

Messverfahren zur Bestimmung der EMV-relevanten Störanteile in Hochvolt-Bordnetzen von Kraftfahrzeugen

Christian Zietz, Leibniz Universität Hannover, Institut für Hochfrequenztechnik und Funk-systeme, Hannover

Gunnar Armbrecht, Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, Fridolfing

Thomas Schmid, Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, Fridolfing

Bernd Geck, Leibniz Universität Hannover, Institut für Hochfrequenztechnik und Funk-systeme, Hannover

Michael Wollitzer, Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG, Fridolfing

1. Einleitung

In Hybrid- oder Elektrokraftfahrzeugen stellt der Aspekt der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) des Hochvolt-(HV)-Netzwerks eine besondere Herausforderung dar. [1] Hohe übertragene Leistungen und steile Taktflanken lassen die HV-Leitungen zu Quellen hochfrequenter Störemission werden. Um diese Effekte besser erschließen zu können, ist es notwendig, die Vorgänge im Inneren des geschirmten HV-Systems zu erfassen. Dies kann durch eine breitbandige Messung der zeitaufgelösten Ströme und Spannungen direkt auf den HV-Leitungen erreicht werden.

Die derzeitigen Lösungen für diese Messungen (Spannungsteiler, Rogowskispule, Stromzange, Shunt-Widerstand und Hallsensor) haben jedoch den Nachteil, dass dadurch insbesondere die EMV-relevanten hochfrequenten Störanteile der zu vermessenden Systemkomponenten nicht erfasst oder zumindest deutlich beeinflusst werden. Daher stellt dieser Beitrag ein neu entwickeltes Messverfahren vor, das diese Nachteile nicht aufweist. In Kapitel 2 werden Kalibrierung und Messung im Detail vorgestellt und verifiziert. In Kapitel 3 wird der Messaufbau zum Einsatz in Elektrofahrzeugen dargestellt. Weiterhin wird die Bedeutung der Rückwirkungsfreiheit des entwickelten Verfahrens hervorgehoben, bevor erste Messungen an einem Fahrzeug durchgeführt werden.

2. Vorstellung des Messaufbaus

In diesem Kapitel werden zunächst die Anforderungen an das Messverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Applikation zur Messung in HV-Bordnetzen beleuchtet. Anschließend werden die Durchführung der Kalibrierung und der Messung beschrieben.

2.1. Anforderungen

Um die EMV-relevanten Störungen in HV-Bordnetzen erfassen zu können, muss das Messverfahren die folgenden Eigenschaften aufweisen: Es muss sowohl in der Lage sein, Spannung und Strom über einen weiten Frequenzbereich (150 kHz bis 1 GHz gemäß [2]) erfassen zu können, als auch nicht periodische Signale, beispielsweise Einschaltpulse,

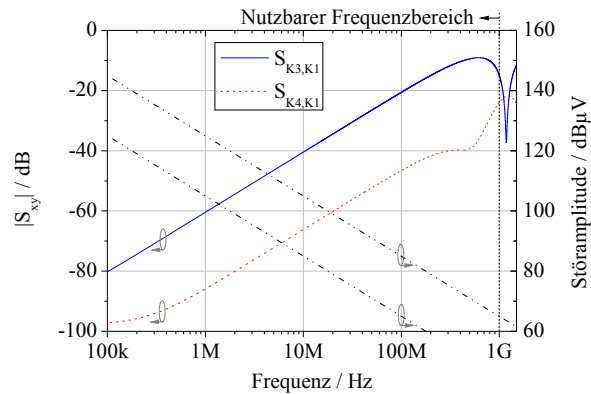


Bild 1: Streuparameter des Richtkopplers

korrekt darstellen zu können. Weiterhin muss die Rückwirkung des Messaufbaus auf das Bordnetz vernachlässigbar sein. Überdies erfordert eine aussagekräftige Messung hochfrequenter und damit ortsabhängiger Spannungen und Ströme eine definierte Referenzebene. Daher verwendet der hier vorgestellte Ansatz ein Zeitbereichsmessverfahren mit einem unter besonderer Beachtung des HF-Verhaltens optimierten, schwach angekoppelten Richtkoppler. Vervollständigt wird das Verfahren durch eine Kalibrierung, die unter anderem die Referenzebene definiert und den Frequenzgang des Richtkopplers kompensiert.

In diesem Beitrag wird ein elektrisch kurzer Leitungskoppler als Richtkoppler verwendet, der mit seinen Toren K1 und K2 in die zu untersuchende Leitung eingefügt wird und über seine Messtore K3 und K4 jeweils Anteile der hin- bzw. rücklaufenden Welle auf der zu untersuchenden Leitung auskoppelt. Das Messverfahren erlaubt es, dass die zu untersuchende Leitung und die Messtore unterschiedliche Leitungswellenwiderstände aufweisen dürfen. In Bild 1 ist das prinzipielle Übertragungsverhalten eines Leitungskopplers in Form seiner Streuparameter dargestellt. Diesen Verläufen gegenübergestellt ist die erwartete spektrale Verteilung der Störpegel. [3] Der dargestellte Koppler ist bis ca. 750 MHz kürzer als eine Viertelwellenlänge. Er gewährleistet so eine annähernd konstante Spannungsamplitude an den Messtoren und sorgt somit für eine hohe Messdynamik bei hohen Frequenzen, ohne dass bei niederfrequenten Signalanteilen sehr großer Amplitude die Gefahr der Zerstörung des Messgeräts besteht.

2.2. Durchführung der Kalibrierung

Der Aufbau zur Kalibrierung mittels eines Netzwerkanalysators (NWA) ist in Bild 2 dargestellt. Das Viertor zwischen den Toren 1, 2 und 3 des NWA sowie der Kalibrierebene lässt sich nun in zwei Zweitor zerlegen, deren Signalfussdiagramme in Bild 3 gezeigt werden. Das Zweitor mit den auch als Fehlertermen bezeichneten Streuparametern i_{cd} befindet sich zwischen dem Tor 1 des NWA und der Kalibrierebene; das Zweitor mit den Fehlertermen e_{cd} befindet sich zwischen den Toren 2 und 3 des NWA, die mit den Messtoren des Kopplers verbunden sind und der Kalibrierebene¹. Ziel der Kalibrierung ist es, sämtliche vier Streuparameter e_{cd} zu bestimmen, da diese den Zusammenhang zwischen den

¹Die gegenüber Bild 2 veränderte Flussrichtung der Wellengröße a_2 resultiert aus der Viertor-Zweitor-Reduktion.

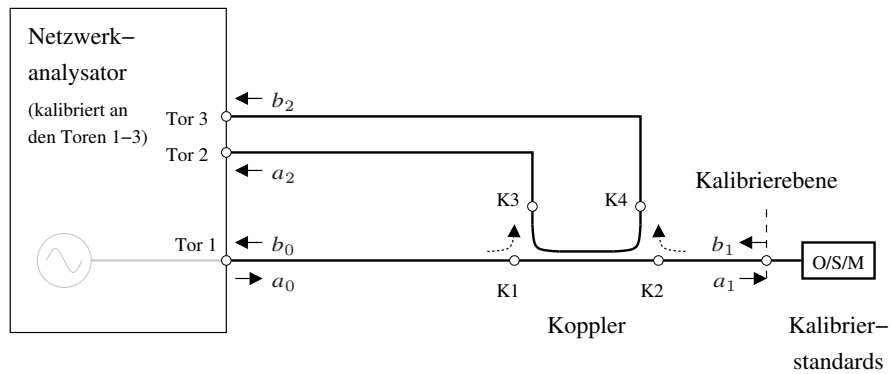
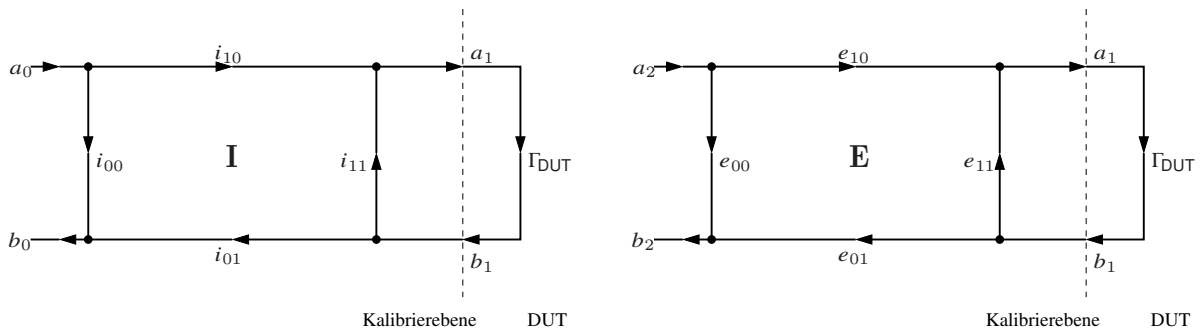


Bild 2: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Kalibrierung



(a) Fehlerzweiter **I** zwischen DUT und Tor 1 des Netzwerkanalysators

(b) Fehlerzweiter **E** zwischen DUT und Ausgängen des Kopplers (Tore 2 und 3 des Netzwerkanalysators)

Bild 3: Signalflussdiagramme der Fehlerzweitere während der Kalibrierung

Wellengrößen a_1 und b_1 in der Kalibrierebene und den durch den Koppler ausgekoppelten Wellengrößen a_2 und b_2 beschreiben. In der später durchzuführenden Messung werden nur die Größen a_2 und b_2 bestimmt, aus ihnen soll dann auf Wellengrößen bzw. Spannung und Strom in der Kalibrierebene geschlossen werden.

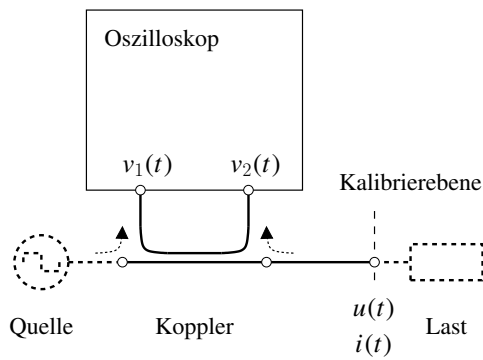
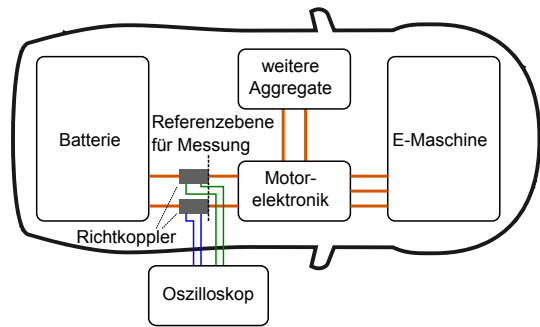
Beide Fehlerzweitere können durch eine OSM-Kalibrierung² teilweise charakterisiert werden. Nach [4] lassen sich i_{00} , i_{11} , $i_{10}i_{01}$ sowie e_{00} , e_{11} und $e_{10}e_{01}$ bestimmen. Dies ist für die Bestimmung des Reflexionsfaktors Γ_{DUT} eines unbekanntes Prüflings (DUT) ausreichend:

$$\frac{b_1}{a_1} = \Gamma_{DUT} = \frac{b_2/a_2 - e_{00}}{e_{10}e_{01} + e_{11}(b_2/a_2 - e_{00})}. \quad (1)$$

Für eine Bestimmung der absoluten Wellengrößen a_1 und b_1 aus a_2 und b_2 ist jedoch die Zerlegung des Produkts $e_{10}e_{01}$ in seine Faktoren nötig. Dazu wird die Kalibrierung im Folgenden erweitert.

Hierbei ist festzustellen, dass die nur durch die mathematische Operation der Vierter-Zweiter-Reduktion [5] entstandene Streumatrix **E** kein reziprokes Zweitor beschreibt, d. h. im Allgemeinen gilt $e_{10} \neq e_{01}$. Hingegen beschreibt die Streumatrix **I** den Zusammenhang zwischen dem Tor 1 des NWA und der Kalibrierebene und kann somit als reziprok ange-

²Benannt nach den verwendeten Standards *Open* (Leerlauf), *Short* (Kurzschluss) und *Match* (reflexionsfreier Abschluss).


Bild 4: Aufbau zur Messung

Bild 5: Beispielhafter Messaufbau in einem Elektrofahrzeug

nommen werden. Damit gilt:

$$i_{10} = i_{01} = \pm \sqrt{i_{10} \cdot i_{01}} \quad (2)$$

und das Fehlerzweitor mit der Streumatrix **I** kann folglich mit einer einzigen Phasentrennung vollständig bestimmt werden.

Aus den Signalfussdiagrammen in Bild 3 kann hergeleitet werden:

$$e_{10} = i_{10} \cdot \frac{a_0}{a_2} \cdot \frac{1 - e_{11}\Gamma_{\text{DUT}}}{1 - i_{11}\Gamma_{\text{DUT}}}. \quad (3)$$

Da sämtliche Größen in (3) bekannt sind, ist auch das Fehlerter mit der Streumatrix **E** bestimmt und die Messung von Spannung und Strom kann durchgeführt werden.

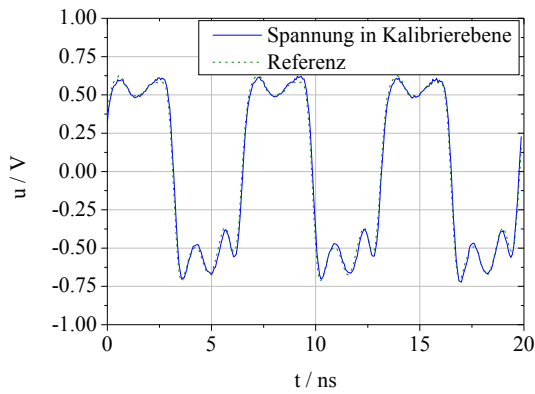
2.3. Durchführung der Messung

In Bild 4 ist schematisch der Aufbau zur Durchführung der Messung dargestellt. Hierbei wird der gestrichelt dargestellte Teil nicht von den zuvor bestimmten Fehlertermen erfasst, kann also gegenüber der Kalibrierung verändert sein. Somit beeinträchtigen die unvermeidbaren Änderungen, wie z.B. das Einfügen des Kopplers in die HV-Leitung im Fahrzeug, nicht die Gültigkeit der Kalibrierung.

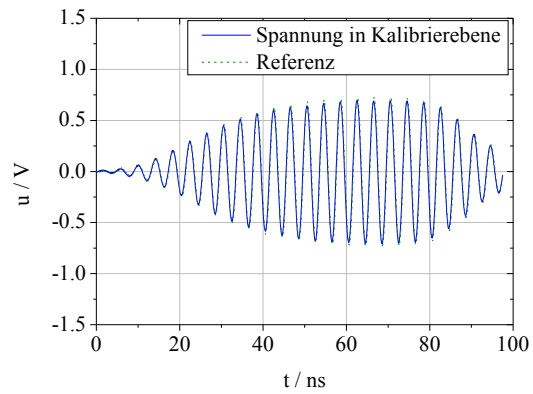
Zur Anwendung der im Frequenzbereich definierten Kalibrierung werden die vom Oszilloskop im Zeitbereich erfassten Spannungen $v_1(t)$ und $v_2(t)$ in die entsprechenden Größen $V_1(f)$ und $V_2(f)$ im Frequenzbereich transformiert. Um die bei Messungen mit hoher Abtastrate auftretenden großen Datenmengen mit einstellbarer Zeit- und Frequenzauflösung auswerten zu können, wird hierzu die Kurzzeit-Fouriertransformation (STFT) [6] verwendet. Unter Anwendung der entsprechend Abschnitt 2.2 erhaltenen Fehlermatrix **E** können die absoluten Wellengrößen a_1 und b_1 in der Kalibrierebene und daraus Spannung die $U(f)$ und der Strom $I(f)$ bestimmt werden. Mit Hilfe der inversen STFT kann daraus die zeitdiskrete Darstellung der Spannung $u(t)$ und des Stroms $i(t)$ in der Kalibrierebene gewonnen werden. Ein möglicher Einsatz in einem Elektrofahrzeug ist in Bild 5 gezeigt.

2.4. Verifikation

Um die korrekte Implementierung des Verfahrens zu verifizieren, werden zunächst Messungen mit kommerziell erhältlichen Richtkopplern [7] vorgenommen. Dabei wird die Ka-



(a) Breitbandiges Signal



(b) Puls

Bild 6: Verifikation der gemessenen Spannung

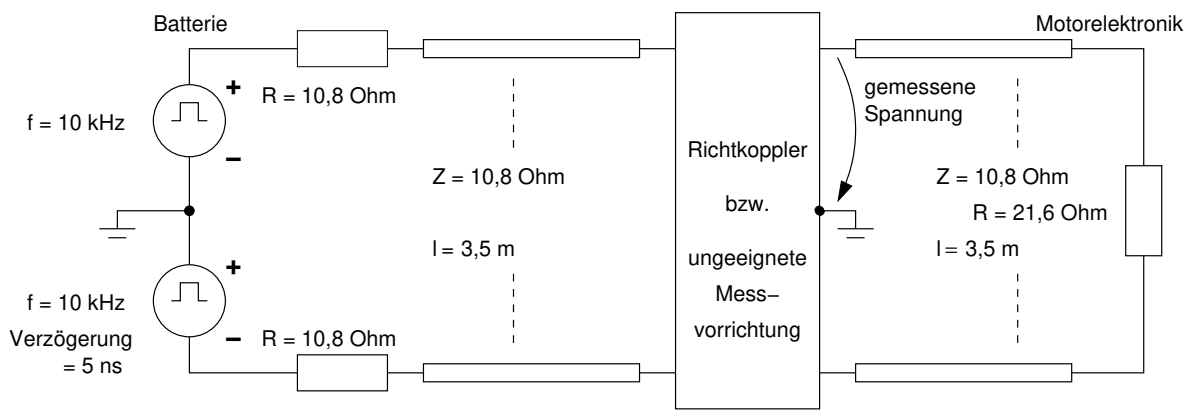


Bild 7: Aufbau zur Untersuchung des Einflusses der Messvorrichtung auf das Messergebnis

librierebene statt an der Last – wie in Bild 4 dargestellt – direkt an einem weiteren Eingangskanal des Oszilloskops definiert. Dies schafft eine Referenz zur Verifikation der ermittelten Spannung $u(t)$. Durch den HF-Generator können verschiedene Eingangssignale erzeugt werden. Die gemessenen Spannungen sind in Bild 6 gegenübergestellt. Es lässt sich sowohl für das breitbandige, periodische Signal als auch für den nichtperiodischen Puls erkennen, dass das Verfahren die Spannungen in der Kalibrierebene korrekt erfasst.

3. Anwendung: Messungen im HV-System

3.1. Messaufbau

Bild 5 zeigt einen beispielhaften Messaufbau an einem Elektrokrافتfahrzeug: Zwei Kopppler, für die entsprechend Abschnitt 2.2 bereits Kalibrierdaten ermittelt wurden, werden in die Batterieleitungen eingefügt und mit einem Oszilloskop verbunden. Das Messverfahren ermöglicht daraus sowohl die Bestimmung der absoluten Spannung zwischen Innenleiter und Schirm der HV-Leitung als auch des absoluten Stroms auf dem Innenleiter in der Referenzebene. Dies gilt insbesondere auch für transiente Ereignisse wie z. B. für Schaltvorgänge.

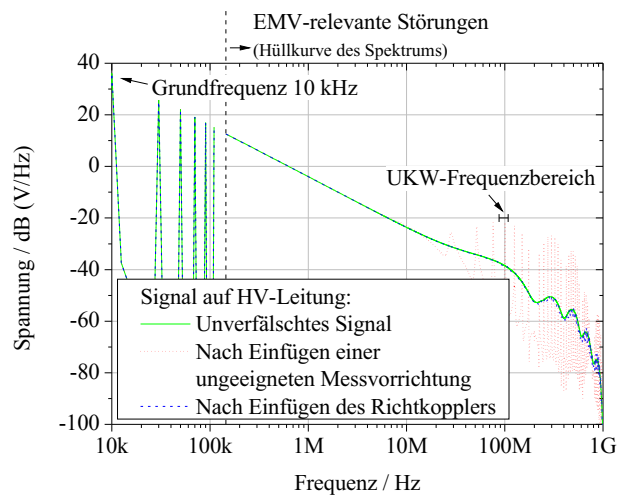


Bild 8: Einfluss der Messvorrichtungen auf das Messergebnis

3.2. Einfluss der Messvorrichtung auf das Ergebnis

Die Bedeutung eines rückwirkungsfreien Messverfahrens wird im Folgenden verdeutlicht: Dazu soll ein vereinfachtes Simulationsmodell eines Hochvoltnetzwerks entsprechend Bild 7 betrachtet werden. Aufgrund einer zeitlichen Verzögerung der unteren Rechteckquelle von 5 ns kommt es im Netzwerk zu einer Unsymmetrie, deren Effekt auf die Spannung zwischen einem Innenleiter und dem auf Masse befindlichen Schirm erfasst werden soll. Dazu steht einerseits eine klassische Messbox zur Verfügung, die die Schirme der HV-Leitungen aufweitet, um beispielsweise einen hochohmigen Spannungsteiler zu integrieren. Dabei verändert sich jedoch lokal der Wellenwiderstand. Gleichzeitig kommt es innerhalb der Messbox zu einer erhöhten Verkopplung der Leitungen untereinander. Andererseits wird der HF-optimierte Richtkoppler eingesetzt, der in Abschnitt 3.3 näher vorgestellt wird.

In Bild 8 sind die simulierten Spektren der Spannung dargestellt. Das Einbringen der ungeeigneten – weil nicht auf das Impedanzniveau der Leitung angepassten – Messbox verursacht bereits ohne Berücksichtigung einer eventuell nichtidealen Auskopplung durch den Spannungsteiler eine deutliche Veränderung der Signale und würde dem Anwender beispielsweise eine nicht vorhandene Resonanz im UKW-Frequenzbereich vortäuschen. Hingegen verhalten sich die Richtkoppler des hier präsentierten Messverfahrens nahezu rückwirkungsfrei und führen nur zu vernachlässigbaren Unterschieden gegenüber dem unverfälschten Signal. Daher wird für die Messungen der Richtkoppler verwendet, der im Folgenden vorgestellt wird.

3.3. Hochvolt-Messkoppler

Zur Anwendung des Messverfahrens in HV-Bordnetzen von Kraftfahrzeugen werden ein geeigneter Richtkoppler für den Frequenzbereich von 150 kHz bis 1 GHz sowie dazu passende Kalibrierstandards benötigt. Beides ist in Bild 9 dargestellt. Um beim Einfügen der Koppler gemäß Bild 5 eine unerwünschte Beeinflussung des Systems zu verhindern, ist der Richtkoppler vollständig unter HF-Gesichtspunkten optimiert. Einerseits wird die Schirmung des HV-Bordnetzes auch innerhalb des Kopplers beibehalten, andererseits wird auf

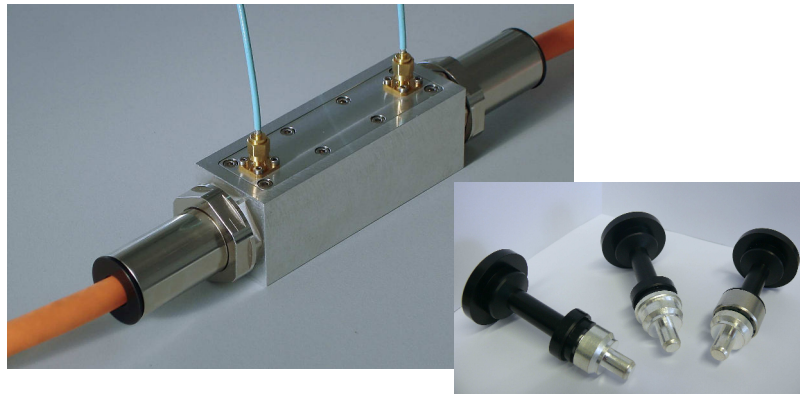


Bild 9: Hochvolt-Messkoppler und -Standards [8]

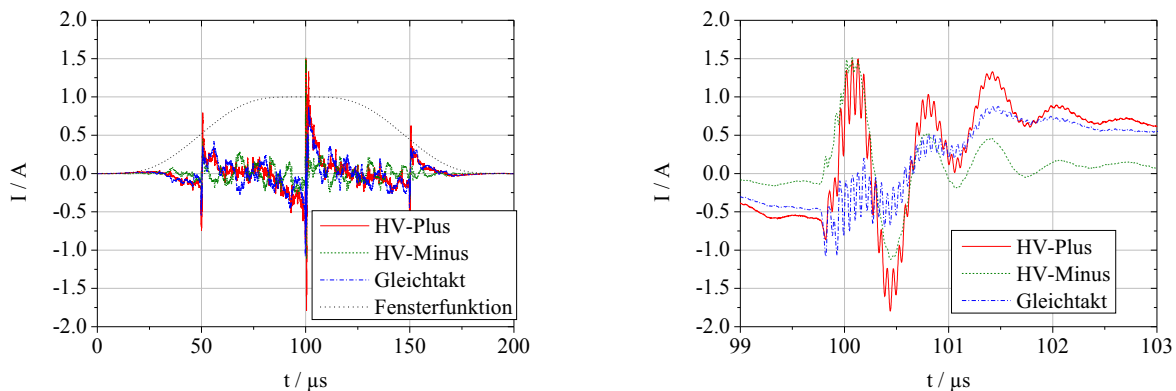


Bild 10: Ströme auf den HV-Batterieleitungen

eine breitbandige Anpassung an die Leitungsimpedanz der HV-Leitungen von ca. 11Ω geachtet. Überdies erfüllt der Koppler für den Einsatz im automobilen Umfeld Kriterien wie Hochspannungsfestigkeit und Dichtigkeit.

3.4. Messergebnisse

Der in Abschnitt 3.3 vorgestellte Koppler wird bei Messungen an einem Versuchsfahrzeug eingesetzt. Dabei wird er – wie in Bild 5 gezeigt – in die Batterieleitungen (HV-Plus, HV-Minus) eingefügt. Dies erlaubt einerseits die Messung der massebezogenen Spannungen sowie des Stroms auf dem Innenleiter als auch deren Zerlegung in Gleich- und Gegentakt.

In Bild 10 sind die Ströme während des Betriebs des Wechselrichters dargestellt. Aufgrund der Beschränkung auf die EMV-relevanten Frequenzanteile (150 kHz bis 1 GHz) sind hierbei die Anteile im Grundtakt von 10 kHz nicht sichtbar. Der linke Graph zeigt einen Zeitraum von $200 \mu\text{s}$ sowie die aus der STFT resultierende Fensterfunktion. Im rechten Graphen ist ein Ausschnitt von $4 \mu\text{s}$ dargestellt. Der dort erkennbare Anteil mit einer Periodendauer von ca. $1 \mu\text{s}$ tritt sowohl auf HV-Plus als auch auf HV-Minus in gleicher Weise auf und löscht sich im Gleichtaktmode folglich aus. Hingegen tritt die höherfrequente überlagerte Schwingung nur auf HV-Plus auf und ist somit gleichzeitig Teil des Gleichtaktmodes. Hier lässt sich die Eigenresonanz des HV-Systems erkennen.

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Zeitbereichsmessverfahren vorgestellt, das die Bestimmung der EMV-relevanten Signalanteile auf HV-Leitungen in Elektrofahrzeugen erlaubt. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, breitbandige Messungen von Spannung und Strom in einer definierten Referenzebene mit vernachlässigbarer Beeinflussung des untersuchten HV-Netzwerks zu ermöglichen. Dies wurde durch Messungen verifiziert.

Danksagung

Die Autoren danken Herrn Tobias Zorn, Herrn Andreas Ludwig und Herrn Dr. Martin Aidam, Daimler AG, für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Durchführung der Messungen.

Literatur

- [1] Hohloch, J. ; Köhler, W. ; Tenbohlen, S. ; Aidam, M. ; Krauß, T.: Charakterisierung und Vergleich leitungsgebundener Störungen an KFZ-Hochvoltbordnetzen. In: *EMV 2012, Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*. Düsseldorf, 2012
- [2] Norm CISPR 25: 2002. *Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices – Limits and methods of measurement*
- [3] Mooser, J.: Elektromagnetische Verträglichkeit von Hochvoltkomponenten auf Systemebene. In: *EMV spezial – EMV von Elektro- und Hybridfahrzeugen*. Zwickau, 2011
- [4] Hiebel, Michael: *Grundlagen der vektorialen Netzwerkanalyse*. München : Rohde & Schwarz, 2006
- [5] Zelder, Thomas: *Kontaktlose Vektornetzwerkanalyse*. Göttingen : Sierke, 2009
- [6] Oppenheim, Alan V. ; Schafer, Ronald W. ; Buck, John R.: *Discrete-time signal processing*. 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice-Hall, 1999
- [7] *Krytar Model 1821 Directional Couplers*. <http://www.krytar.com/pdf/1820.pdf>
- [8] *Rosenberger HVR® Measurement Coupler*. http://rosenberger.de/documents/headquarters_de_en/ba_automotive/AUTO_HVR_MeasCoupl_Flyer_2012.pdf