die nötige Stabilität sorgen. Da aber auch das Kühlkörperpotential einen entscheidenden Einfluss hinsichtlich der Bewertung besitzt (siehe Abbildung 1), ist dieser Anschluss ebenfalls elektrisch exakt allen anderen Anschlüssen gleichwertig ausgeführt.

### 3.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung des VNAs hat fundamentalen Einfluss auf die gemessenen Ergebnisse. Dabei sind exakt identische Signallaufzeiten vom Messinstrument (VNA) zum jeweiligen Signalabgriff des Leistungsmoduls entscheidend. Die sequentielle Anwendung des Kalibrierstandards UOSM in Verbindung mit einer „Fixture Compensation“ ermöglicht die Berücksichtigung der auf der Prüfmittelhalterung vorliegenden Verhältnisse. Dadurch kann die Kompensation der Signallaufzeiten genau bis zum Anschlusspin des Leistungsmoduls erfolgen und liefert bis ca. 110 MHz eine ausreichende Genauigkeit. Eine positive Überprüfung der Kalibrierung/Kompensation ist in der Abbildung 8 in Form von 3 Smith-Diagrammen dargestellt und durch Positionierung der Marker im Frequenzbereich von 100 kHz bis 110 MHz gut visualisiert.

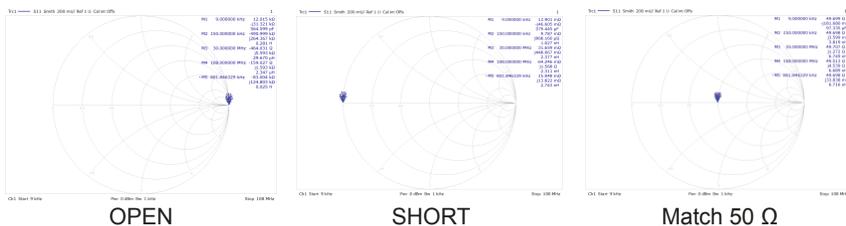
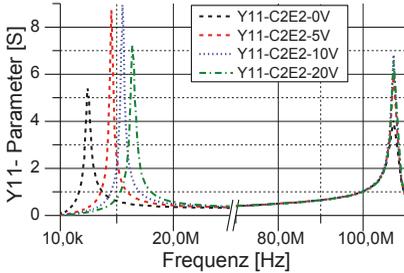


Abbildung 8: Ergebnis der Überprüfung der Kalibrierung (OSM) an einem Tor

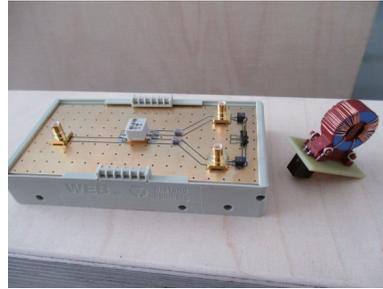
### 3.3 Balun und BiasTee

Grundsätzlich kann ein Balun (balanced to unbalanced) durch entsprechende Verschaltung für unterschiedliche Aufgaben in der HF-Messtechnik eingesetzt werden (siehe dazu Abbildung 5). So durchlaufen beispielsweise DM- (Differential Mode) Anteile einen als Strombalun geschalteten Bauteil nahezu ungehindert, während CM- (Common Mode) Anteile des Signals unterdrückt bzw. abgeleitet werden [4]. Der Balun ermöglicht in der passenden Schaltung als Spannungsbalun (siehe Abbildung 5) aufgrund des Transformatorprinzips einen Übergang von einem unsymmetrischen Tor auf ein symmetrisches Zweitor. Die in Abbildung 11 gezeigten Messergebnisse (Y21 Parameter) wurden mit einer symmetrischen 1:1 Balunschaltung realisiert. Aufgrund der spannungsabhängigen Kapazität einer Kollektor-Emitter-Strecke eines Leistungsschalters wurde das Messverfahren um die Möglichkeit einer DC-Einspeisung mit einem Bias-Tee erweitert. Somit ist es möglich den Leistungsschalter entsprechend „Vorzuspannen“ und die spannungsab-

hängige Kollektor-Emitter Kapazität und die damit verbundene Änderung der Resonanzfrequenz zu berücksichtigen. Die spannungsabhängige Änderung der Resonanzfrequenz ist am Beispiel einer Reflektionsmessung in Abbildung 9 dargestellt. Des Weiteren ist in Abbildung 10 ein Beispiel für eine kombinierte BiasTee Schaltung mit einem Balun abgebildet sowie der nötigen Entkopplung.



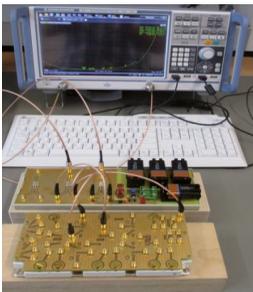
**Abbildung 9:** Spannungsabhängige Resonanzfrequenz eines IGBTs (C-E)



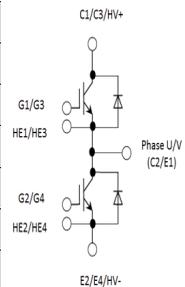
**Abbildung 10:** Kombinierte BiasTee Schaltung mit Balun

#### 4 Anwendung des Prüfverfahrens zur Messung eines Invertermoduls eines Fahrzeugumrichters

Innerhalb des vom BMBF geförderten Projektes „InSel“ werden die entstehenden Messdaten in Bezug auf die passiven Messungen an Leistungsmodulen vorzugsweise als Y21-Parameter (Transferadmittanz) dargestellt, da dies enorme Vorteile bei der Interpretation der Ergebnisse aufgrund des identischen Richtungsbezuges in Hinsicht auf die Störproblematik hat. Die Vorteile dieser Vorgehensweise wurden bereits kurz im Abschnitt 2 erläutert. Der in Abbildung 11 dargestellte Prüfplan zeigt den Umfang der Messungen an einer Halbbrücke eines 3-phasigen Leistungsmoduls bezüglich der Transmissionsmessungen.



Nr.	Parameter Y21	Port 1	Port 2
1	Y21_CE1_U/KK	C1 / HE1	Phase U / KK
2	Y21_CE2_U/KK	HE1 / E2	Phase U / KK
3	Y21_CE1_HVp/KK	CE1	HV+ / KK
4	Y21_CE2_HVp/KK	Ph U / HE2	C1 (HV+) / KK
5	Y21_CE1_HVm/KK	C1 / HE1	E2 (HV-) / KK
6	Y21_CE2_HVm/KK	Ph U / HE2	E2 (HV-) / KK



**Abbildung 11:** Messplatz zur passiven Leistungsmodul Bewertung mit Prüfplanauszug

In Abbildung 12 wurden die Ergebnisse einer Halbbrücke eines Prüflings in einem Diagramm zusammengefasst, dabei ist die Schwankungsbreite der einzelnen Messpfade gut zu erkennen. In der dargestellten Form lassen sich mögliche Asymmetrien innerhalb eines Leistungsmodules leicht detektieren. Des Weiteren können selbstverständlich

auch unterschiedliche Module zueinander verglichen oder Iterationsschritte in der Entwicklung dokumentiert werden, um nur einige Möglichkeiten dieses ausbaufähigen Messverfahrens zu nennen.

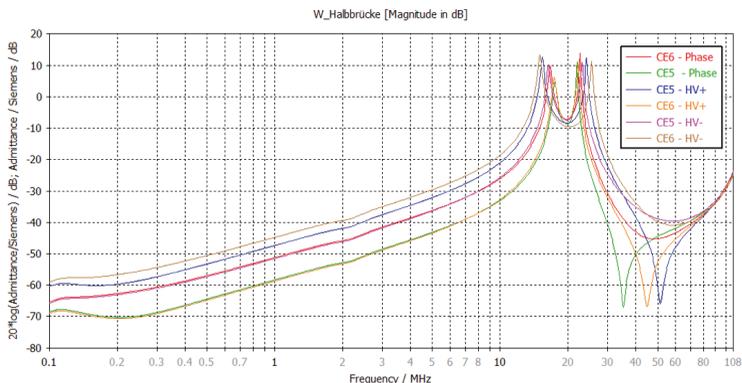


Abbildung 12: Messung der Transferadmittanz einer Halbrücke eines Invertermoduls

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt den aktuellen Stand der Entwicklungen innerhalb des F&E Förderprojektes „InSeL“ hinsichtlich der theoretischen Ansätze sowie der Messtechnik zur Bewertung von Leistungsmodulen. Grundsätzlich ist die Messunsicherheitsbetrachtung bezüglich der Beiträge des VNAs sowie aller nötigen Hilfsschaltungen wie Balun und BiasTee noch zu ermitteln. Des Weiteren müssen auch die Unsicherheiten von Schwankungen der Messbedingungen noch weiter erforscht werden. Es ist ebenso wünschenswert die Bias Spannung noch deutlich über 25 VDC zu erhöhen, um die spannungsabhängigen, parasitären Kapazitäten eines IGBT näher an seinen realen Betriebsbedingungen zu berücksichtigen. Aktuell wird am IISB an einer verbesserten Version der Hilfsschaltungen gearbeitet. Ein wichtiger Punkt ist auch die Erforschung des Vertrauensbereiches der Aussagen, welche mit dem hier vorgestellten „passiven Prüfverfahren“ gewonnen werden. Dabei ist die Korrelation zu den heute genormten Prüfverfahren, wie diese in CISPR 25 [3] beschrieben sind, zu ermitteln.

An „InSeL“ beteiligt sind im Übrigen ein Industriekonsortium mit den Firmen BMW, Lenze, Bosch, Infineon und EPCOS sowie das ISEA an der RWTH Aachen University und die Fraunhofer Institute LBF und IISB. Das Projekt hat eine Laufzeit von 3 Jahren und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



## 7 Literatur

- [1] DIN EN 55017 (VDE 0565-17):2012-04 EN 55017:2011
- [2] Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques, 2nd Edition George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde
- [3] CISPR 25 Ed. 4 CISPR/D/425/CDV (COMMITTEE DRAFT FOR VOTE) Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers
- [4] Electromagnetic Compatibility Handbook by Kenneth L. Kaiser ISBN-10: 0849320879