

Simulationsgestützte Analyse von transienten leitungsgebundenen Störungen im elektrischen Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen

Dipl.-Ing. Dipl.-Inf. Simon Niedzwiedz, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

1 Einleitung

Mit dem steigenden Grad der Elektrifizierung des Antriebsstrangs moderner Kraftfahrzeuge und durch den Einsatz immer leistungsstärkerer Umrichter und Maschinen nimmt das elektrische Störpotential innerhalb des Gesamtsystems Kraftfahrzeug beständig zu. Insbesondere durch die vom Umrichter zu liefernden hohen Spannungen und Leistungen, mit PWM-Frequenzen von 20 kHz und mehr, sowie durch die Ein- und Ausschaltvorgänge steigt das Störpotential von transienten Vorgängen im Gesamtbordnetz deutlich an. Als besonders kritisch sind hierbei die Rückwirkungen auf das Hochvolt-DC-Bordnetz (HVDC) zu betrachten, da diese sich über den Koppelpfad der verschiedenen DC/DC-Wandler, beispielsweise, leicht auf das Niedervolt-DC-Bordnetz (LVDC) übertragen können. Dort können die hochenergetischen Transienten sowohl direkt – leitungsgebunden – zu Störungen in der Elektronik führen, als auch indirekt über elektromagnetische Abstrahlung durch die nicht geschirmten Leitungen im LVDC-Bordnetz. Diese Störpotentiale müssen daher genau analysiert werden, um Gegenmaßnahmen entwickeln und bewerten zu können. Entsprechende standardisierte Messverfahren werden, zum Beispiel, durch die Normen ISO 7637 [1] und CISPR25 [2] definiert. Da diese Messungen oft sehr zeit- und kostenintensiv sind, besonders wenn sie wiederholt an Hardwareprototypen durchgeführt werden müssen, bietet es sich an Vorabanalysen simulationsgestützt durchzuführen, um neue Komponenten oder Maßnahmen schnell bewerten zu können. Hierfür werden hinreichend präzise Simulationsmodelle der beteiligten Komponenten und des Gesamtsystems (Bild 1) benötigt.

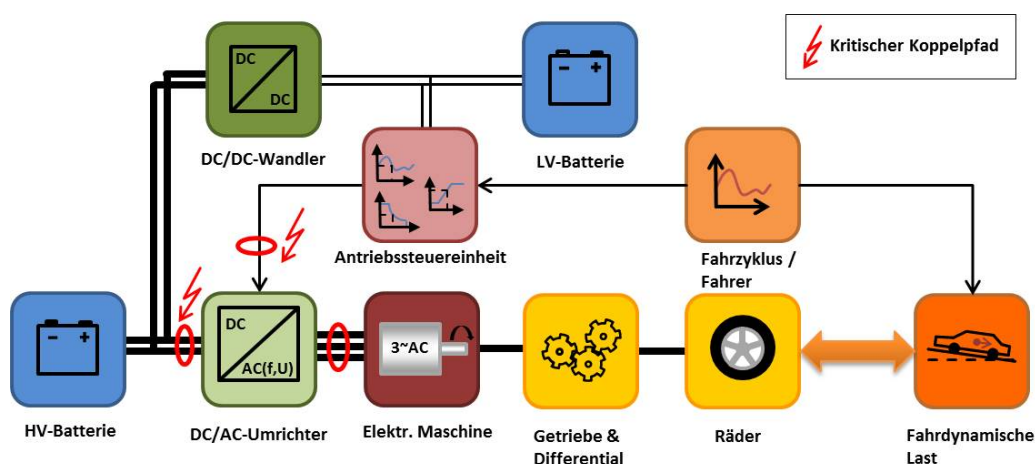


Bild 1: Kritische Koppelpfade im Gesamtsystem eines elektrischen Kfz-Antriebsstrangs

Ein entsprechendes Verfahren zur Modellbildung und simulationsgestützten Analyse von transienten Störungen im (teil-)elektrischen Antriebsstrang soll in diesem Beitrag vorgestellt werden.

2 Modulare Modellbibliothek für (teil-)elektrische Kfz-Antriebsstränge

Die Grundlage des simulationsgestützten Analyseverfahrens bildet eine Bibliothek modularer Simulationsmodelle, die speziell für den Anwendungskontext von (teil-) elektrischen Kraftfahrzeugen entwickelt und an die Anforderungen der standardisierten EMV-Prüfungen angepasst wird. Die einzelnen Komponentenmodelle innerhalb der Modellbibliothek werden hinreichend präzise modelliert und anschließend in einem zweistufigen Verfahren verifiziert und parametrisiert, um eine hohe Modellgüte sicherzustellen.

2.1 Entwicklung einer modularen Modellbibliothek

Der Grundgedanke bei der Entwicklung von Modellen sollte immer sein, dass die Modellierung so einfach wie möglich und damit nur so genau wie unbedingt nötig ist. Da hier der Hauptanwendungszweck die Analyse elektrischer Vorgänge im Kfz-Antriebsstrang und Kfz-Bordnetz ist, werden alle anderen physikalischen Domänen, sofern dies möglich ist, ignoriert oder Modelle hierfür lediglich durch ihr funktionales Verhalten modelliert. Der Aufbau der Modellbibliothek und die Entwicklung der Modelle selbst erfolgen, in Anlehnung an die Grundprinzipien objektorientierter Programmierung (OOP), nach einem modularen aber hierarchischen Konzept [3] [4]. Dies bedeutet, dass jedes Modell einer sogenannten Komponentenklasse zugeordnet ist, deren physikalische und logische Schnittstellen hart definiert sind, um die modulare Verwendung innerhalb der gesamten Modellbibliothek zu sichern. Bei der Entwicklung weiterer Modelle dürfen dann lediglich noch Schnittstellen hinzugefügt oder von logisch in physikalisch umgewandelt werden. Der innere Aufbau eines Modells ist jedoch dem Entwickler überlassen, sofern er sicherstellt, dass alle definierten Schnittstellen bedient werden. Dies ermöglicht es auf sehr komfortable Weise für die verschiedenen Anwendungsfälle neue Abstraktionsebenen der Modelle zu erstellen, deren Kompatibilität mit den übrigen Modellen der Bibliothek implizit sichergestellt wird. So entsteht innerhalb der einzelnen Modellklassen eine Abstraktionshierarchie, die meist bei einfachen Verhaltensmodellen beginnt und sich dann immer mehr der Abbildung der realen physikalischen Struktur annähert. Dieses Entwicklungskonzept hat den entscheidenden Vorteil, dass bei der Analyse einer bestimmten Komponente immer nur diese als präzises Modell verwendet werden muss, während für die übrigen Komponenten sehr niedrige Abstraktionslevel verwendet werden können. Darüber hinaus können durch den modularen Ansatz durch Kombination verschiedener Komponentenmodelle neue Modelle strukturell aufgebaut werden, die Verbesserungen oder Adaptionen der beinhalteten Komponenten direkt übernehmen. Eine diesem Konzept entsprechende Modellbibliothek für (teil-)elektrische Fahrzeuge wurde bereits entwickelt und wird kontinuierlich ergänzt und verfeinert. Zusätzlich zu den Kfz-spezifischen Komponenten wurde die Modellbibliothek um Modelle der Komponenten und Messausrüstung ergänzt, welche bei den standardisierten EMV-Analysen Anwendung finden. Somit können nicht nur die Auswirkungen neuer Kfz-Komponenten auf das elektrische Verhalten des Gesamt-Bordnetzes analysiert werden, sondern auch direkt die notwendigen Standardtests simuliert und beobachtet werden.

2.2 Verifikation und Basisparametrierung der Komponentenmodelle

Um die korrekte Funktion der einzelnen Modelle der Modellbibliothek sicherzustellen, werden alle neu entwickelten Modelle in einem zweistufigen Prozess verifiziert und parametrierung. Dazu werden die Komponenten zuerst individuell und unabhängig vom jeweiligen Einsatzkontext unter Laborbedingungen betrachtet. Dabei werden vor allem das Input-Output-Verhalten und die funktionale Charakteristik der Komponente analysiert und das Simulationsmodell entsprechend adaptiert. Das Ergebnis dieses ersten Schritts ist die Sicherstellung der korrekten Funktionalität des Modells, sowie die Erstellung einer Basiskonfiguration der Modellparameter. Von diesem Schritt profitieren vor allem Simulationsmodelle mit einer Abstraktion der physikalischen Struktur statt einer Verhaltensnachbildung.

Nachfolgend wird die spezifische Komponente in ihrer jeweiligen Einsatzumgebung im Gesamtsystem betrachtet. Zu diesem Zweck wird die Komponente als „device under test“ (DUT) in einen speziellen Komponententeststand (Bild 2) integriert.

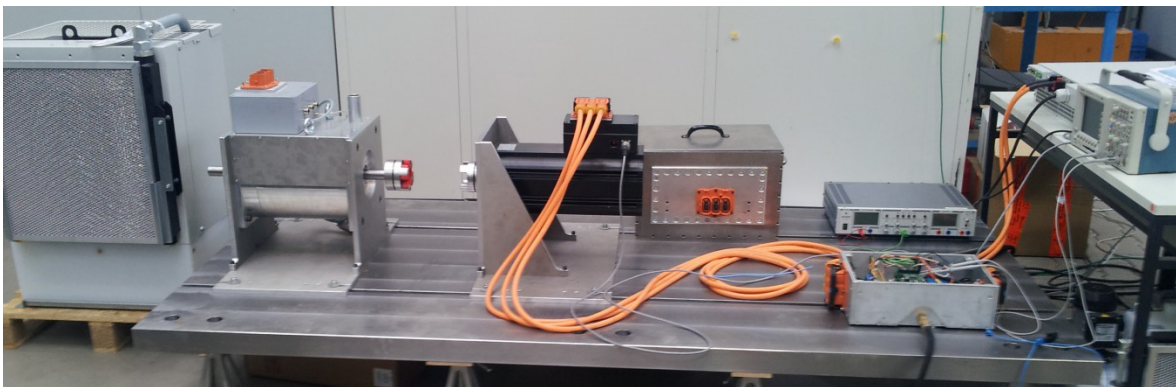


Bild 2: Komponententeststand zur Modellverifikation und Parametrierung

Dieser ist eine für leitungsgeführte Untersuchungen ausreichende Nachbildung des Antriebssystems (teil-) elektrischer Fahrzeuge, mit der Möglichkeit fahrdynamische Lasten oder Arbeitspunkte zu emulieren. Die antriebsseitigen Komponenten sind dabei modular austauschbar, sodass die Auswirkungen einzelner Komponenten unaufwändig, im Vergleich zu einem definierten Referenzsystem, analysiert und bewertet werden können. Dieses Referenzsystem dient zudem als kalibrierte Basis für die Verifikation neuer Komponentenmodelle. Der Komponententeststand ist somit als erweiterte, spezialisierte Variante eines Dynamometers zu betrachten. Ein entscheidender Vorteil gegenüber üblich verwendeten Dynamometern für Kfz-Antriebssysteme ist die unkomplizierte Möglichkeit auch das LVDC-Bordnetz zu integrieren. Dies ist besonders dann von Nutzen, wenn das Kopplungsverhalten leitungsgebundener Störungen zwischen allen drei Bordnetzebenen (HVDC, LVDC, HVAC) analysiert werden soll.

Bei der Modellverifikation wird das DUT innerhalb des Referenzsystems erneut analysiert und – wenn möglich – die gleichen Messwerte wie im ersten Prozessschritt aufgenommen, allerdings für verschiedene Arbeitspunkte, um entsprechenden Verhaltenskennlinien zu erhalten und das Modell weiter zu optimieren. Offensichtlich profitieren vor allem verhaltensbasierte Modelle von diesem zweiten Prozessschritt.

Für einige Testkomponenten – z.B. DC/DC-Wandler, DC/AC-Umrichter – ist es möglich, in beiden Verifikationsschritten dieselben Arbeitspunkte zu untersuchen. Dies ermöglicht es, den Einfluss des Gesamtsystems im Vergleich zum Laborbetrieb zu bewerten.

Dadurch kann eine Art Übertragungsfunktion für die Komponente erzeugt werden, die es dann wiederum erlaubt, die Ergebnisse von Labortests – z.B. Prüfungen auf transiente Störemissionen – auf das Gesamtsystem umzurechnen.

3 Modellierung eines Prüfaufbaus zur Erfassung transienter Emissionen

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren konzentriert sich auf die simulationsgestützte Analyse transienter leitungsgebundener Störphänomene. Hierzu werden im Vorschlag zum neuen Standard ISO7637-4 [1] verschiedene Tests hinsichtlich der Prüfung auf Störemissionen und Störfestigkeit definiert. Anhand eines ausgewählten Prüf szenarios soll das vorgestellte Verfahren im Folgenden demonstriert werden.

3.1 Standardkonformer Prüfaufbau für transiente Störemissionen

Grundlage für den Störemissionstest ist ein Prüfaufbau wie er in Bild 3 gezeigt wird.

Dieser Prüfaufbau besteht linksseitig der HV-Bordnetznachbildung (HV-LISN) aus einer HVDC-Spannungsvorsorgung (Batterie oder Netzteil) und einer optionalen Batterielast. Die HV-LISN wird mit 50 Ohm gegen die allgemeine Referenzmassefläche terminiert. Rechtsseitig wird dann das jeweilige Prüfobjekt (DUT) angeschlossen. Gemessen wird dann die differentielle Spannung zwischen den HVDC-Anschlüssen des DUT und hinsichtlich der auftretenden transienten Störemissionen bewertet.

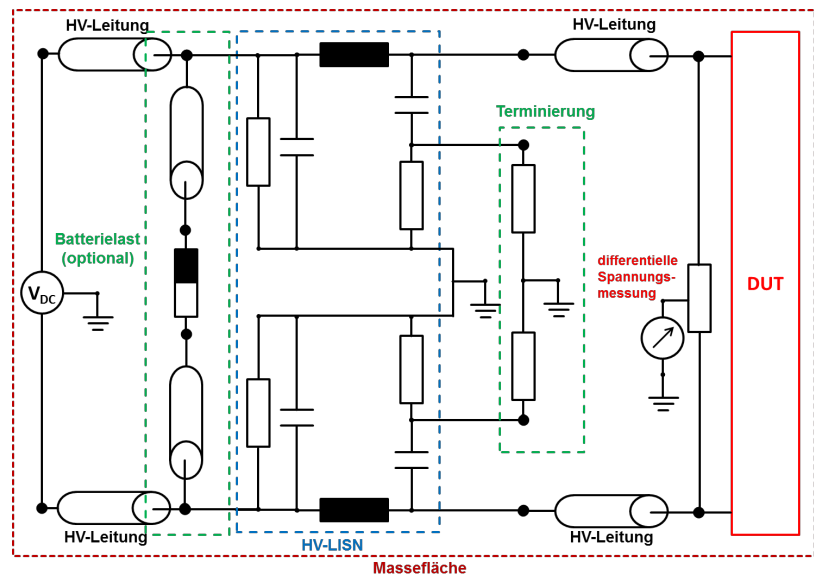


Bild 3: Prüfaufbau transiente Störemissionen nach [1]

Für diesen Beitrag wird das DUT aus einer Kombination aus Frequenzumrichter und elektrischer Maschine gebildet. Die Modellierung der elektrischen Maschine für die EMV-Untersuchungen erfolgte in Anlehnung an das in [5] vorgestellte Modell.

3.2 Modellierung eines Frequenzumrichters

Bei der Nachbildung des DC/AC-Umrichters wird der Fokus auf die Modellierung der Leistungselektronik gelegt, da diese für die elektrische Funktionalität und auch für das EMV-Verhalten im Kontext des Gesamtsystems maßgeblich ist.

Das Logikboard, welches hauptsächlich der Ausführung der Regelalgorithmen und der Generierung der PWM-Steuerbefehle für die IGBT-Treiber dient, wird lediglich als algorithmisch korrektes Verhaltensmodell erstellt. Das Treiberboard wird ebenfalls als verhaltensbasiertes Modell erstellt, da es hierbei vor allem auf die Erzeugung der korrekten Treiberspannungen und das Timingverhalten ankommt. Die Einflüsse der Spannungswandler des Treiberboards auf die LVDC-Versorgung können über eine Ripple-Modulation der Versorgungsspannung berücksichtigt werden.

Die Modellierung der Leistungselektronik erfolgt möglichst nahe an der realen physikalischen Struktur, wobei das Augenmerk hier besonders auf einer möglichst genauen Abbildung des Schaltverhaltens der IGBTs und der antiparallelen Freilaufdioden liegt, da

diese Komponenten maßgeblich das EMV-Verhalten – insbesondere hinsichtlich der Transienten – bestimmen.

Bild 4 zeigt das verwendete Diodenmodell. Es besteht einerseits aus einem Zweig mit einer idealen Diode D^* , deren Verhalten nach der bekannten Shockley-Gleichung modelliert ist, und dem Bahnwiderstand R_B . Das nichtlineare Diodenverhalten wird in seinem exponentiellen Verhalten jedoch aus Gründen der numerischen Stabilität ab einem einstellbaren Wert begrenzt und dann linearisiert stetig fortgesetzt. Der zusätzliche RC-Zweig dient der Berücksichtigung der Sperrschichtkapazität und der Recovery-Effekte der Diode. Auf ein präziseres Ladungsträgermodell der Recovery-Effekte [6] [7] wird zugunsten der Modellkomplexität des Gesamtsystems verzichtet. Das Umladungsverhalten wird daher als symmetrisch approximiert, wobei die dominante Umladungszeit über die Zeitkonstante des Zweigs eingestellt wird.

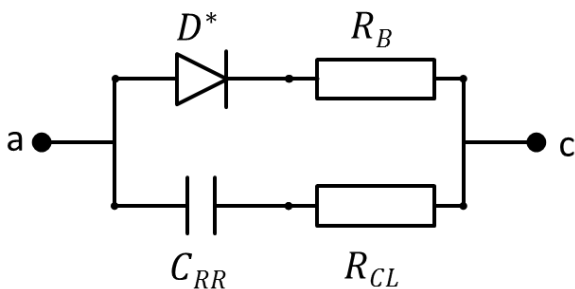


Bild 4: Dioden-Modell (Level 2)

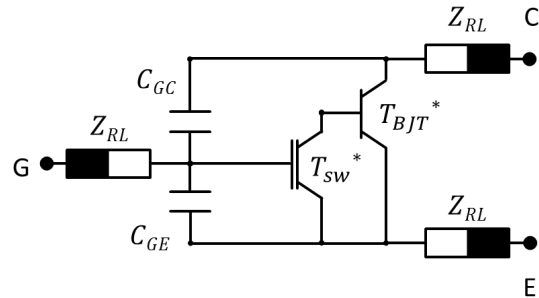


Bild 5: IGBT-Modell (Level 2)

Zur Nachbildung der IGBTs wird ein Modell mit der in Bild 5 gezeigten Struktur verwendet. Als Hauptelemente setzt es sich aus einem MOSFET T_{SW}^* zur Abbildung des Schaltverhaltens und einem Bipolartransistor T_{BJT}^* als eigentlichen Leistungsschalter zusammen. Das Modell des MOSFET-Schalters nutzt dabei das Shichman-Hodges-Modell [8]. Das Modell des Bipolartransistors ist ein adaptiertes Ebers-Moll-Modell [9] [10]. Das Gesamtmodell des IGBT berücksichtigt für EMV-Analysen zusätzlich noch die direkten Anschlussimpedanzen und die Gate-Kapazitäten.

Der gesamte Leistungselektronikteil für die EMV-Analysen wird dann mit der in Bild 6 dargestellten Struktur modelliert [11] [12]. Zusätzlich zu den erläuterten Halbleitermodellen berücksichtigt es die internen Leitungsimpedanzen und die externen Anschlussimpedanzen auf der DC-Seite. Letztere sind vor allem deswegen wichtig, da der Zwischenkreiskondensator – bestehend aus C_{imc} , R_{imc} – direkt integriert wurde und so ein realistischeres Verhalten der Energieflüsse unter Nutzung des Zwischenkreises gewährleistet ist. Vor allem bei der Untersuchung des Kopplungsverhaltens von Transienten zwischen HVAC-Seite und HVDC-Seite des Bordnetzes ist dies wichtig, da der Zwischenkreiskondensator hierbei eine nicht zu unterschätzende Filterwirkung erfüllt.

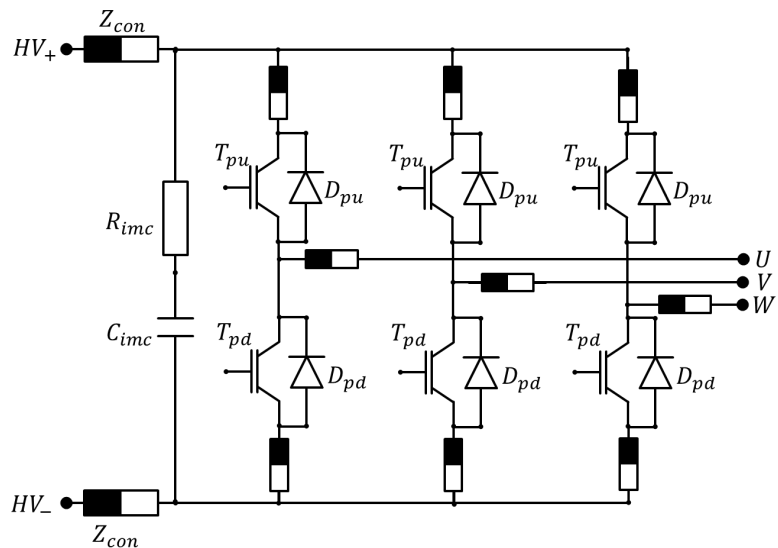


Bild 6: Modell des Leistungselektronikteils des DC/AC-Umrichters (Level 3)

4 Simulationsgestützte Analyse transienter Störpotentiale

Um die Funktionsweise und die Gültigkeit der präsentierten Modelle und Methodik zu demonstrieren, wurde eine simulationsgestützte Emissionsanalyse nach ISO7637-4 exemplarisch mit einem INFINEON HybridPACK2 durchgeführt.

4.1 Verifikation des Simulationsmodells des Frequenzumrichters

Bei der Parametrierung des Frequenzumrichtermodells wurden als Basisparameter zuerst aus den Datenblättern [13] [14] entnommene oder abgeleitete Werte eingestellt. Diese lieferten schon eine gute Näherung des realen Verhaltens. Allerdings zeigte sich bei Messungen innerhalb des Verifikationsprozesses, dass für die Spannungen der IGBT-Treibersignale die Datenblattangaben von $V_{ge} = -8/+15 \text{ V}$ nur bedingt galten, da alle sechs Treiber unterschiedliche Steuerspannungen lieferten und die unteren Signalspannung bei $V_{ge} \approx -6,5 \text{ V}$ lagen

Nach Anpassungen der Modellparameter an die ermittelten Werte konnte eine recht genaue Übereinstimmung von Messung und Simulation erzielt werden. Exemplarisch dafür sind in Bild 7 die Steuerspannungen der IGBTs in Halbbrücke W dargestellt, und in Bild 8 der zugehörige Spannungspuls der AC-Spannung V_{Wn} . Als Referenzpotential wurde dabei das untere Potential der HVDC- Zwischenkreisspannung $V_{DC,imc}$ verwendet.

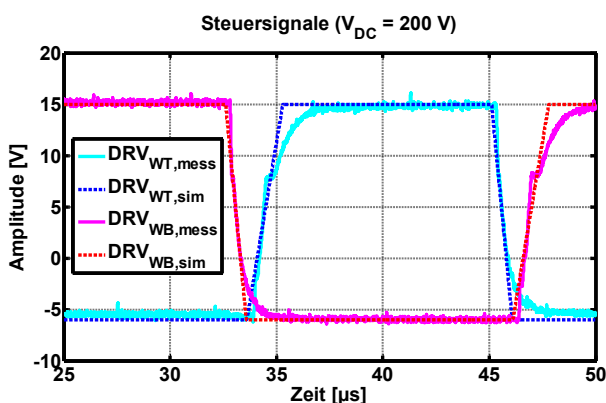


Bild 7: Vergleich IGBT-Steuersignale

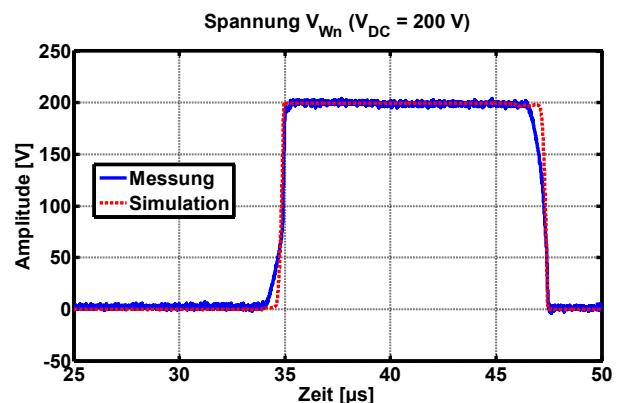


Bild 8: Vergleich AC-Spannung V_{Wn}

4.2 Simulationsgestützte Emissionsprüfung nach ISO7637-4

Mit den vorgestellten verifizierten und adaptierten Komponentenmodellen wurde die in Abschnitt 3.1 vorgestellte Prüfung hinsichtlich transienter Emissionen einer Kombination aus Frequenzumrichter, HV-Kabel und elektrischer Maschine simulatorisch durchgeführt. Den Prüfaufbau zeigt schematisch Bild 9, die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

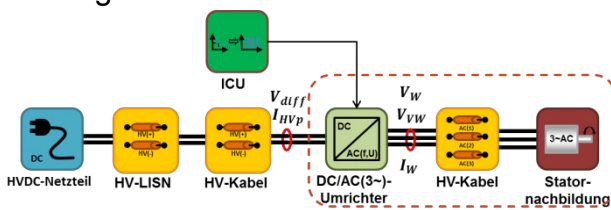


Bild 9: Prüfaufbau des Emissionstests

Betriebsspannungen	$V_{LVDC} = 12,40 \text{ V}$ $V_{HVDC} = 278,0 \text{ V}$
HV-Kabel	Länge (DC): 1,50 m Länge (AC): 2,50 m
EMR-Parameter	$L_f = 90 \text{ mH}$ $R_{s,DC} = 0,4 \text{ } \Omega$
Umrichter-Ansteuerung	$f_{Puls} = 20 \text{ kHz}$ Duty = 0,25

Tabelle 1: Relevante Parameter des Prüfaufbaus

In Bild 10 ist der Vergleich zwischen Spannungspulsen der gemessenen und der simulierten Spannung V_{Wn} im Zeitbereich dargestellt. Bild 11 zeigt einen Vergleich der zugehörigen Spektren im Bereich 150 kHz bis 30 MHz mit einer Detektorbandbreite von $R_{BW} = 9\text{ kHz}$ und einer Peak-Detektor-Bewertung.

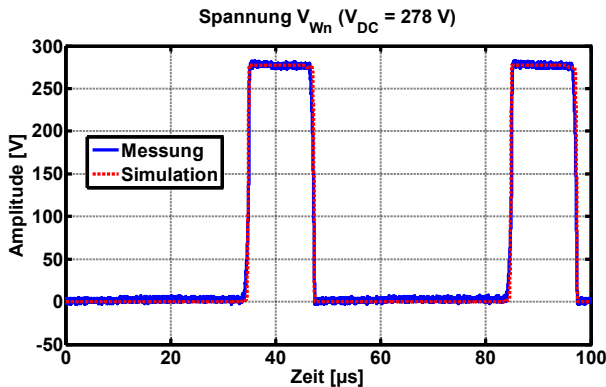


Bild 10: Vergleich V_{Wn} (Zeitbereich)

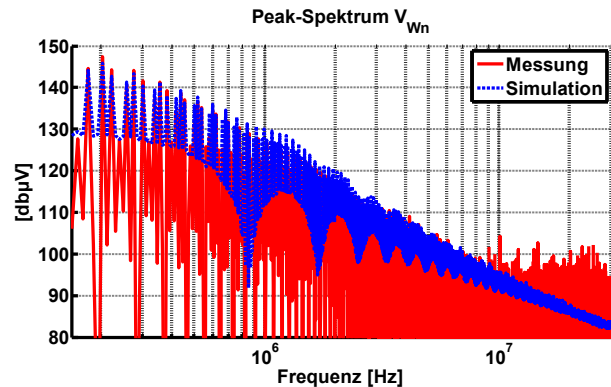


Bild 11: Vergleich V_{Wn} (Frequenzbereich)

Es zeigen sich wiederum gute Übereinstimmungen im Zeitbereich. Im Frequenzbereich wird eine gute Übereinstimmung nur bis ca. 12 MHz erreicht, da ab hier ein fast gleichmäßiger Rauschteppich beginnt.

Bild 12 zeigt das mit der Simulation ermittelte Spektrum der differentiellen Spannungsmessung V_{diff} auf der HVDC-Seite und Bild 13 das Spektrum des zugehörigen Stroms I_{DC} auf der Leitung HVP.

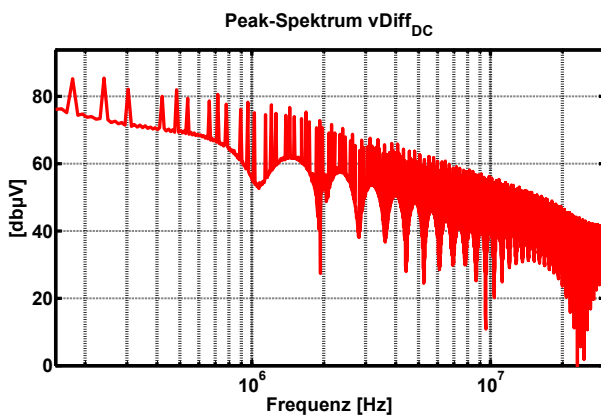


Bild 12: Spektrum der diff. Prüfspannung V_{diff}

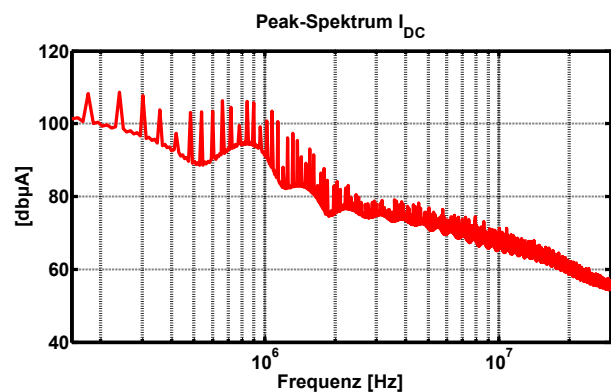


Bild 13: Spektrum des Stroms auf der Leitung HVP

Das Fehlen transienter Überschwinger in den Verläufen erklärt sich dadurch, dass der Arbeitspunkt des DUT hier der Leerlaufbetriebspunkt war. Somit wurde vom System wenig Leistung aufgenommen, welche vom Zwischenkreiskondensator problemlos bedient werden kann. Somit erzielt dieser von der HVDC-Seite aus betrachtet eine sehr gute Filterwirkung.

5 Zusammenfassung

Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren bietet eine effiziente Möglichkeit leitungsgeführte Störungen, insbesondere von transienten Phänomenen, im Bordnetz (teil-) elektrisch angetriebener Fahrzeuge zu analysieren. Das Verfahren nutzt einen zweistufigen Verifikationsprozess zur Erzeugung hochmodularer Simulationsmodelle von Kfz-Komponenten mit hoher Güte. Diese Modelle können genutzt werden, um zeit- und kostenintensive EMV-Prüfungen während der Entwicklungsphasen schnell und effizient si-

mulationsgestützt durchzuführen. Diese ersetzen zwar nicht die EMV-Prüfungen zur Zertifizierung der Komponenten, können aber als entwicklungsbegleitende Vorabuntersuchung oder zur schnellen Fehlersuche genutzt werden. Die generelle Funktionsweise und Gültigkeit der Methode für stationäre Arbeitspunkte konnte gezeigt werden.

6 Danksagung

Die Arbeit für diesen Konferenzbeitrag wurde teilweise von der Europäischen Union (EFRE), vom Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen (MWEIMH NRW) und dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV NRW) als Teil des Projekts TIE-IN (Referenznummer 64.65.69-EM-1022A) gefördert.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ISO 7637 (Draft-Standard), "*Road Vehicle - Electrical disturbance by conducting and coupling*", September 2012.
- [2] CISPR25 (Technical Standard), "*Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats and on devices - Limits and methods of measurement*", 3rd ed. Hrsg., 2009.
- [3] S. Niedzwiedz und S. Frei, „Eine strukturierte Modellbibliothek für Analysen an Antriebssträngen von Elektrofahrzeugen,“ *Automotive meets Electronics*, 2012.
- [4] P. Fritzson, Principles of object oriented modeling and simulation with Modelica 2.1, IEEE Press, 2004.
- [5] M. Schinkel, S. Weber, S. Guttowski, W. John und H. Reichl, „Efficient HF Modelling and Model Parameterization of Induction Machines for Time and Frequency Domain Simulations,“ *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2006.
- [6] P. Lauritzen und C. Ma, „A Simple Diode Model with Reverse Recovery,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 6, Nr. 2, 1991.
- [7] P. Lauritzen und C. Ma, „A Simple Diode Model with Forward and Reverse Recovery,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 8, Nr. 3, 1993.
- [8] H. Shichman und D. Hodges, „Modeling and Simulation of Insulated-Gate Field-Effect Transistor Switching Circuits,“ *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Bd. 3, Nr. 3, 1968.
- [9] P. Antognetti und G. Massobrio, Semiconductor device modeling with SPICE, McGraw-Hill, 1988.
- [10] U. Tietze und C. Schenk, Halbleiter-Schaltungstechnik, 11th rev. Hrsg., Springer-Verlag, 1999.
- [11] J. Specovios, Grundkurs Leistungselektronik, 6th rev. Hrsg., Springer Vieweg, 2013.
- [12] INFINEON Technologies, *Application Note AN2010-09 Automotive IGBT Module*, Rev. 1.0 Hrsg., 2010.
- [13] INFINEON Technologies, *Application Note AN2011-03 HybridKit for HybridPACK2*, Rev. 2.3 Hrsg., 2011.
- [14] INFINEON Technologies, *Datasheet - EICEDRIVER 1ED020I12FA*, Rev. 2.1 Hrsg., 2009.
- [15] IEC61000-4-4 (International Standard), *Electromagnetic compatibility (EMC)*, 2012.