

Reihe 21

Elektrotechnik

Nr. 416

Sören Schörle, M. Sc.  
Backnang

## Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug





# **Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug**

vorgelegt von

M.Sc.

Sören Schörle

geb. in Backnang

von der Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

## Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Klaus-Dieter Lang

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Detlev Hackstein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eckart Hoene

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 13.12.2016

Berlin 2016



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 21

Elektrotechnik

Sören Schörle, M. Sc.

Backnang

Nr. 416

Systemorientierte  
Impedanzsimulation eines  
Hochvolt-Bordnetzes am  
Beispiel Kraftfahrzeug

VDI verlag

Schörle, Sören

## **Systemorientierte Impedanzsimulation eines Hochvolt-Bordnetzes am Beispiel Kraftfahrzeug**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 416. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

156 Seiten, 143 Bilder, 10 Tabellen.

ISBN 978-3-18-341621-9, ISSN 0178-9481,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Hochvolt-Bordnetz – Impedanzmodellierung – Impedanzmessung – Simulation – Hochvolt Batterien – Elektrofahrzeuge – Hochvoltkabel – Spannungsqualität – Resonanzen – Systemsimulation

Die Bedeutung von Hochvolt-Bordnetzen hat aufgrund der steigenden Anzahl von Elektro- und Hybridfahrzeugen stark zugenommen. Um eine sichere Funktion und eine gute Spannungsqualität zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Absicherung der Bordnetze mithilfe einer Simulation notwendig. Das vorliegende Buch beschreibt einen Weg, um das Impedanzverhalten solcher Netze mit vertretbarem Aufwand zu simulieren und Resonanzen aufzuspüren. Dariüber hinaus zeigt der Verfasser auf, wie es gelingt, die Wechselspannungsanteile auf dem Bordnetz zu simulieren, um sie in Hinblick auf Funktion und Spannungsqualität bewerten zu können. Mithilfe dieser Vorgehensweise gelingt es, die Auslegung der Komponenten sowie die Architektur des Gesamtnetzes vor der Realisierung zu bewerten, das Optimierungspotential darzulegen und die Herausforderungen zwischen kurzer Entwicklungszeit und robuster Auslegung des Netzes frühzeitig zu erkennen.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2016

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuscript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9481

ISBN 978-3-18-341621-9

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand durch die Möglichkeit, parallel während meiner Entwicklertätigkeit bei der Daimler AG im Bereich Hochvolt-Bordnetze, als Gastwissenschaftler am Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration tätig zu sein. Die Herausforderung, neben der normalen Arbeitstätigkeit eine Dissertation zu erstellen, konnte ich nur durch die Hilfe vieler Kollegen und Freunde meistern. Vor allem Prof. Eckart Hoene danke ich für seine jahrelange fachliche Begleitung und die Arbeit als Gutachter. Ohne ihn und seine fachliche, aber auch administrative Unterstützung wäre diese Arbeit nie entstanden. Herrn Prof. Lang danke ich besonders für die jahrelange Unterstützung und Begleitung beim Entstehen dieser Arbeit. Ein Dank geht an Herrn Prof. Hackstein für seine Gutachtertätigkeit sowie Herrn Prof. Gühmann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Vielen herzlichen Dank auch an meine IZM Kollegen Stefan Hoffman, Stefan Junk, Adam Kuczmik und Christoph Marczok für den fachlichen Support und die vielen anregenden Diskussionen.

Ein spezielles Dankeschön an meinen Daimler Kollegen Dr. Thomas Dörsam für seine unschätzbare Unterstützung durch fachliche Diskussionen und Korrekturen. Danken möchte ich auch meinen Daimler Kollegen Dr. Tobias Aurand, Rainer Falsett, Thomas Wersal, Andreas Kruspel und Bernd Müller für ihre Unterstützung bei den vorbereitenden Arbeiten und die vielen Gespräche. Ohne das Verständnis meiner Vorgesetzten Frau Dr. Vera Lauer und Herrn Thomas Weber, die mir den persönlichen Freiraum für diese Arbeit ermöglichten, wäre das Projekt sicher gescheitert. Dafür möchte ich an dieser Stelle nochmals Danke sagen.

In besonderem Maße bedanke ich mich bei meiner lieben Frau Daniela für Ihre unzähligen orthografischen Korrekturen und die Unterstützung und Aufmunterung in den letzten fünf Jahren. Ohne die großartige Unterstützung meiner Mutter, die mich auf dem Weg vom Studenten bis zur Promotion immer unterstützt hat, wäre der ganze Weg bis hierher viel schwerer gewesen, dafür herzlichen Dank.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung.....</b>	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>X</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>XI</b>
<b>1      Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1    Problemstellung .....	2
1.2    Stand der Technik.....	6
1.3    Struktur und Ziel der Arbeit .....	11
<b>2      Grundlagen.....</b>	<b>16</b>
<b>3      Impedanzmodellierung der Einzelkomponente.....</b>	<b>18</b>
3.1    Messung von Impedanzen .....	19
3.2    Vergleich aktive und passive Impedanz .....	28
3.3    Impedanzmodellierung von Leistungsbaugruppen.....	38
3.4    Automatisierte Ersatzschaltbilderzeugung .....	47
<b>4      Impedanz von HV-Batterien .....</b>	<b>53</b>
4.1    Einzelzelle .....	54
4.2    Messadapter .....	57
4.3    Gesamtbatterie .....	63
4.4    Vergleich von Batterien .....	72
<b>5      Modellierung der geschirmten HV-Kabel .....</b>	<b>74</b>
5.1    Notwendiger Detailierungsgrad des Kabelmodells .....	93
<b>6      Modellierung der Systemimpedanz .....</b>	<b>95</b>

6.1	Kombination von Kabel- und Baugruppenmodell .....	95
6.2	Auswirkung der Massefläche .....	100
6.3	Kombination von Baugruppen .....	101
6.4	Impedanz des Gesamtsystems .....	106
6.5	Interpretation der Messergebnisse .....	112
6.6	Einflussfaktoren und Vereinfachungen .....	115
<b>7</b>	<b>Störquellenmodellierung .....</b>	<b>117</b>
7.1	Einführung .....	117
7.2	Versuchsaufbau und Einflussfaktoren .....	119
7.3	Messergebnisse .....	124
7.4	Hinweis zu Common Mode .....	132
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>132</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>134</b>
A.1	Zusammenfassung der Schaltbilder .....	134
A.2	Induktivität eines Koaxialkabels .....	137
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>139</b>

# Formelverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
<b>a<sub>m</sub></b>	---	Polstellen
<b>C<sub>AA</sub></b>	F	Koppelkapazität Ader-Ader
<b>C<sub>AS</sub></b>	F	Koppelkapazität Ader-Schirm
<b>c<sub>m</sub></b>	---	Residuen
<b>C<sub>ZG</sub></b>	F	Kapazität Zelle-Gehäuse
<b>C<sub>zz</sub></b>	F	Kapazität Zelle-Zelle
<b>d<sub>z</sub></b>	m	Abstand Zellenmitte-Zellenmitte
<b>f</b>	Hz	Frequenz
<b>f<sub>res</sub></b>	Hz	Resonanzfrequenz
<b>h</b>	m	Höhe über Masse
<b>h<sub>z</sub></b>	m	Abstand Zellmitte-Gehäuse
<b>I<sub>CM</sub></b>	A	Common Mode Strom
<b>I<sub>DM</sub></b>	A	Differential Mode Strom
<b>k<sub>0</sub></b>	---	Bedeckungsfaktor Schirm
<b>l</b>	m	Länge
<b>L</b>	H	Luftinduktivität
<b>L<sub>A</sub></b>	H	Induktivität Ader
<b>L<sub>a</sub></b>	H	Induktivität Außenleiter/Mantel
<b>L<sub>braid</sub></b>	H	Fehlinduktivität durch Schirm
<b>L<sub>h</sub></b>	H	Induktivität Hülle
<b>L<sub>i</sub></b>	H	Innere Induktivität eines Leiters
<b>L<sub>n</sub></b>	H	Induktivität durch Nähewirkung
<b>L<sub>s</sub></b>	H	Induktivität Schirm
<b>l<sub>z</sub></b>	M	Länge Zelle
<b>M</b>	H	Gegeninduktivität
<b>M<sub>AA</sub></b>	H	Gegeninduktivität Ader-Ader
<b>M<sub>AS</sub></b>	H	Gegeninduktivität Ader-Schirm
<b>n</b>	---	Anzahl Messpunkte
<b>N</b>	---	Anzahl Polstellen
<b>N</b>	---	Windungszahl

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$r$	m	Radius
$r_A$	m	Radius Ader
$R_A$	$\Omega$	Widerstand Ader
$R_{AA}$	$\Omega$	Verlustwiderstand Ader-Ader
$R_{AS}$	$\Omega$	Verlustwiderstand Ader-Schirm
$r_i$	m	Abstand Adern
$R_s$	$\Omega$	Widerstand Schirm
$r_{si}$	m	Radius Schirm innen
$r_{so}$	m	Radius Schirm außen
$r_z$	m	Radius Zelle
$U$	V	Spannung
$U_{HV-}$	V	HV- Spannung
$U_{HV+}$	V	HV+ Spannung
$Z^*_{DUT}$	$\Omega$	konjugiert komplexe Impedanz
$Z_c$	$\Omega$	Impedanz Kondensator
$Z_L$	$\Omega$	Impedanz Induktivität
$Z_{Quelle}$	$\Omega$	Impedanz Quelle
$Z_x$	$\Omega$	Impedanz gesucht
$\delta$	m	äquivalente Leitschichtdicke
$\rho$	$\Omega^* \text{mm}^2/\text{m}$	spezifischer Widerstand
$\varphi$	$^\circ, \text{rad}$	Winkel
$\chi$	S/m	spezifische Leitfähigkeit

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BALUN</b>	Balanced-unbalanced
<b>CISPR</b>	Comité international spécial des perturbations radioélectriques
<b>CM</b>	Common Mode
<b>DFT</b>	Diskrete Fourier Transformation
<b>DM</b>	Differential Mode
<b>DUT</b>	Device Under Test
<b>EKMV</b>	Elektrischer Kältemittel Verdichter
<b>ESL</b>	Equivalent Series Inductivity
<b>ESR</b>	Equivalent Series Resistance
<b>FEMM</b>	Finite Elemente Methode Magnetics
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transformation
<b>HV</b>	Hochvolt ( $U>60V$ )
<b>HV-Bordnetz</b>	Hochvolt-Bordnetz
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolare Transistor
<b>IMSI</b>	Impedance Measurement Based On Harmonic Signal Injection
<b>LV-Bordnetz</b>	12V Bordnetz des Kraftfahrzeugs
<b>LISN</b>	Line-Impedance-Stabilization-Network
<b>NNB</b>	Netznachbildung
<b>NV</b>	Niedervolt
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer
<b>PDU</b>	Power Distribution Unit
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SNR</b>	Signal Noise Ratio

## Zusammenfassung

Hochvolt-Bordnetze finden heutzutage mehr und mehr Einzug im Kraftfahrzeug, sei es zur Energieversorgung eines zusätzlichen Antriebes in Hybridfahrzeugen oder als Hauptantrieb in Elektrofahrzeugen. Neben dem Antrieb werden weitere Zusatzaggregate wie Klimakompressor oder DC/DC-Wandler verbaut, um die Systemeffizienz zu erhöhen. Diese Technologie bringt einerseits neue Möglichkeiten, andererseits auch unbekannte Systemreaktionen in den Entwicklungsprozess ein. Das elektrische Verhalten der unabhängig voneinander entwickelten Bordnetzkomponenten ist dem Systemarchitekten nur teilweise bekannt. Speziell das Impedanzverhalten der Eingangsfilter wird im Systemdesign bisher kaum berücksichtigt. Begünstigt durch den Umstand, dass die Komponenten durch Kabel mit niedrigen Verlusten vernetzt sind, können so hoch schwingfähige Systeme entstehen, die sich erst in einem Gesamtaufbau bemerkbar machen. In dieser Arbeit wird ein Weg aufgezeigt, wie sich das Impedanzverhalten von verteilten Netzen sowie mögliche Systemresonanzen durch Modellierung und Simulation im Frequenzbereich 1kHz-10MHz ermitteln lassen, ohne dass ein realer Systemaufbau existiert. Die Modelle werden unter der Maßgabe erstellt, dass keine Detailinformationen über das Schaltungsdesign verfügbar sind. Um zum Systemmodell zu gelangen, werden zuerst die leistungselektronischen Wandler anhand von Messungen identifiziert. Die Ergebnisse werden in ein Modell aus konzentrierten Elementen überführt, bei denen jedes Element einem realen physikalischen Effekt zugeordnet werden kann. Damit lassen sich Änderungen am realen Umrichter leicht ins Modell übertragen. Des Weiteren kann bei einer unerwünschten Resonanz das zu ändernde Bauteil leichter identifiziert werden. In einem weiteren Schritt werden Messverfahren zur Ermittlung der Batterieimpedanz vorgestellt. Um die Messergebnisse zu verifizieren, wird die Impedanz einer Batterie anhand ihrer geometrischen Strukturen und den physikalischen Effekten berechnet und modelliert. In einem dritten Schritt werden dann die geschirmten Kabel modelliert, wobei verschiedene Detailierungsgrade verwendet werden und ein Vergleich der verschiedenen Varianten gezogen wird.

Aufbauend auf die Modellierung der Einzelkomponenten werden Kombinationen von Kabeln und Umrichtern simuliert und die Ergebnisse mit Messungen verglichen. Anschließend werden diese Subsysteme zu einem kompletten Gesamtnetz zusammengeführt und eine Simulation der Systemimpedanz durchgeführt. Diese Ergebnisse werden mit Messungen verglichen und anhand von Abweichungen werden die relevanten Einflussfaktoren diskutiert. Diese Systemsimulation ermöglicht zum einen die Identifikation von Systemresonanzen, zum anderen kann für jede Frequenz der Pfad mit der niedrigsten Impedanz ermittelt werden. Diese Kenntnis hilft dabei die Belastung jeder Komponente durch Oberschwingungen abzuschätzen und ggf. Maßnahmen einzuleiten, sofern diese Störungen zu Fehlfunktionen oder Schädigungen führen. Im letzten Kapitel wird ergänzend eine Methode entwickelt, die mittels standardisierter Messung eine Identifikation der Störquelle im Umrichter ermöglicht. Die daraus erstellte Ersatzstörquelle jedes Umrichters im leistungselektronischen Netz ermöglicht die Ergänzung der zuvor erstellten Impedanzmodelle um eine interne Urstörquelle, um so die auftretende Störspannung in einem System zu ermitteln und die Anregung möglicher Resonanzen zu identifizieren.

## Abstract

High-voltage powernets are being increasingly implemented in present-day cars, either as an additional propulsion system in hybrid vehicles or as the main drivetrain in electric cars. Besides the propulsion system, additional sets such as electrical air conditioning or DC/DC-converters are implemented to increase the overall system efficiency. On one hand this technology introduces new possibilities like efficient driving cycles, but on the other hand unknown system reactions are introduced into the development cycle. The electrical behaviour of all independently developed components is only partially known to the system designer. Especially the input filter impedance behaviour is barely considered at the moment. Due to the fact that all components are connected with each other using shielded cables with low losses, oscillatory build-ups are created which are not recognized until the first real system build-up is done. This thesis shows a way to identify the impedance behaviour and possible resonances by modelling and simulating the system in a frequency range

between 1kHz and 10MHz, without having a complete build-up system available. The models are created by using as little detailed information about the input filter as possible. To gain an overall system model, at first the power electronic converters are identified by measurement. The results are transformed into models using concentrated circuit elements, each of them representing a real physical effect. This ensures that changes of the real component can be easily transferred into the model. Furthermore, it is possible to identify the according part creating an unwanted resonance. Secondly, measurement methods are presented to identify the impedance of high-voltage batteries. For verification, one battery impedance is calculated and simulated using geometrical data and the corresponding physical effects. In a third step, the shielded cables are simulated using models with different levels of details. After that, a comparison between the various models is performed and a conclusion drawn. Using the single component models, combinations of converters and cables are modelled comparing them with measurements. Finally, these subsystems are used to build up a complete power grid of a real vehicle and a simulation of the system impedance is performed. These results are then compared with measurements. The deviations are used to identify the relevant simulation parameters. This system simulation offers on one hand the identification of system resonances and on the other hand the possibility to identify the path with the lowest impedance for every single frequency. This knowledge can be used to identify the noise load of each component created by noise frequencies. Having these information, countermeasures can be taken in case the noise ratio causes malfunctions or even damage. The last chapter introduces a method to identify the noise source of each converter. The resulting equivalent noise source offers the possibility to expand the impedance models with a noise source model. This model can then be used to simulate the noise level within the system and to identify the stimulation of possible resonances.