

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -



BMBF-Verbundprojekt EM4EM

Elektromagnetische Zuverlässigkeit und elektronische Systeme für eMobility-Anwendungen

Zuwendungsempfänger:	AUDI AG 85045 Ingolstadt
Förderkennzeichen:	16M3092A
Projektlaufzeit:	1. Oktober 2011 – 31. März 2015
Berichtszeitraum:	1. Oktober 2011 – 31. März 2015
Beitrag:	Teilvorhaben: Entwurfs- und EMZ-Messmethodik für EMZ-Analysen auf EV-Gesamtsystemebene
Koordinator (Teilvorhaben):	Dr.-Ing. Jörn Leopold
Bearbeiter:	Dr.-Ing. J. Leopold/M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) T. Enzinger/ Dipl.-Ing. F. Jacob/Dipl.-Ing. Ch. Lippert/ Dipl.-Ing. K. Friedrich/M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) M. Kühn/ M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) H. Feng/M.Sc. David Krause
Ausführende Stelle:	AUDI AG - I/EE 25
Gesamt-Projektleitung:	Dr.-Ing. Jörn Leopold AUDI AG Entwicklung EMV/EMC - I/EE-25 85045 Ingolstadt Tel.: +49-841-89-90833 -- Fax: +49 (0) 841 89-8490833 eMail: joern.leopold@AUDI.DE
F+E-Koordination und Projektmanagement:	Dr.-Ing. Werner John (EM4EM Office) SIL System Integration Laboratory GmbH (R + D Consulting) Technologiepark 32 - D-33100 Paderborn Tel.: +49-(0)5251- 288188-4 -- Fax: +49-(0)5251 - 288188-9 eMail: werner.john@sysint-lab.eu

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16M3092A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Inhaltverzeichnis

1	Kurze Darstellung	5
1.1	Aufgabenstellung AUDI AG	5
1.2	Voraussetzungen des Vorhabens	5
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
2	Eingehende Darstellung	12
2.1	Designregeln für HV-Architekturen und HV-Topologien	12
2.1.1	Grundsätzliches zur EMV von HV-Architekturen	12
2.1.2	Strompfadanalyse	14
	Gegentaktströme im Phasennetz	15
	Gleichtaktströme im Phasennetz	16
2.1.3	Entwurfsregeln	18
	Entwurfsregeln für HV-Leitungen	18
	Entwurfsregeln für HV-Topologien	20
2.1.4	Anforderungen an EMV-Messverfahren	23
2.2	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	26
3	Literaturverzeichnis	28

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	EMV Mess- und Prüfdisziplinen am konventionellen Gesamtfahrzeug	5
Abbildung 2:	Gegenüberstellung von geschalteten Leistungen im HV-System und empfangenen Leistungspegeln an fahrzeugeigenen Antennensystemen	6
Abbildung 3:	EMV-Absorbermesshalle mit Rollenprüfstand bei der AUDI AG	7
Abbildung 4:	Verschiedene Varianten an EMV-Maßnahmen bei einer exemplarischen HV-Topologie mit von oben nach unten zunehmendem Filteraufwand (Größe der grün dargestellten Flächen) sowie gegenläufig abnehmendem Schirmaufwand.....	13
Abbildung 5:	Potentielle Stromschleifen im HV-System	14
Abbildung 6:	Symmetrisches HF-Ersatzschaltbild (AC-Seite)	15
Abbildung 7:	Simulierte Phase-Phase-Spannungen und dazugehörige Phasenströme	16
Abbildung 8:	Asymmetrisches HF-Ersatzschaltbild (AC-Seite).....	16
Abbildung 9:	Simulierte Sternpunkt-Masse Gleichtaktspannung (grün) und Gleichtaktstrom (rot)	17
Abbildung 10:	Kontaktwiderstände im Schirmpfad einer HV-Kontaktierung an einem HV-Steuergerät und vorgeschlagene Maximalwerte	19
Abbildung 11:	Grenzwert des Schirmwiderstands einer konfektionierten HV-Leitung	19
Abbildung 12:	Messaufbau zur Bestimmung der Transferimpedanz mit dem Speisedrahtverfahren bei unkonfektionierten HV-Leitungen (Meterware)	20
Abbildung 13:	Abhängigkeit der Überkopplung vom Abstand der HV-Komponenten untereinander als auch von deren Abstand zu den Fahrzeugantennen	21
Abbildung 14:	Maximaler Abstand von zusammengehörigen HV-Kabeln	21
Abbildung 15:	Abstandsdefinition zur Vermeidung von Störkopplung zwischen HV und NV	22
Abbildung 16:	Simulatorische Bestimmung der Transferimpedanz zwischen eine HV-Stromschleife und einer 12V-Schleife als Störsenke.....	22
Abbildung 17:	Elektrifizierter Fahrzeugdemonstrator (eBuggy)	23
Abbildung 18:	Testplan für das HV-System auf Demonstratorebene (ohne Kommunikation).....	25

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung AUDI AG

Im Rahmen des Förderprojekts EM4EM wurde eine ganzheitliche Betrachtung der EMV von elektrifizierten Fahrzeugen durchgeführt. Hierfür wurden alle Ebenen der Wertschöpfungskette (Halbleiter-, Komponenten-, System- und Fahrzeugebene) sowie Universitäten berücksichtigt. Das Teilvorhaben der AUDI AG befasste sich mit „Entwurfs- und Messmethodik für EMZ-Analysen auf EV-Gesamtsystemebene“.

1.2 Voraussetzungen des Vorhabens

EMV im Automobil und EMV-Zentrum der AUDI AG

Den Kundenanforderungen an Fahrsicherheit, Komfort und Qualität müssen im Großserienprodukt Automobil entsprochen werden und zusätzlich ist die Wahrung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eine zwingend zu erfüllende Anforderung. Die Einhaltung der EMV-Anforderungen dient zur Sicherstellung der Funktionssicherheit sowie der Produkthaftung und nicht zuletzt ist sie die Voraussetzung für eine erfolgreiche Zulassung des Fahrzeugs im Straßenverkehr.

Die damit verbundene Komplexität soll am Beispiel eines konventionellen Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor verdeutlicht werden. In Abbildung 1 sind die Steuergeräte- bzw. Leitungstopologien sowie die notwendigen EMV-Prüfungen auf Gesamtfahrzeugebene dargestellt. Ein solches Fahrzeug kann über 250 EMV-relevante Komponenten besitzen (vom hochintegrierten Temperatursensor bis zu sehr komplexen Infotainment-Systemen), welche über einer Gesamtstrecke von ungefähr 3000 m Leitungen miteinander interagieren. Das Spektrum der EMV ist sehr umfangreich und reicht von gestrahlten Prüfungen, über leitungsgebundene Untersuchungen bis hin zu Mobilfunkprüfungen mit einer Handy-Nachbildung und Robustheitstests gegenüber elektrostatischer Entladung.

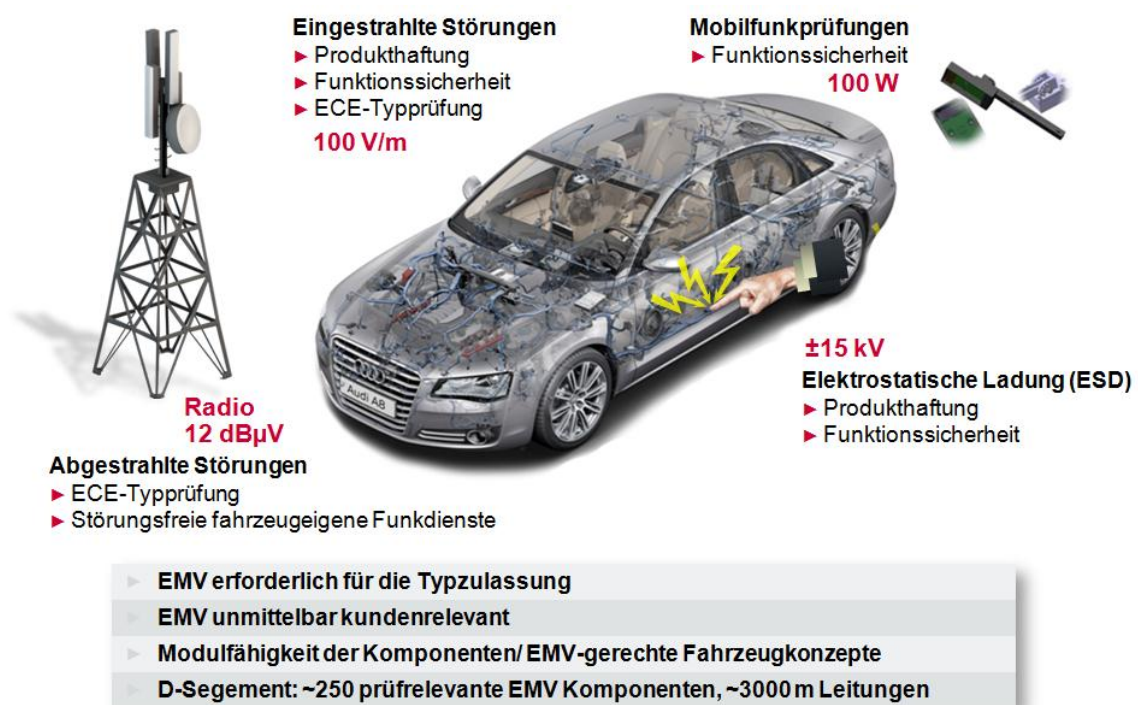


Abbildung 1: EMV Mess- und Prüfdisziplinen am konventionellen Gesamtfahrzeug

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die große Herausforderung schon bei konventionellen Fahrzeugen dabei ist, alle relevanten Nutzfrequenzen des Fahrzeuges nicht zu beeinträchtigen. In diesem Zusammenhang sind auch möglichst alle zukünftigen Funkdienste zu betrachten. Der Aspekt gewinnt gerade vor dem Hintergrund der zunehmenden Modularisierung der Komponenten an erheblicher Bedeutung.

Bei elektrifizierten Fahrzeugen wird zusätzlich der elektrische Antriebsstrang, der sich maßgeblich aus koaxialartigen Kabeln, Steckern, einer Batterie, dem Wechselrichter und der elektrischen Maschine zusammensetzt, integriert. Trotz dieser zusätzlichen Komplexität gelten selbstverständlich dieselben EMV-Anforderungen wie im konventionellen Fahrzeug.

Kernproblematik der Elektromobilität bezüglich EMV sind die durch die Schaltleistung bedingten hohen Hochfrequenz-Störpegel, die HV-Leistungselektroniken erzeugen. Abbildung 2 stellt die Größenordnung der Leistungen von HV-Leistungselektroniken und typischen Empfangspegeln gegenüber.

Es ist technisch eine enorme Herausforderung, HF-Störquellen im kW-Bereich von Empfangssystemen, die im μW -Bereich und kleiner arbeiten, zu entkoppeln. Dies gilt insbesondere für den unteren Frequenzbereich des amplitudenmodulierten Hörfunks. Aber auch andere Frequenzen wie die des UKW-Radios und zulassungsrelevante Bereiche können grundsätzlich betroffen sein. Zwar weisen die PWM-Frequenzen typischer Leistungselektroniken lediglich Grundfrequenzen im Bereich von 8 kHz bis 24 kHz auf, durch die schnellen Umpolarisierungen der Wicklungen der Maschine werden jedoch auch die verteilten Kabel- oder Streukapazitäten geladen und entladen. Im Zusammenhang mit parasitären Induktivitäten entstehen dabei hochgütige Schwingkreise, die Resonanzfrequenzen bis in den MHz-Bereich aufweisen. Gelingt keine breitbandige Entkopplung, sind deshalb sowohl kundenrelevante Störungen in den Empfangssystemen des Fahrzeuges zu erwarten als auch das Einhalten zulassungsrelevanter Vorschriften gefährdet.

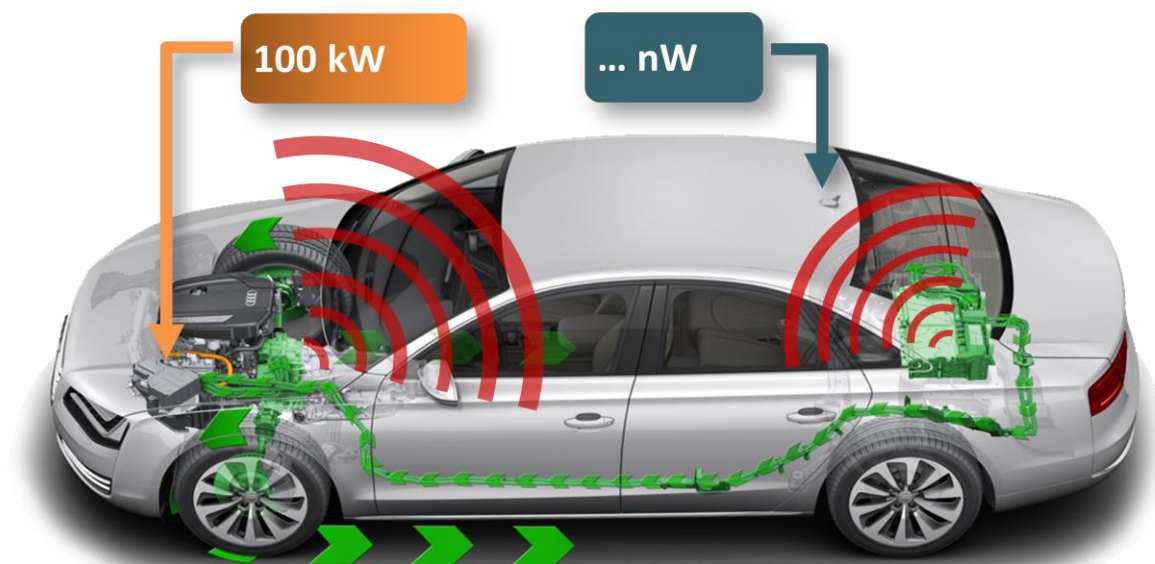


Abbildung 2: Gegenüberstellung von geschalteten Leistungen im HV-System und empfangenen Leistungspegeln an fahrzeugeigenen Antennensystemen

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Im EMV-Zentrum der AUDI AG, das in der Technischen Entwicklung verortet ist, sorgen die EMV-Spezialisten während des gesamten Entwicklungsprozesses dafür, dass die Fahrzeuge auch aus EMV-Sicht Premiumansprüchen genügen. Nachdem der störungsfreie Rundfunk-, TV- und sonstige Funkdienstempfang das Resultat aus optimaler EMV-Performance der Fahrzeugkomponenten sowie geeigneter Platzierung und Auslegung der Fahrzeugantennen ist, sind Antennen- und EMV-Entwicklung in der gleichen Abteilung organisiert.

Basis der EMV-Entwicklung sind dabei die drei Säulen EMV-Fahrzeugentwicklung, EMV-Komponentenentwicklung und EMV-Messtechnik. Die EMV-Fahrzeugentwicklung ist dabei eng in die Entwicklungsaktivitäten auf Gesamtfahrzeugebene eingebunden. Ab der frühen Konzeptphase gilt es, sowohl die Platzierung der einzelnen Elektroniken im Fahrzeug, die Entwicklung des Bordnetzes sowie Entwicklung und Applikationen der Antennenstrukturen aus EMV-Sicht zu begleiten und zu beeinflussen.

Mit dem Aufbau der ersten Prototypen und Vorserienfahrzeugen werden auch die Bewertung von Messergebnissen, Fahrzeugfreigaben und die Kommunikation in die entsprechenden Projektgremien auf Fahrzeugebene wahrgenommen.

Die EMV-Komponentenentwicklung fokussiert dagegen auf die EMV-gerechte Auslegung der einzelnen Elektroniksysteme. Dazu müssen Anforderungen von der Fahrzeugebene auf die einzelnen Systeme heruntergebrochen werden. Jede einzelne Fahrzeugelektronik muss dahingehend entwickelt werden, dass vor der Fahrzeugintegration das Einhalten der EMV-Komponentenanforderungen nachgewiesen und sichergestellt werden kann. Dazu ist eine entsprechend enge Vernetzung mit den entwickelnden Fachabteilungen für Elektrik- und Elektronik-Komponenten erforderlich. Eine erfolgreiche Elektronikbaukastenstrategie setzt eine effektive EMV-Komponentenentwicklung voraus.

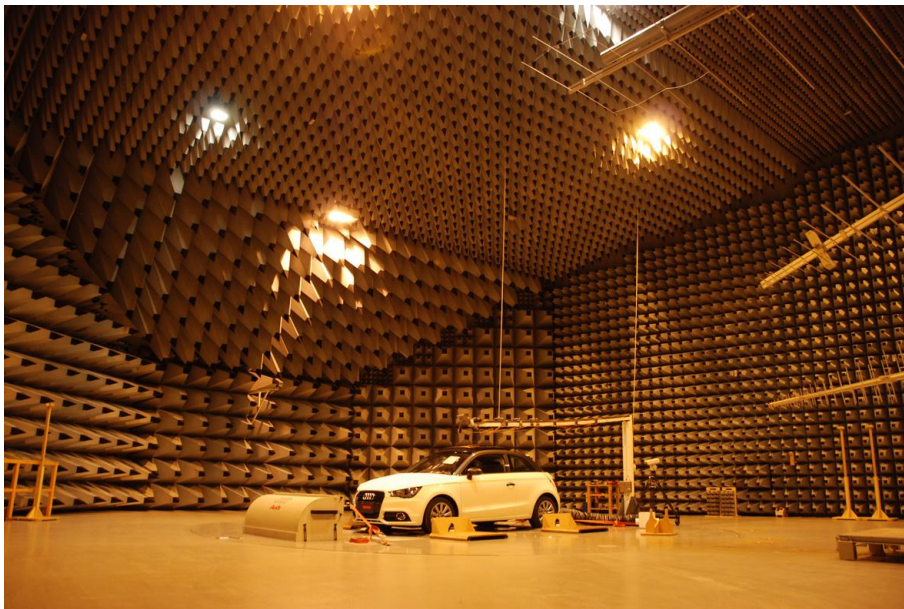


Abbildung 3: EMV-Absorbermesshalle mit Rollenprüfstand bei der AUDI AG

Als dritte Säule ist die EMV-Messtechnik dafür zuständig, die erforderlichen Entwicklungs- und Freigabemessungen durchzuführen. Im EMV-Zentrum stehen dafür ein Komponentenlabor, eine große Fahrzeug-Absorberhalle mit Rollenprüfstand für Messungen bis zu 10 m Entfernung (siehe oben Abbildung 3), eine kleine Fahrzeug-Absorberhalle für Störaussendungsmessungen, sowie Messplätze für ESD, Mobilfunktests und den Ladebetrieb von elektrifizierten Fahrzeugen zur Verfügung.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die Einrichtungen genügen neben internationalen Standards wie z.B. nach CISPR und ISO auch nationalen und internationalen Zulassungsanforderungen wie z.B. der ECE R10 sowie den hauseigenen Anforderungen des VW-Konzerns. Die Verfahren werden von den entsprechenden EMV-Messtechnikspezialisten angewendet, die neben KnowHow zur Hochfrequenzmesstechnik auch über detaillierte Kenntnisse zur Fahrzeugelektronik verfügen müssen, um die Prüflinge in die relevanten Betriebszustände versetzen zu können.

Im Rahmen von EM4EM konnte sowohl auf das Wissen und die Erfahrung der Spezialisten des EMV-Zentrums als auch auf die messtechnischen Ressourcen (z.B. für die Demonstortmessungen am eBuggy) zugegriffen werden. In Kombination mit den vielen inhaltlichen Impulsen der Projektpartner sowie den Erkenntnissen der eigenen Forschungsaktivitäten gelang es, umfangreiche Ergebnisse zu erzielen, die im vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert sind.

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Im Hinblick auf die politische und gesellschaftliche Vorgabe der meisten Industriestaaten die Nutzung fossiler Brennstoffen zu verringern, wurden in den letzten Jahren verschiedene Verordnungen zur Reduktion der CO₂-Emission von Personenkraftwagen erlassen. Die EU hat in diesem Zusammenhang festgelegt, dass bis 2020 die Fahrzeugflotte eines Automobilherstellers eine durchschnittliche CO₂-Emission von 95 g/km nicht überschreiten darf [1]. Um dieser Forderung Nachdruck zu verleihen drohen bei Nichteinhalten der Grenzwerte hohe Strafzahlungen.

Das Potential zur Effizienzsteigerung von konventionellen Verbrennungsantrieben ist mittlerweile weitgehend ausgeschöpft. Die OEMs (Original Equipment Manufacturer) setzen deshalb zunehmend auf die Elektrifizierung ihrer Fahrzeuge, um den Durchschnittsverbrauch weiter zu senken. Hierzu zählen neben rein elektrischen Fahrzeugen auch Hybridfahrzeuge, bei denen nur ein Teil der Systemleistung elektrisch erzeugt wird. Allgemein ist die Integration eines Frequenzumrichters zur dynamischen Ansteuerung der elektrischen Maschine notwendig. Die EMV-Problematik dieser Leistungselektronik ist seit ihrer Serieneinführung vor 40 Jahren bekannt und seither integraler Bestandteil der fachinternen Forschung. Festzuhalten bleibt, dass trotz aller Anstrengungen ein stark erhöhtes elektromagnetisches Störniveau durch die schnelle Spannungstaktung nicht gänzlich vermieden werden kann.

Normen und gesetzliche Vorgaben für elektrifizierte Fahrzeuge

Moderne Kraftfahrzeuge beinhalten heutzutage bis zu 250 Steuergeräte, die über ein hochkomplexes Bordnetz miteinander kommunizieren und von z.T. mehreren Energiespeichern versorgt werden. Darüber hinaus bieten sie die gesamte Bandbreite analoger und digitaler Funkdienste, um eine optimale Vernetzung der Insassen zu gewährleisten. Die EMV-Anforderungen für die Umgebung „Fahrzeug“ sind daher deutlich strenger als für den Industriebereich.

Um diesem Umstand zu entsprechen, existieren eine Reihe EMV-Normen speziell für die Automobilindustrie. Momentan beziehen sie sich noch fast ausschließlich auf Fahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsantrieb. In den letzten Jahren ist hier jedoch ein Wandel zu beobachten. Die bisherigen Testmethoden und Grenzwerte stehen auf dem Prüfstand und werden im Hinblick der Anwendbarkeit auf elektrifizierte Fahrzeuge angepasst.

Die EMV-Produktnorm IEC 61800-3 [2] definiert für den Einsatz eines drehzahlveränderten Antriebssystems zwei unterschiedliche Umgebungen. Zum einen der Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereich am öffentlichen Netz und zum anderen den Industriebereich mit über Trafo abgekoppeltem Industrienetz. In diesem Anwendungsbereich werden Frequenzumrichter in der Regel in Schaltschränke integriert, wofür spezielle Aufbaurichtlinien existieren [3].

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

In dem Kontext wird häufig auf die planmäßige Umsetzung eines EMV-Zonenkonzepts hingewiesen. Dabei wird eine Aufteilung in Zonen mit unterschiedlichen Leistungs- und Störniveaus vorgenommen und verwendete Baugruppen hinsichtlich ihres EMV-Verhaltens klassifiziert.

Die IEC 61800-3 gilt explizit nicht für Elektrofahrzeuge und Bahnanwendungen, da hier andere Testmethoden und Grenzwerte angewendet werden müssen. Beim Einsatz von Frequenzumrichtern in modernen Kraftfahrzeugen sind folgende besondere Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Bauraumbegrenzung erschwert eine strikte Trennung von Störquelle und Störsenke
- Bauraum- und Gewichtsbeschränkung schränkt die Einsatzmöglichkeiten von EMV-Maßnahmen (z.B. Filterung von HV-Leitungen) ein
- Empfindliche Empfangssysteme (Antennen, Sensorik etc.) in unmittelbarer Umgebung zur Leistungselektronik
- HV-Batterie als Energiequelle, kein Netzanschluss (außer beim Laden)
- Netztopologie aus Personenschutzgründen ausschließlich als IT-Netz festgelegt
- Fahrzeugkarosserie als gemeinsamer Massebezug des Mehrspannungsbordnetzes und der Gehäuseerdung von HV-Komponenten.

Die herkömmlichen standardisierten Messmethoden für Kraftfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mussten daher angepasst und für Hybrid- und rein elektrische Fahrzeuge ergänzt werden. In kürzlich erschienenen und künftig aktualisierten EMV-Normen im Kfz-Bereich wird dieser Umstand berücksichtigt.

Die wichtigste Norm zur Erlangung der gesetzlichen Typgenehmigung für Fahrzeuge in der EU ist die ECE-R10 [4]. Ab Release 4 (2012) wurden erstmals neuartige leitungsgebundene und gestrahlte Fahrzeug- und Komponententests mit wiederaufladbaren Energiespeichersystemen festgelegt. Hierfür sind auch spezielle Randparameter von HV-Systemen mit einbezogen worden, wie die Anbindung von geschirmten Versorgungsleitungen, angepasste HV-Netznachbildungen oder der State-of-Charge (SoC) der HV-Batterie.

Die Norm ISO-7637 [5] spezifiziert Testmethoden für transiente Störungen auf Versorgungs- und Kommunikationsleitungen von Kraftfahrzeugen. Es hat sich herausgestellt, dass die bisherigen Pulsformen und -pegel nicht für HV-Leitungen von elektrifizierten Fahrzeugen anwendbar sind. Deshalb gibt es auch hier Anstrengungen einen eigenen Abschnitt für Transienten auf dem HV-Bordnetz zu entwerfen. Bisher sind die entsprechenden Arbeitskreise nicht über den Entwurfsstatus hinaus, da der Einfluss von unterschiedlichen HV-Topologien (z.B. mit oder ohne Filter) zu deutlichen Unterschieden der Pulscharakteristika führt und damit die internationale Abstimmung deutlich erschwert.

Auf Komponentenebene ist die IEC Norm CISPR-25 [6] für den Automotive-Bereich maßgeblich. Die international agierenden Arbeitskreise sind auch hier bestrebt die Norm um standardisierte Testmethoden speziell für geschirmte HV-Systeme zu erweitern. Zurzeit werden folgende Themen adressiert:

- Leitungsgebundene Messung der Störspannung auf geschirmten HV-Leitungen mittels HV-AN (Artificial Network)
- Leitungsgebundene Messung des Störstroms auf geschirmten HV-Leitungen mittels Stromzangen
- Gestrahlte Störaussendung auf Komponenten bzw. Modulebene (ALSE-Test)
- Methodik zur Bestimmung des Entkopplungsfaktors zwischen HV- und NV-Schnittstelle (leitungsgebunden & gestrahlt).

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Für die Störspannung wurden die Grenzwerte gelockert, um das physikalisch bedingt höhere Störniveau der HV-Komponenten zu berücksichtigen. Bei der Bewertung von Störströmen werden momentan noch die Grenzwerte der „NV-Welt“ verwendet, obwohl auf Basis der im Förderprojekt EM4EM erzielten Erkenntnisse selbst bei geschirmten HV-Leitungen deutlich höhere Strompegel zu erwarten sind.

Im Bereich der feldgebundenen Störungen gelten ebenfalls die herkömmlichen Anforderungen. Dies ist durchaus konsequent, da auch bei Hybrid- und elektrischen Fahrzeugen der gleiche Schutz der empfindlichen Bordelektronik angesetzt werden muss, wie bei konventionellen Fahrzeugen.

Das HV-System ist über die Versorgungs- und Kommunikationsschnittstelle mit dem NV-Bordnetz des Fahrzeuges verkoppelt. Zur Sicherstellung der CISPR-25 Anforderungen für diese Schnittstellen wurden Messverfahren für leitungsgebundene sowie gestrahlte Störgrößen vorgestellt, um die Entkopplung beider Netze zu messen. Basierend auf typische Störspannungen eines Frequenzumrichters wurden frequenzabhängige Entkopplungsfaktoren für die Schnittstellen des HV-Systems definiert. Ziel ist es, die starken Störungen der HV-Welt von der NV-Welt „abzuschotten“.

EMV-Anforderungen für HV-Bordnetze und HV-Architekturen

Bei der Entwicklung der Hochvoltkomponenten für die erste Generation von Hybridfahrzeugen in Serienproduktion gegen Ende der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts war bekannt, dass deutlich erhöhte elektromagnetische Störungen im Vergleich zu 12 V-Systemen auftreten. Dies liegt, wie in folgenden Abschnitten im Detail aufgeführt, am schnellen Schalten in den Spannungswandlern der HV-Komponenten. Als Hauptstörquelle lässt sich dabei der Pulswechselrichter für die E-Maschinen identifizieren.

Um die Störungen zu quantifizieren, werden üblicherweise die leitungsgebundenen Störspannungen gemessen. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen. Es gibt sowohl die Messung im realen Impedanzsystem (z.B. Demonstrator/Fahrzeugmessungen) als auch die Messung im nach CISPR normierten Impedanzsystem. Die Störspannung kann im realen Impedanzfall sowohl rein differenziell als auch rein im Gleichtakt gemessen werden, wohingegen die Störspannungsmessung nach CISPR in der Netznachbildung beide Varianten vereint. Dimensioniert man Filter auf Basis von Störspannungswerten muss daher berücksichtigt sein, wie diese gemessen wurden, da hier Unterschiede zu sehen sind. Allen Messvarianten gleich ist jedoch die Tatsache, dass die Störungen generell deutlich höher als die bekannten Pegel aus der 12 V Welt sind. Hier wird bisweilen die Erhöhung 70 dB@100 kHz-40 dB@120 MHz als Richtgröße genannt. Damit diesen hohen Störungen begegnet werden kann, wird derzeit überwiegend auf Schirmung gesetzt, um die Störungen in dem HV-Bordnetz "einzusperren". Grundsätzlich gibt es aber auch die Möglichkeit der Filterung. Beides zusammen muss eine Störreduzierung um den Wert der oben genannten Richtgröße erbringen, wobei das Verhältnis von Filterung und Schirmung je nach den Gegebenheiten im Fahrzeug optimal variiert werden kann.

Als Stand der Technik hat sich bei diesen Fahrzeugen die Schirmung der HV-Komponenten und HV-Leitungen analog zu Hochfrequenzanwendungen in der Nachrichtentechnik etabliert. Aus Gründen des elektrischen Berührungsschutzes muss der Schirm der HV-Komponenten allerdings auf dem (12 V-) Potenzial der Karosserie liegen. Damit ergibt sich jedoch aus leitungs-theoretischer Betrachtung ein abweichender Betriebsmodus für die geschirmten Leitungen, der sich entscheidend auf die Ausbreitung von Störungen im Fahrzeug auswirkt. Dies führte in verschiedenen Fahrzeugen verschiedener Hersteller mit elektrifiziertem Antriebsstrang immer wieder zu EMV-Phänomenen, die mit aufwändigen Zusatzmaßnahmen individuell gelöst werden mussten.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die AUDI AG hat deshalb als ein Aufgabenpaket in EM4EM definiert, das EMV-Verhalten der geschirmten Leitungen in der Beschaltung eines HV-Systems systematisch zu untersuchen. Dieses Wissen wird zum einen benötigt, um Entwurfsregeln für HV-Architekturen und HV-Leitungen zu generieren. Zum anderen dient es als Grundlage zur Spezifizierung von Filterelementen und Schirmen, sowie zur Definition und Beschreibung von HV-Zonen in Fahrzeugen.

Neuland in der EMV - Elektrische Antriebssysteme auf System- und Fahrzeugebene

Um die EMV-Anforderungen auf Komponentenebene zu erfüllen genügt es in der Regel eine Passivierung (Entstörung) der Einzelkomponenten durchzuführen. Im Hinblick auf die EMV-Optimierung auf Gesamtfahrzeugebene ist diese Vorgehensweise häufig nicht ausreichend und es bedarf durchdachter Konzepte für die Fahrzeugintegration von HV-Systemen. Schon während des Prozesses der EMV-Konzeptionierung soll mit Package-Maßnahmen und Topologie-Optimierungen ein hohes Maß an EMV-Konformität erreicht werden.

Hierfür ist zunächst eine detaillierte Kenntnis über alle relevanten Störgrößen mit ihren Kopfpfaden speziell für den Anwendungsbereich im Fahrzeug notwendig. Viele Publikationen der letzten Jahre fokussieren sich auf die Betrachtung von Teilaspekten des EMV-Verhaltens von automobilen HV-Systemen [7] [8] [9] [10] [11] [12] z.B. die EMV-Optimierung der IGBT-Module vergleichsweise wenige Erkenntnisse beziehen sich auf die Gesamtfahrzeugebene. Deshalb wurde im Rahmen von EM4EM ein elektrifizierter Fahrzeugdemonstrator („eBuggy“) aufgebaut, der mit Hilfe eines vorher definierten Testplans hinsichtlich seiner EMV tiefgreifend analysiert wurde. Damit war es möglich das gesamte Spektrum elektromagnetischer Störgrößen in fahrzeugintegrierten HV-Systemen transparent zu machen. Dieses neuartige Wissen war die Basis für die Entwicklung einer Methodik zur EMV-Bewertung und Optimierung von HV-Topologien in Form eines Zonenkonzeptes für elektrifizierte Fahrzeuge. EMV-Konzepte dieser Art sind Neuland in der Automobilindustrie und können helfen schon in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung die erforderlichen Weichen zu stellen.

Für viele EMV-Analysen muss die Systemsicht aufgrund folgender Vorteile ebenfalls mit einbezogen werden:

- Erhöhte Flexibilität als auf Fahrzeugebene, da beliebige Leitungsverlegungen, Stecker-Systeme, Leitungskonstellationen und Systemtopologien umgesetzt werden können
- Geringere Komplexität als auf Fahrzeugebene, da Randeffekte minimiert werden und die Konzentration auf die wesentlichen Effekte gelegt werden kann
- Aussagekräftigere EMV-Erkenntnisse als auf Komponentenebene, da Verbesserungsmaßnahmen für einzelne Komponenten nicht zwangsläufig zur Verbesserung auf Systemebene führen.

Aufgrund der deutlich geringeren Komplexität ist hierbei der Einsatz von EMV-Simulationen besonders geeignet. Mit einem EMV-Systemmodell für das elektrische Antriebssystem können alle wichtigen EMV-Eigenschaften des HV-Systems gewonnen werden. Innerhalb von EM4EM wurden eine Vielzahl solcher Modelle entwickelt und für detaillierte Analysen der HV/NV-Kopplung und der Störpfade verwendet. Zur Validierung wurde außerdem das HV-Verifikationsbrett bereitgestellt. Es ist grundsätzlich als Systemmodell aufgebaut und beinhaltet folgende Komponenten:

- HV-DC-Quelle als Ersatz für HV-Batterie
- Hybrid Kit als Leistungselektronik
- Asynchrone elektrische Maschine
- Ungeschirmte/geschirmte HV-Leitung.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die Untersuchungen am HV-Verifikationsbretts bieten im Vergleich zu Fahrzeugdemonstratoren folgende Vorteile:

- Einfachere Bedienung
- Berücksichtigung der 12 V Steuersignale und Sensorsignale für die Komponenten im Fahrzeuge nicht nötig
- Anpassungsfähiges Stecksystem
- Ähnliches EMV-Verhalten wie die Komponenten im Fahrzeug.

Praxisbezug: Kopplung von HV- und NV-Leitungen

Nach Stand der Technik wird die Kopplung zwischen HV- und NV-Leitungen als Nebensprechen zwischen Übertragungsleitungen gemäß der Erkenntnisse aus der Nachrichtentechnik behandelt. Dieser Lösungsansatz ist jedoch nicht geeignet für EMV-Betrachtungen im HV-System. In den Leitungen zur Übertragung von Nachrichten fließen Ströme entlang der einzelnen Signal-Leitungen und der Referenzleitung. Aus EMV-Sicht entspricht dies reinem Gleichtaktverhalten. In elektrischen Antriebssystemen sind die Gegentaktströme, welche zwischen den einzelnen Leitungen fließen, ebenfalls von zentraler Bedeutung. Die Kopplungen zwischen Gegentakt-Strompfaden unterscheiden sich von Gleichtakt-Strompfaden. Dieser Unterschied wurde bis heute nicht berücksichtigt.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Designregeln für HV-Architekturen und HV-Topologien

Das nachfolgende Kapitel enthält Designregeln für HV-Architekturen und HV-Topologien.

2.1.1 Grundsätzliches zur EMV von HV-Architekturen

Im Fokus des Beitrags der AUDI AG zu dem Forschungsprojekt sollte von Anfang an das EMV-Verhalten von HV-Architekturen im Gesamtfahrzeug stehen. Hierzu wurden neben der wissenschaftlichen Analyse der im Folgenden zu berichtenden technischen Phänomene auch der Fahrzeugentwicklungsprozess durchleuchtet. Im Fokus stand dabei die Fragestellung, zu welchen Zeitpunkten Entscheidungen getroffen werden, die für das EMV-Verhalten von Architekturen von zentraler Bedeutung sind. In diesen Phasen des Projekts ist es jeweils von zentraler Bedeutung, dass dann auch eine entsprechende EMV-Expertise mit einfließt. In EM4EM wurde deswegen nicht nur neues EMV-Wissen generiert, sondern dieses auch in eine Form gebracht, dass es von Experten anderer technischer Fachrichtungen außerhalb der EMV-Entwicklungsabteilung angewendet werden kann.

Vor einer detaillierten Darstellung der Störausbreitung im zweiten Teil sollen hier zunächst die zentralen Einflussgrößen auf das EMV-Verhalten aufgezeigt werden. Diese Erkenntnisse wurden mit theoretischen Überlegungen erzielt und simulativ und messtechnisch abgesichert.

Generell liegen – wie in diesem Bericht an verschiedenen Stellen ausdetailliert – in Hochvolt-Systemen höhere Störungen vor als im konventionellen 12 V-System. Diese können mit Filter- bzw. Schirmungsmaßnahmen am Überkoppeln auf andere Systeme, insbesondere die fahrzeugeigenen Antennen, gehindert werden. Dabei ergänzen sich beide Maßnahmen. Im Sinne eines Optimums bezüglich Kosten, Gewicht und Performance muss deswegen in der Konzeptphase abgewogen und festgelegt werden, zu welchem Grade auf Schirmung und zu welchem auf Filterung gesetzt werden kann.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Zu dieser Optimierungsaufgabe gibt es keine allgemeingültige Lösung, vielmehr hängt sie von folgenden Faktoren ab:

- Anzahl der HV-Komponenten im Fahrzeug
- Anzahl der HV-Komponenten mit Spannungswandler (Hauptstörquellen)
- Räumliche Verteilung der HV-Komponenten im Fahrzeug
- Volumen der HV-Komponenten
- Stromverteilung im HV-Netz (Pfade mit hohen Strömen haben große und teure Filter zur Folge)
- Gleichteilstrategien mit anderen Fahrzeugprojekten.

Zur Veranschaulichung wurden in Abbildung 4 drei verschiedene Ausprägungen an Filter- und Schirmaufwand dargestellt. Die obere Variante zeigt eine extrem aufwändige Schirmung der einzelnen HV-Steuergeräte und den sie verbindenden HV-Leitungen. Dafür wurde auf eine Befilterung auf HV-Seite komplett verzichtet, lediglich in Richtung der 12V-Versorgungsanschlüsse der Steuerelektroniken wurden Filter realisiert. In der mittleren Variante wurden nun – je nach Störpotenzial unterschiedlich große – HV-Filter in den einzelnen HV-Anschlüssen der HV-Komponenten eingefügt, so dass die Anforderungen an die Gehäuseschirmungen reduziert werden konnten. Die letzte Variante erhöhte die Filteranstrengungen nochmals, so dass bei den HV-Leitungen auf eine einfachere Schirmvariante gewechselt werden konnte. Interessant hierbei war, dass sich herausstellte, dass mit den zusätzlichen Filtern in den störenden HV-Komponenten (Pulswechselrichter für die E-Maschine, elektrischer Klimakompressor, elektrischer Zuheizung) auf zusätzliche Filter in der (aus EMV-Störersicht passiven) Batterie in Richtung 12 V-Anschluss und zur DC-Ladeschnittstelle verzichtet werden konnte.

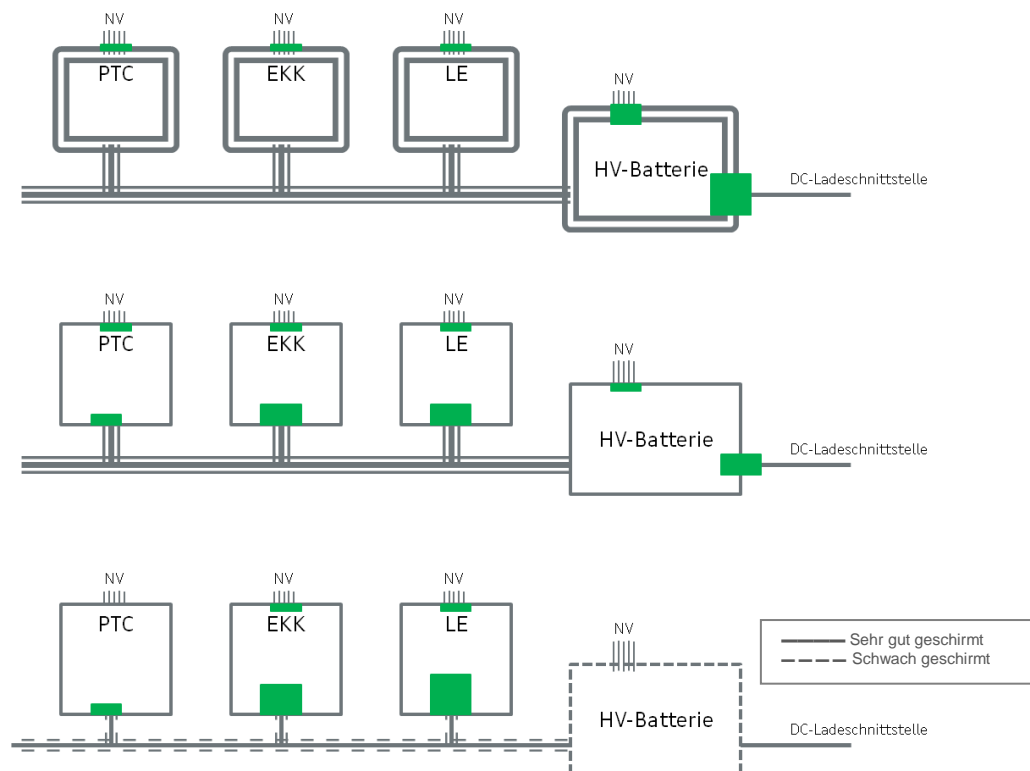


Abbildung 4: Verschiedene Varianten an EMV-Maßnahmen bei einer exemplarischen HV-Topologie mit von oben nach unten zunehmendem Filteraufwand (Größe der grün dargestellten Flächen) sowie gegenläufig abnehmendem Schirmaufwand

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Mit diesem Beispiel konnte plakativ gezeigt werden, dass zu Beginn der Entwicklung einer HV-Architektur eine Budgetierung an erlaubten EMV-Störungen und deren Abhilfemaßnahmen vorgenommen werden muss. Weiterhin wurde herausgearbeitet, dass als Lösungsraum für die Abhilfemaßnahmen zwar die komplette Architektur zur Verfügung steht, diese dann aber in Folgeeinsetzen/-projekten auch entsprechend mit vererbt werden müssen. Dies wiederum kann den Freiheitsgrad bei Folgeprojekten erheblich einschränken. Erschwerend kommt hinzu, dass der Bauraumbedarf von Filterung und/oder Schirmung von sehr vielen technischen Details abhängt, die in einer solch frühen Phase nicht immer sofort verfügbar sind.

EM4EM lieferte an dieser Stelle die nötigen Ergebnisse, um für zukünftige Projekte die EMV bereits an dieser Stelle diskutierbar zu machen. Das bedeutet, die EMV-Belange können in der Projektdefinitionsphase des Gesamtprojekts mit all den anderen Belangen mit abgewogen werden, bevor dann die entsprechenden Bauteillasthefte entstehen. D.h. die EM4EM-Ergebnisse geben die Möglichkeit, dass die EMV aktiv in der Systemauslegung der HV-Architektur berücksichtigt wird und dass nicht wie in der Vergangenheit bei der Entwicklung der Steuergeräte und Leitungen auf die Eigenschaften der Architektur reagiert werden muss.

2.1.2 Strompfadanalyse

Um die Strompfadanalyse durchführen zu können, mussten zunächst die Störquellen charakterisiert werden. Störquellen im HV-System sind hauptsächlich die Geräte, die über einen internen DC/DC- oder DC/AC-Wandler verfügen. Das größte Störpotenzial hat dabei aufgrund der höchsten geschalteten Leistung der Pulswechselrichter. Sein Spannungsschaltverhalten erzeugt Ableitströme an den parasitären Systemkapazitäten. In Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen der stromführenden Schleifen werden dadurch Magnetfelder erzeugt, die eine potentielle Störquelle darstellen.

Abbildung 5 zeigt schematisch potentielle Stromschleifen in einem vereinfachten HV-System. Die Amplitude der Ableitströme wird neben der getakteten Spannung im Wesentlichen durch die parasitäre Streukapazitäten des Elektromotors und des Wechselrichters bestimmt. Die eigentliche Störquelle entsteht auf dem Phasennetz (AC-Netz) durch das schnelle Schalten der IGBT-Module. Da AC- und DC-Seite galvanisch und kapazitiv gekoppelt sind, beschränken sich die hochfrequenten Ströme nicht auf das Phasennetz selbst, sondern entstehen auch auf der DC-Seite, welches in der Nomenklatur der Automobilhersteller auch als Traktionsnetz bezeichnet wird.

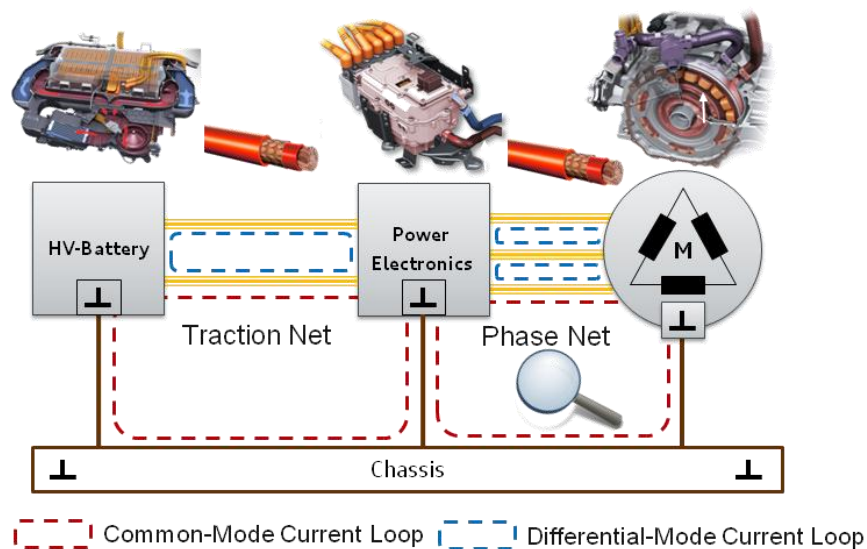


Abbildung 5: Potentielle Stromschleifen im HV-System

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

In diesem Bericht wird der Schwerpunkt zu einem überwiegenden Teil auf die AC-Seite gelegt, da die Ableitströme hier ihren Ursprung haben und die höchsten Pegel erwartet werden. Parasitäre Ableitströme werden durch die innerhalb von wenigen Nanosekunden geschaltete Zwischenkreisspannung verursacht. Die zeitveränderliche periodische Charakteristik der Spannung führt zu einem Stromfluss an den parasitären Kapazitäten. Sie ist proportional zu dem Kapazitätswert und der zeitlichen Ableitung der gepulsten Spannung. Der Zusammenhang ergibt sich mit:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}$$

Streukapazitäten bilden sich zwischen den einzelnen Phasen (X-Kapazitäten) und zwischen dem inneren Netz und dem gekoppelten Bezugssystem (Y-Kapazitäten). Durch die asymmetrische Spannungstaktung bilden sich Gegentakt-(DM) und Gleichtaktströme (CM) aus. Die Geometrie der Stromfahre haben einen entscheidenden Einfluss auf die magnetische Feldkopplung. Deshalb wurden die Unterschiede zwischen Gleich- und Gegentaktmodus getrennt herausgearbeitet, obwohl in realen HV-Systemen diese immer überlagert auftreten.

Gegentaktströme im Phasennetz

Die Abbildung 6 zeigt ein vereinfachtes HF-Ersatzschaltbild für das Phasennetz. Auf der rechten Seite sind die Hauptinduktivitäten des Elektromotors dargestellt, die im Sternpunkt zusammenlaufen. Diese Spulen haben üblicherweise Induktivitätswerte von einigen hundert μH und stellen im Prinzip ein Tiefpassfilter für hochfrequente Ströme dar. Die Güte der systembedingten Filterung wird jedoch von parasitären Kapazitäten verringert.

Dabei wird die kapazitive Kopplung in symmetrischen Schaltungen durch die X-Kapazitäten festgelegt. Klassische Beispiele sind die Wicklungskapazitäten der Spulenpakete, die Kapazitäten im Anschlussfeld und auch die kapazitive Kopplung zum metallischen Gehäuse. Die Dämpfungseigenschaften der Spulen werden daher herabgesetzt und der Strom bildet sich symmetrisch zwischen den Phasen aus.

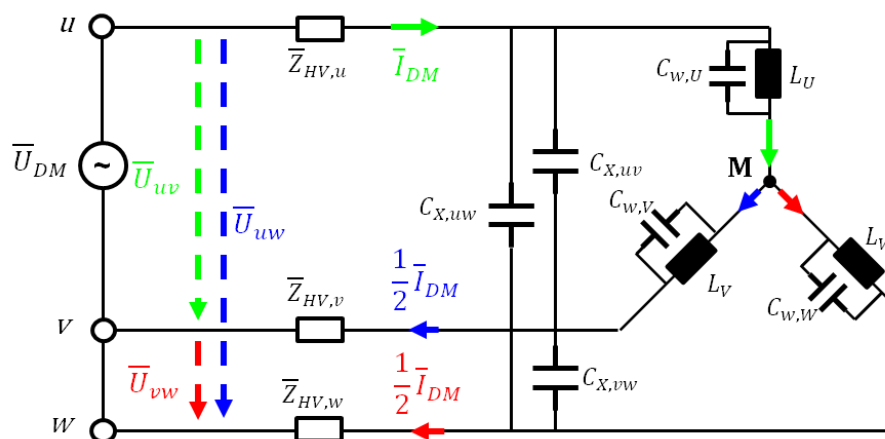


Abbildung 6: Symmetrisches HF-Ersatzschaltbild (AC-Seite)

Das Schaltverhalten des PWM-Inverters wird in diesem Abschnitt mit Hilfe eines SPICE-basierten Systemmodells illustriert. Die X-Kapazitäten sind jeweils mit 2 nF und der Sternpunkt-Masse-Pfad ist als isoliert angenommen, um ein rein symmetrisches System zu simulieren.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Aufgrund der sinusförmigen PWM gibt es charakteristische Flankenübergänge zwischen zwei benachbarten Schaltzuständen. Zwei Phase-Phase-Spannungen verändern dabei ihr Potential, während die verbleibende konstant bleibt. Somit kann eine Gegentakt-Spannungsquelle für einen bestimmten Schaltzustand in die Ersatzschaltung hinzugefügt werden (siehe Abbildung 6). Es wird ein symmetrischer Strom erzeugt, der jeweils über eine Phase zur Senke und mit halber Amplitude und um 180° phasenverschoben über die beiden verbleibenden Phasen zurück zur Quelle fließt. In Abhängigkeit vom jeweiligen Schaltzustand ändert sich die Position der modellierten Spannungsquelle fortlaufend.

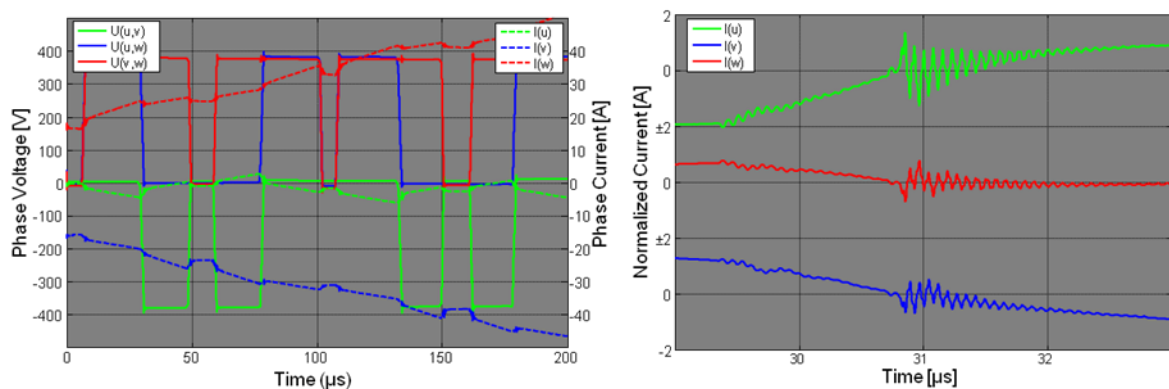


Abbildung 7: Simulierte Phase-Phase-Spannungen und dazugehörige Phasenströme

In Abbildung 7 ist eine SPICE-basierte Zeitbereichsanalyse illustriert. Im rechten Diagramm ist der Phasenstrom für einen bestimmten Schaltvorgang mit normiertem Niederfrequenzanteil hervorgehoben. Dabei deutlich zu erkennen sind die sich ausbildenden Stromripple durch die ohmisch-induktive Last und zusätzlich die hochfrequente Anregung durch den Einfluss der X-Kapazitäten.

Gleichtaktströme im Phasennetz

Gleichtaktströme entstehen durch das kapazitiv gekoppelte Referenzsystem, welches als separater Pfad im Ersatzschaltbild dargestellt ist (Abbildung 8). In automobilen HV-Systemen ist dieser Pfad nicht auf die Fahrzeugkarosserie beschränkt (Karosserie entspricht Schirmpotential), sondern kann bei unzureichender HV/NV-Entkopplung auch beispielsweise eine 12 V-Sensorleitung zwischen der Leistungselektronik und dem Elektromotor sein.

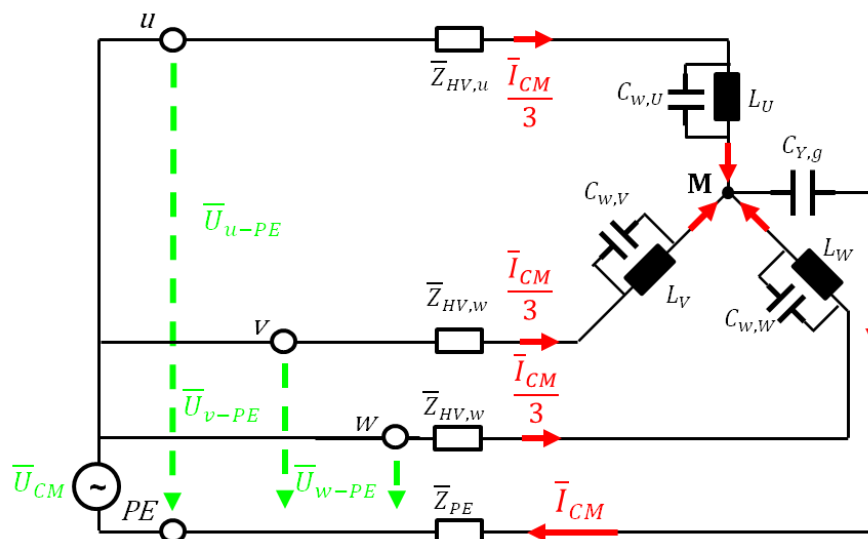


Abbildung 8: Asymmetrisches HF-Ersatzschaltbild (AC-Seite)

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die Gleichtaktstörquelle ist der geschaltete Spannungsabfall zwischen den einzelnen Phasen und dem Referenzsystem. Die Vektorsumme der momentanen Pulsphasenspannungen wird im Gegensatz zu einer reinen Sinusansteuerung nicht kompensiert. Sie berechnet sich mit:

$$\bar{U}_{CM} = \frac{\bar{U}_{u-PE} + \bar{U}_{v-PE} + \bar{U}_{w-PE}}{3}$$

Die Gleichtaktspannung ist damit eine sich periodisch wiederholende Schrittfunktion mit drei positiven und drei negativen Stufen. Die spektralen Anteile der Spannungsflanken können mit einer Wechselfeldspannungsquelle zwischen dem Sternpunkt und dem Referenzsystem modelliert werden. Dies führt zur Anregung von hochfrequenten Ableitströmen an den Y-Kapazitäten, die sich primär zwischen den Statorwicklungen und dem metallischen Gehäuse ausbilden. Aber auch die Antriebswelle, die eine große Kapazität zur Fahrzeugkarosserie ausbildet, kann einen Anteil zur Erzeugung von Gleichtaktströmen haben.

Charakterisiert werden sie durch einen gleich gerichteten Stromfluss über alle drei Phasenleitungen. Der Rückpfad ist das kapazitiv gekoppelte Referenzsystem, welches im Allgemeinen durch die metallischen Gehäuse der HV-Komponenten und der Fahrzeugkarosserie gebildet wird. Im Falle der Verwendung von Kabelschirmen sind diese ebenfalls ein Teil davon. Wie oben bereits erwähnt müssen bei unzureichender Hochvolt/Niedervolt-Entkopplung auch 12 V-Sensorleitungen und Versorgungsleitungen als mögliche Referenz berücksichtigt werden.

Im verwendeten asymmetrischen SPICE-Modell wurden die Y-Kapazitäten erneut mit 2nF angenommen, wobei diesmal der Massepfad als elektrisch leitfähig definiert wurde, um ein asymmetrisches Modell zu realisieren. Dies entspricht einer realistischen Applikation in Elektrofahrzeugen, da die Gehäuse der HV-Komponenten über den Potentialausgleich über Fahrzeugkarosserie und Kabelabschirmungen miteinander verbunden sind. Abbildung 9 zeigt die Gleichtaktspannung (grüne Kurve) und den resultierenden Gleichtaktstrom (rote Kurve).

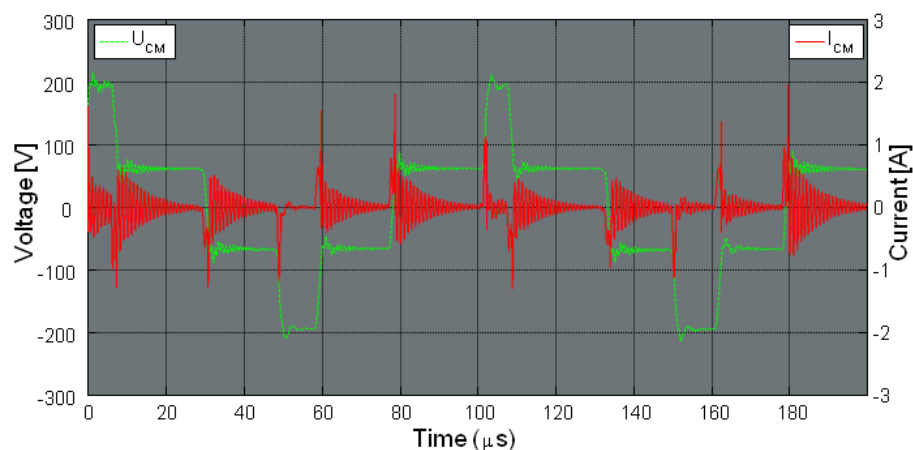


Abbildung 9: Simulierte Sternpunkt-Masse Gleichtaktspannung (grün) und Gleichtaktstrom (rot)

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

2.1.3 Entwurfsregeln

Entwurfsregeln für HV-Leitungen

Um die elektromagnetische Abstrahlung zu reduzieren, werden HV-Leitungen und HV-Komponenten geschirmt ausgeführt. Aufgrund der schnellen Schaltpulse im Inverter werden dielektrische Verschiebungsströme über parasitäre Kapazitäten generiert.

Magnetfelder

Diese hochfrequenten Ströme generieren abhängig von ihren Stromschleifenausprägungen magnetische Felder. Aufgrund der hohen Gegeninduktivität zwischen innerem Leiter auf der einen und dem Kabelschirm auf der anderen Seite wird ein niederimpedanter Rückpfad zur Störquelle generiert und die Stromschleife innerhalb der geschirmten Umgebung geschlossen. Das Hüllintegral über den Strom auf dem Innenleiter und dem dazu invertiertem Schirmstrom führt im Idealfall ($I_{\text{innen}} = I_{\text{schirm}}$) zu einer vollständigen Feldkompensation des Magnetfelds – analog zu einem koaxial betriebenen Kabel. Um diesem idealen Fall nahezukommen, werden extrem niederohmige und niederinduktive Kontaktierungen zu den Metallgehäusen der HV-Komponenten auf beiden Kabelseiten benötigt.

Elektrische Felder

Der Hochfrequenzanteil der PWM-getakteten Spannung erzeugt elektrische Felder zwischen leitenden Strukturen. Der Schirm der HV-Leitungen und –Komponenten stellt sicher, dass der Spannungsabfall innerhalb des geschirmten Systems stattfindet. Dadurch werden die elektrischen Felder innerhalb des geschirmten Bereichs eingeschlossen und die kapazitive Kopplung auf die Fahrzeugantennen signifikant reduziert.

Anforderungen an die Leitungen

Aus Gründen der HV-Sicherheit sehen die aktuellen Normen vor, dass die metallischen Oberflächen von HV-Komponenten mit der Fahrzeugkarosserie verbunden werden, die aus elektrischer Sicht jedoch auch die 12 V-Masse des Fahrzeugs darstellt. Die Karosserie muss von den HV-Potenzialen galvanisch getrennt sein. Aus EMV-Sicht müssen außerdem die Schirme der HV-Leitungen niederohmig und niederinduktiv mit den Gerätegehäusen verbunden werden. Diese Anforderungen in Summe verhindern, dass die HV-Leitungen elektrisch im Koaxialmodus betrieben werden. Dieser aus der Nachrichtenübertragung bekannte Betriebsmodus mit Hin- und Rückstrom auf dem Innenleiter und Rückstrom auf dem Außenleiter würde bezüglich Schirmwirkung das Optimum darstellen.

Stattdessen kommen separate Innenleiter für HV-Hin- und Rückstrom (bzw. für jede der 3 Phasen) zum Einsatz, von denen jeder einzelne oder alle zusammen über einen separaten Schirm verfügen, der elektrisch leitend mit dem (auf 12 V-Masse liegenden) Metallgehäuse der verschiedenen HV-Komponenten verbunden ist.

Um in dieser Konstellation eine ausreichende Performance des Schirms zu erzielen, müssen zwei Hauptparameter in Betracht gezogen werden: eine niedrige Impedanz im Schirmpfad von HV-Komponente zu HV-Komponente und eine niedrige Transferimpedanz des eingesetzten HV-Kabels.

Die Impedanz im Schirmpfad hängt ab von:

- Der Länge des HV-Kabels
- Dem Widerstandsbelag des Schirms des eingesetzten Kabels (wiederum abhängig von Material und Querschnitt des Schirms)
- Den Kontaktwiderständen im Schirmpfad der eingesetzten HV-Kontaktierungen.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

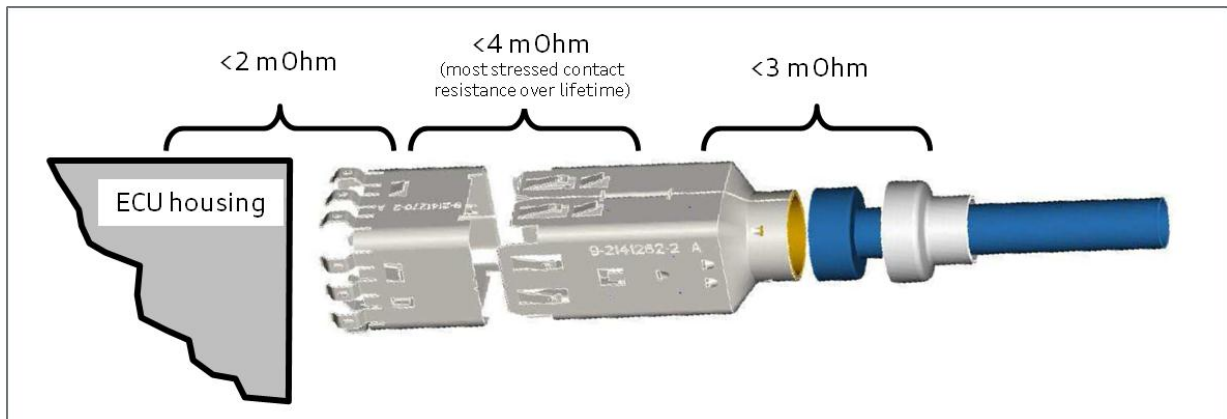


Abbildung 10: Kontaktwiderstände im Schirmpfad einer HV-Kontaktierung an einem HV-Steuergerät und vorgeschlagene Maximalwerte

In Abbildung 10 sind die Kontaktwiderstände im Schirmpfad einer beispielhaften HV-Steckverbindung aufgeführt. Neben den Widerstandsbelägen der beteiligten Materialien treten hier an drei Stellen Kontaktwiderstände auf: An den Übergabestellen zwischen Schirmgeflecht der Leitung und Schirmgehäuse des Steckers, zwischen den Schirmgehäusen des Steckers und der Buchse und zwischen der Buchse und dem Steuergerätegehäuse. Alle diese Kontaktstellen sind einem Alterungsprozess unterworfen, so dass über Lebensdauer mit zunehmenden Werten zu rechnen ist. Gründe hierfür sind mechanischer Stress (man beachte hierbei die aufgrund der räumlichen Ausdehnung relativ große Massen und Hebelwirkungen) sowie Alterung aufgrund Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel. Daraus leitet sich die nächste wichtige Designregel ab, nämlich die Stecker mechanisch robust und wasserdicht zu entwickeln. In der Abbildung 10 sind außerdem Limits für die Übergangswiderstände eingezeichnet, die vor und nach Alterungsstresstests einzuhalten sind, um über Lebensdauer die gewünschte Schirmwirkung erzielen zu können.

Um den ohmschen Widerstand über die komplette Kette von HV-Komponente über den Stecker und das Kabel wieder einen Stecker zur nächsten HV-Komponente sicherzustellen, muss weiterhin ein maximaler Schirmwiderstand für konfektionierte HV-Kabel sichergestellt werden. In Abbildung 11 sind diese Werte für 3-Phasenleitungen und Traktionsleitungen dargestellt. Beidseitig kombiniert mit den beiden äußeren Kontaktwiderständen aus Abbildung 10 ergeben sich somit beispielsweise für eine einzelne Leitung der 3-Phasenleitung ein worst-case Schirmpfadwiderstand von 23 m Ω , der sich im System aufgrund der Parallelschaltung der drei einzelnen Leitungen auf 7,7 m Ω einstellt. Mit diesen Werten haben die Leitungs- und Steckerentwickler wichtige Vorgaben an die Hand bekommen, die nur noch um die HF-Eigenschaften ergänzt werden müssen, welche im Folgenden erläutert werden sollen.

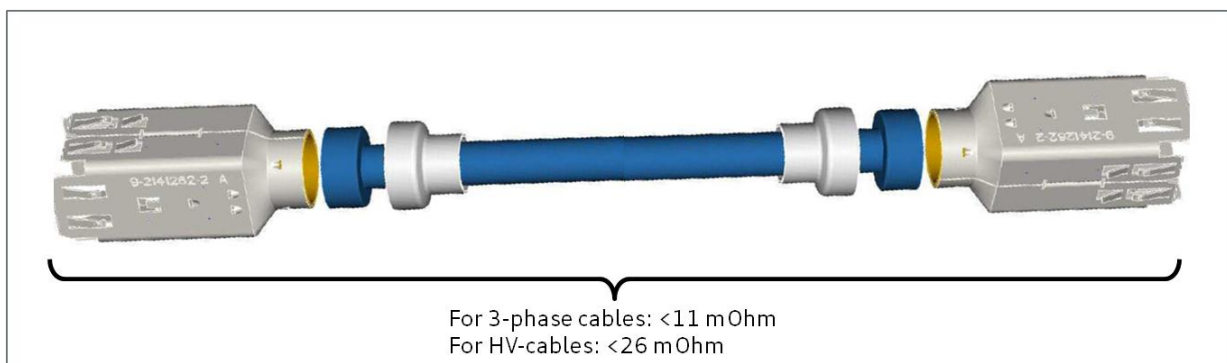


Abbildung 11: Grenzwert des Schirmwiderstands einer konfektionierten HV-Leitung

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Die diskutierten DC-Widerstände garantieren die Schirmperformance bis zu einigen hundert Kilohertz. Für Störungen im darüber liegenden Frequenzbereich müssen zusätzliche Parameter definiert werden. Dazu hat sich die Transferimpedanz aus der Norm IEC 62153-4-3 **Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden.** als sinnvolle Größe gezeigt, mit der das Schirmverhalten bis hin zu einigen hundert Megahertz beschrieben und getestet werden kann. In Abbildung 12 wird der Messaufbau zur Bestimmung der Transferimpedanz für unkonfektionierte HV-Leitungen gezeigt. Bei entsprechenden Messungen stellt sich heraus, dass die Schirmperformance vom Querschnitt des Schirmgeflechts, dessen Flechtwinkel, Bedeckungsgrad und der Leitungsinduktivität insbesondere an den Kontaktierungsstellen zum Schirmgeflecht abhängt. Um letztgenannte klein zu halten, müssen über den Kontaktierungsumfang mehrere Kontaktstellen vorgesehen werden. Dies ist beispielhaft auch bei der Steckverbindung in Abbildung 10 ersichtlich.

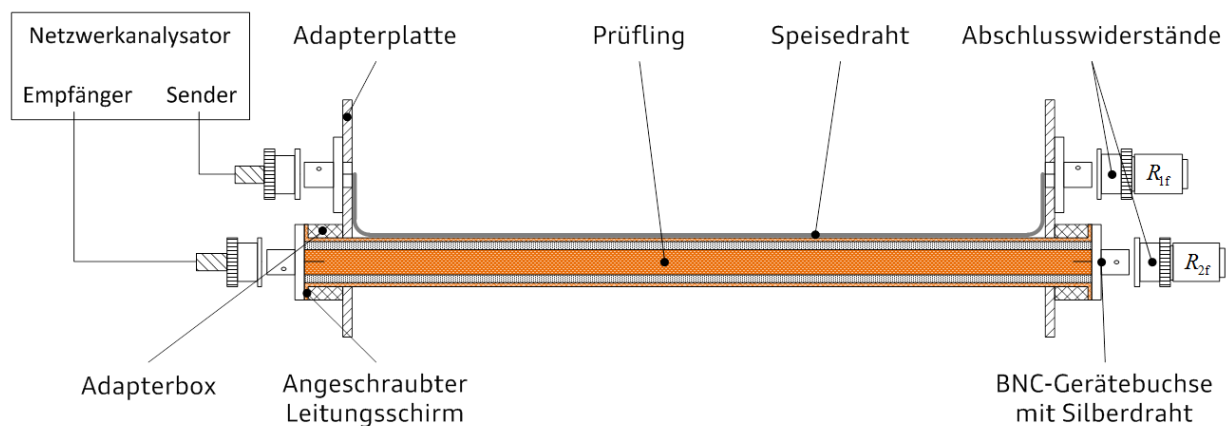


Abbildung 12: Messaufbau zur Bestimmung der Transferimpedanz mit dem Speisedrahtverfahren bei unkonfektionierten HV-Leitungen (*Meterware*)

Im Rahmen von EM4EM wurden seitens der AUDI AG gemeinsam mit dem Partner Technische Universität Dortmund Untersuchungen mit konfektionierten HV-Leitungen in systemtypischer Verschaltung durchgeführt, die die Relation zum Standard-EMV-Emissionsmessverfahren gem. CISPR-25 [6] auf Systemebene zeigen. Daraus wurde seitens der TU Dortmund ein neuer Messaufbau abgeleitet, der unter dem Begriff *ground plane method (GPM)* veröffentlicht wurde.

Entwurfsregeln für HV-Topologien

HV-Topologien lassen sich aufgrund ihrer Ausbreitung und Abstände zu den Fahrzeugantennen in Kategorien von EMV-günstig bis EMV-ungünstig einordnen. Exemplarisch ist dies für sehr unterschiedliche Anordnungen in Abbildung 13 dargestellt. Im realen Fahrzeug hängt diese Kategorisierung von sehr vielen Parametern ab. Auf diesen Überlegungen basiert dann auch das Zonenkonzept, welches in WP6 detaillierter ausgearbeitet wurde.

Eng verknüpft mit den Architekturregeln sind die Entwurfsregeln für die HV-Kabelverlegung. Dabei ist der Übergang mitunter fließend. Im folgenden Abschnitt soll zunächst auf einige prinzipielle Verlegeregeln eingegangen werden. Abbildung 14 zeigt den maximalen Abstand, den zusammengehörige Leitungen, also z.B. die Phasenleitungen u , v und w oder HV+ und HV- der Traktionsleitung, haben sollten. Mit dieser Abstandsminimierung erreicht man kleine Schleifen für Differentialmodeströme und reduziert so die Abstrahlung von differenziellen Störsignalen.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

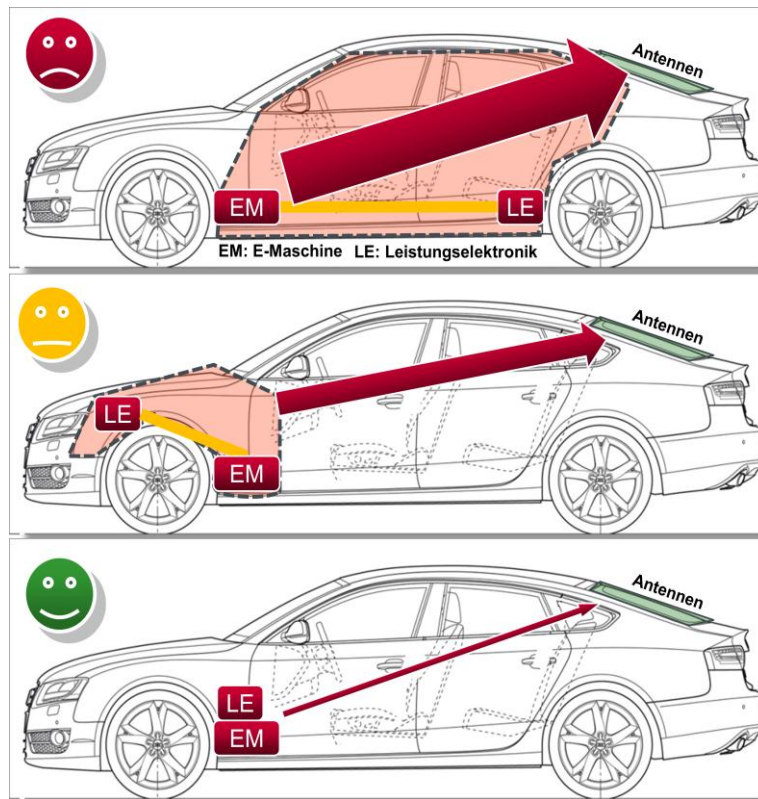


Abbildung 13: Abhängigkeit der Überkopplung vom Abstand der HV-Komponenten untereinander als auch von deren Abstand zu den Fahrzeugantennen

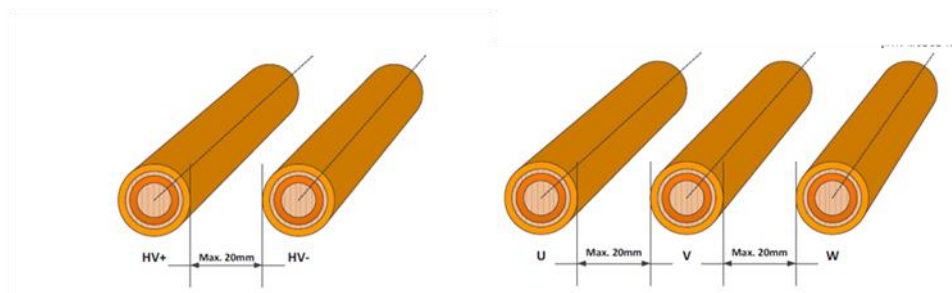


Abbildung 14: Maximaler Abstand von zusammengehörigen HV-Kabeln

Um die Überkopplung von Störungen von der Hochvoltebene in die 12 V-Ebene zu verhindern, wurden im Laufe des Projekts auch hier Mindestabstände definiert. Es konnte gezeigt werden, dass hier die induktive Kopplung überwiegt, die proportional zum Abstand der Leitungen und deren parallelen Länge ist. Deswegen wurde hier den Konstrukteuren ein geometriebasiertes Regelwerk zur Hand gegeben, welches zu bestimmten Längen der parallelen Leitungsführung dazugehörige Mindestabstände vorgibt. Ein Beispiel für ein bestimmte Konstellation ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

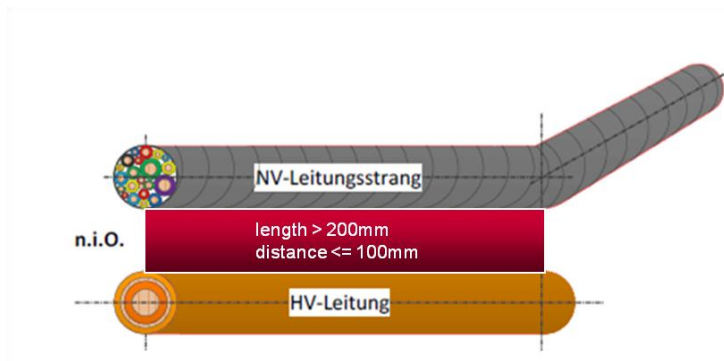


Abbildung 15: Abstandsdefinition zur Vermeidung von Störkopplung zwischen HV und NV

Nachdem die Überkopplung von verschiedenen Faktoren abhängt (Abstand, Schleifenflächen, Abstand zur Karosserie, verwendeten Leitungstypen, tatsächlich vorherrschende Störpegel auf der HV-Leitung), muss dieses Regelwerk den worst-case abdecken. Können aufgrund geometrischer Limitierungen diese strengen EMV-Anforderungen nicht eingehalten werden, beauftragen die Konstrukteure eine Detailbewertung durch die EMV-Experten. Dank EM4EM steht dafür jetzt ein Simulationsverfahren zur Verfügung, mit dem in diesen Einzelfällen dann die tatsächliche Überkopplung zwischen der HV-Stromschleife und der 12 V-Schleife als Störquelle berechnet werden kann (in Abbildung 16 ist exemplarisch die Verifikation der Simulation anhand einer Messung mit dem eBuggy gezeigt).

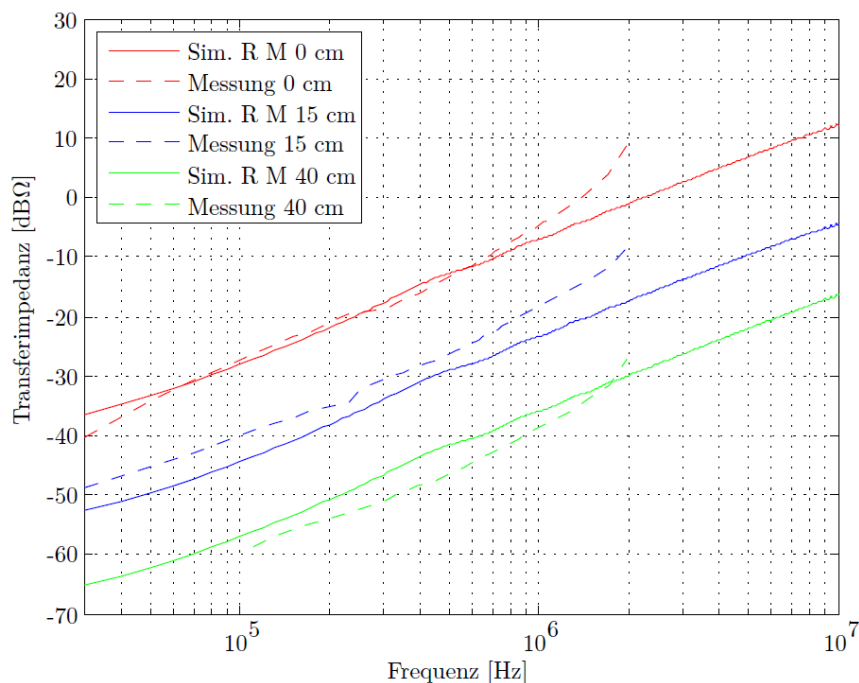


Abbildung 16: Simulatorische Bestimmung der Transferimpedanz zwischen eine HV-Stromschleife und einer 12V-Schleife als Störquelle

Daraus kann dann der EMV-Spezialist noch vor einer absichernden Fahrzeugmessung entscheiden, ob das konstruierte Leitungsrouting seitens der EMV Abteilung akzeptiert werden kann. Somit kann ein effizienter Konstruktionsprozess installiert werden:

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Zunächst werden die Komponenten und Leitungen von den Konstrukteuren im 3D-Fahrzeugmodell unter Berücksichtigung der worst-case-EMV-Anforderungen platziert. Kommt es dann aufgrund der Designregeln zu Packagekonflikten oder die Anforderungen lösen extreme Aufwände aus, dann wird eine EMV-Detailanalyse wie oben beschrieben ausgelöst. Mit dieser Vorgehensweise wird der Konstruktionsprozess beschleunigt und Ressourcen in der EMV-Abteilung optimiert.

2.1.4 Anforderungen an EMV-Messverfahren

Die Bestimmung des EMV-Verhaltens eines Gesamtfahrzeuges bedarf der vorherigen Festlegung eines Prüfplans. Nur so ist es möglich Optimierungsschleifen im Rahmen der Prototypenentwicklung hinsichtlich ihrer EMV bewerten zu können. Die zu definierende Testumgebung wird dabei immer einen Kompromiss darstellen, da eine allumfassende EMV-Betrachtung aufgrund diverserer ökonomischer Faktoren, wie z.B. Zeit und Kosten, nicht zu bewerkstelligen ist.

Im Rahmen des EM4EM-Projekts wurde ein elektrifizierter Forschungsdemonstrator (Abbildung 17) auf Gesamtfahrzeugebene aufgebaut. Auch hier mussten Kompromisse eingegangen werden. Die Beantwortung folgender Fragestellungen führte zur Entwicklung der im Folgekapitel definierten EMV-Testumgebung.

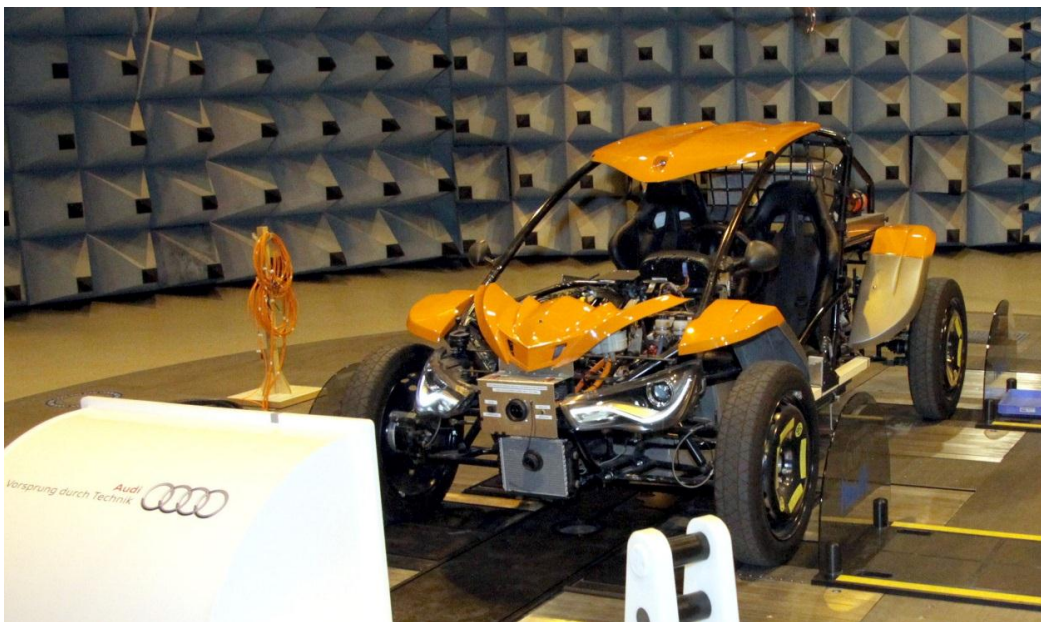


Abbildung 17: Elektrifizierter Fahrzeugdemonstrator (*eBuggy*)

Fokus auf Störemission

Die Bewertung der EMV eines Systems erfordert im Allgemeinen Störaussendungs- und Störfestigkeitsmessungen. Während der Fahrzeugentwicklung werden immer beide Disziplinen betrachtet, denn es gilt: Eine Optimierung von elektrischen Komponenten hinsichtlich Störemission heißt nicht zwangsläufig, dass sie dadurch robuster gegen externen Feldbeeinflussung werden.

Durch die Integration eines Pulswechselrichters gelangt eine Störquelle in das Fahrzeug, die dort zunächst einmal ein emittierendes Störpotential entfaltet. Störfestigkeitsprüfungen sind selbstverständlich ebenfalls Gegenstand einer umfassenden EMV-Testumgebung für elektrifizierte Fahrzeuge (z.B. ESD-Schutz). Es ist aber grundsätzlich davon auszugehen, dass HV-Komponenten nicht empfindlicher als NV-Komponenten sind. Im Rahmen des Förderprojektes EM4EM wurde der Fokus auf die Störemission gelegt, da der Forschungsbedarf für diese Disziplin weitaus größer ist.

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

Komponenten als Gegenstand der EMV-Bewertung

Ein Fahrzeug besteht aus einer Vielzahl an Steuergeräten, die mit Leitungen und Steckern in einem komplexen Bordnetz miteinander interagieren. Generell wird im Rahmen der EMV-Entwicklung jedes elektronische Bauteil mit Stecker bewertet.

Auch der eBuggy verfügt über eine große Anzahl an Steuergeräten, die nicht Gegenstand der im Projekt definierten Forschung waren. Hier gilt es den Blick auf das zu bewertende Subsystem zu richten. Dies geht jedoch nicht mit der Vernachlässigung relevanter Schnittstellen einher. So ist neben dem eigentlichen HV-System auch immer das angrenzende NV- und Mas-System in die EMV-Bewertung mit einzubeziehen.

Spezifikationen für die Messumgebung

Durch die gewonnenen theoretischen und messtechnischen Erkenntnisse im EM4EM Projekt konnte neben den Koppelpfaden auch die spektrale Verteilung der zu erwartenden Störungen identifiziert werden. Der signifikante Anteil der elektromagnetischen Feldexposition bewegte sich danach im Bereich von einigen 100 Hz bis ~ 100 MHz. EMV-Tests z.B. im Frequenzbereich von Mobilfunkdiensten waren deshalb nicht erforderlich, da hier keine Beeinflussung zu erwarten ist, die über den sonst üblichen Einwirkungen durch NV-Elektroniken auftritt.

Aufgrund der vorangegangenen Überlegungen wurden in Abbildung 18 Messpunkte definiert, welche zusammen mit dem HV-System des Demonstrators schematisch dargestellt sind.

Die hier gezeigten Messgrößen lassen sich in 2 übergeordnete Gruppen einteilen:

- Leitungsgebundene Störgrößen (Strom, Spannung)
- Gestrahlte Störgrößen (E-Feld, H-Feld, EM-Welle).

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

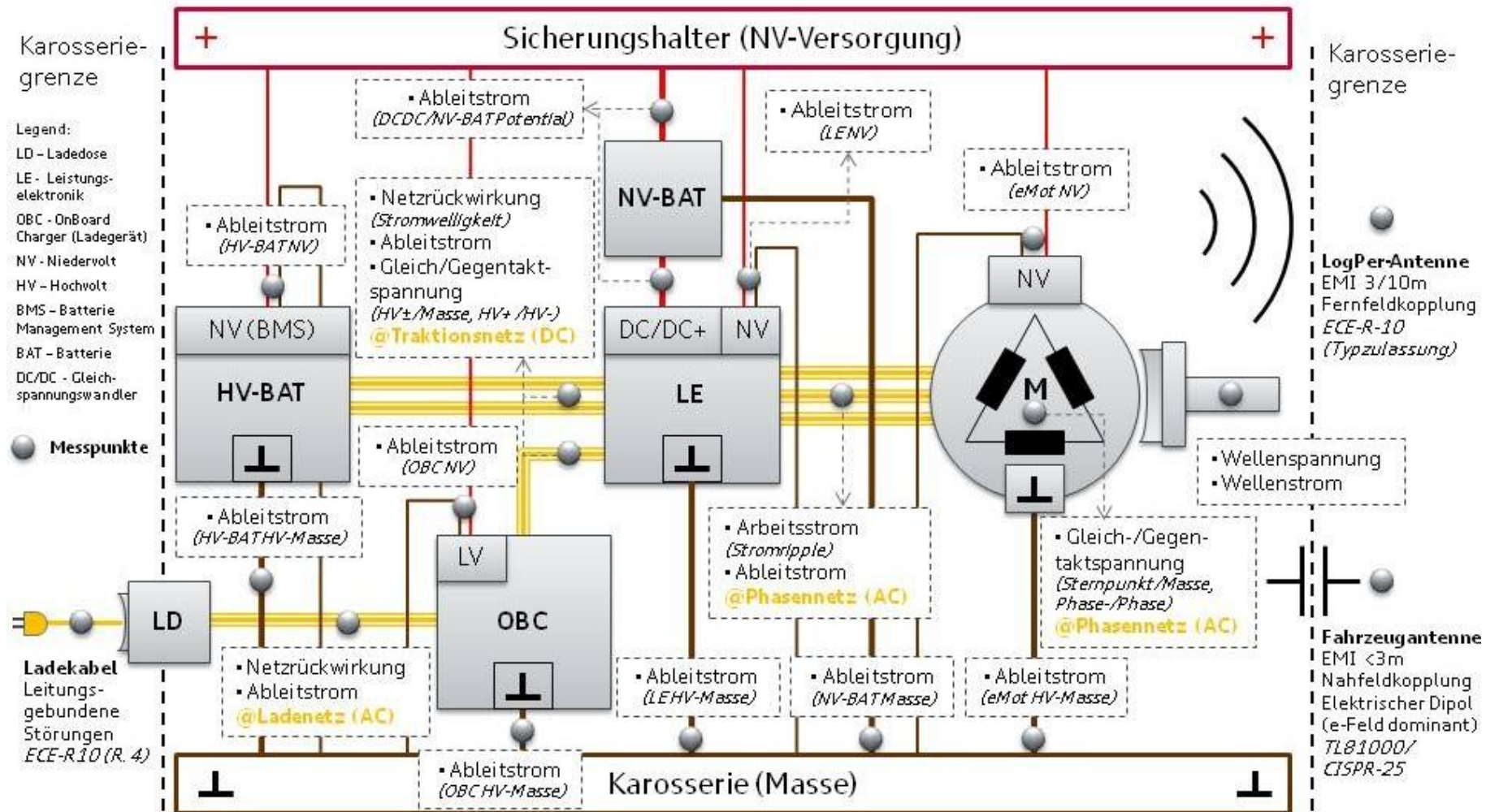


Abbildung 18: Testplan für das HV-System auf Demonstratorebene (ohne Kommunikation)

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

2.2 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- [1] Kühn M., Obholz M., Fischer G., Weigel, R., Ussmüller T.; *Untersuchung der Einsetzbarkeit analytischer Modelle zur Vorhersage der Schirmdämpfungen von metallischen Gewebematerialien*; Dortmunder Autotag 2012
- [2] Kühn M., John W., Weigel R.; *Validation of a measurement method for magnetic shielding effectiveness of a wire mesh enclosure with comparison to an analytical model*; Advances in Radio Science, Vol.11, 2013
- [3] Kühn m., John W., Weigel R.; *Analytical Calculation of intrinsic Shielding Effectiveness for isotropic and anisotropic materials based on measured electrical properties*; Advances in Radio Science, Vol.12, 2014
- [4] Kühn M., John W., Weigel R.; *Bestimmung der Schirmdämpfung von isotropen und anisotropen Materialien auf Basis von Messungen und analytischen Modellen*, Automotive meets Electronics 2014; 5. GMM-Fachtagung, Dortmund, 2014
- [5] Sekels D., Hiebel S., Kühn M.; *Kettenmatrixmethode für die Prädiktion der Schirmdämpfung von mehrschichtigen Materialien*; EMV 2014, Düsseldorf, 2014
- [6] Hiebel S., Filistovich F., Kühn M., Weber T.; *Niederfrequente magnetische Störfelder: Beispiele, Messung, Maßnahmen*; EMV 2014, Düsseldorf, 2014
- [7] Spindler C., Giese M., Palm S., Hesz M., Kühn M., Beintner J.; *Increased Sensor System EMI Robustness for Electric Vehicles*; EMC Europe 2014, Gothenburg, 2014
- [8] Kühn M., John W., Weigel R.; *Analysis of two different Transmission-Line Holder Systems for Shielding Effectiveness Measurements of Conductive Material Samples Part I: Capacitive Coupled TLH*; EMC Europe 2014, Gothenburg, 2014
- [9] Kühn M., John W., Weigel R.; *Analysis of two different Transmission-Line Holder Systems for Shielding Effectiveness Measurements of Conductive Material Samples Part II: Capacitive and Galvanic Coupled TLH*; EMC Europe 2014, Gothenburg, 2014
- [10] Krause D.; *Investigations on the Magnetic Field Coupling of Automotive High Voltage Systems to Determine Relevant Parameters for an EMR-optimized Designing*; ARS Journal 2015 - Volume 13 (Kleinheubacher Berichte 2014)
- [11] Feng H., John W., Mathis W.; *Modeling of Shielded Coaxial Cable: Calculation of Constellation independent Inductance Matrix*; EMC Europe 2014, Gothenburg Sweden
- [12] Leopold, J.; *EMV für die Elektromobilität 2.0*; Elektronik im Fahrzeug, Baden-Baden, Germany, 2013

Geplante Veröffentlichungen

- [1] Krause D., John W., Weigel R.; *EMV-Analyse leitungsgebundener Störgrößen eines elektrifizierten Fahrzeugdemonstrators für dynamische Fahrzustände*; EMV 2016, Düsseldorf, Deutschland
- [2] Krause D., John W., Weigel R.; *Development of a method to evaluate the EMR behavior of automotive high voltage topologies applying a zone concept on vehicle level*; ARS (Kleinheubacher Berichte 2015) Miltenberg, Deutschland

Vorträge

- [1] Kühn M.; *Theoretical Analysis of a Transmission-Line-Holder System for Shielding Effectiveness Measurements*; CST Workshop Series 2013, München
- [2] Kühn M.; Christoph Plett, Dr.-Ing. Werner John, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel, *Analytical Calculation of intrinsic Shielding Effectiveness for isotropic and anisotropic materials based on measured electrical properties*; Kleinheubacher Tagung 2013, Miltenberg, 2013
- [3] Kühn M.; Dr.-Ing. Werner John, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel, *Characterization of contacting concepts for shielding enclosures and impact on magnetic shielding effectiveness*; Kleinheubacher Tagung 2014, Miltenberg, 2014
- [4] Krause D.; *Investigations on the Magnetic Field Coupling of Automotive High Voltage Systems to Determine Relevant Parameters for an EMR-optimized Design*; Kleinheubacher Tagung 2014, Miltenberg Deutschland

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

- [5] Kühn M.; *Analysis of two different Transmission-Line Holder Systems for Shielding Effectiveness Measurements of Conductive Material Samples Part I: Capacitive Coupled TLH*; IEEE EMC Europe 2014, Göteborg, Sweden
- [6] Kühn M.; *Bestimmung der Schirmdämpfung von isotropen und anisotropen Materialien auf Basis von Messungen und analytischen Modellen*; Kleinheubacher Tagung 2014, Miltenberg Deutschland
- [7] Kühn M.; *Analysis of two different Transmission-Line Holder Systems for Shielding Effectiveness Measurements of Conductive Material Samples Part II: Capacitive and Galvanic Coupled TLH*; IEEE EMC Europe 2014, Göteborg, Sweden
- [8] Hiebel S., Kühn M.; *Niederfrequente magnetische Störfelder: Beispiele, Messung, Maßnahmen*; EMV 2014, Düsseldorf Deutschland
- [9] Leopold J.; *EMC and e-mobility – two opposites*; ENF 2014, Caen Frankreich
- [10] Leopold J.; *Innovatives EMV-Fitnessprogramm für die E-Mobilität 2.0*; Statusseminar 2014 (BMBF), Bonn Deutschland
- [11] Feng H.; *EMC Solutions on System-Vehicle-Level for e-mobility*; ENF 2014, Caen Frankreich
- [12] Feng H.; *Modelling of Coaxial Cable With Shield Grounding*; Kleinheubacher Tagung 2014, Miltenberg Deutschland
- [13] Feng H.; *Modeling of Shielded Coaxial Cable: Calculation of Constellation Dependant Inductance Matrix*; IEEE EMC Europe 2014, Göteborg, Sweden
- [14] Feng, H.; *Modelling of Shielded Cables for Different Modes of Operation*; Kleinheubacher Tagung, 25. September 2013, Miltenberg - Germany
- [15] Leopold, J., John, W.; *EM4EM Status Presentation (Poster)*; eMobility Workshop 2013 (BMBF); Bonn - Germany – 4./5.12. 2013

Geplante Vorträge

- [1] Krause D., John W., Weigel R.; *Development of a method to evaluate the EMR behavior of automotive high voltage topologies applying a zone concept on vehicle level*; Kleinheubacher Tagung 2015, Miltenberg, Deutschland
- [2] Krause D., John W., Weigel R.; *EMV-Analyse leitungsgebundener Störgrößen eines elektrifizierten Fahrzeugdemonstrators für dynamische Fahrzustände*; EMV 2016, Düsseldorf, Deutschland

Abschlussbericht – EM4EM – 01-Audi

- Technische Informationsbibliothek Hannover (TIB)/BMBF-Bibliothek -

3 Literaturverzeichnis

- [1] *Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ – Emissionen von Personenkraftwagen*, <http://www.bmub.bund.de/>
- [2] IEC 61800-3:2004 + A1:2011; *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe - Teil 3: EMV-Anforderungen einschließlich spezieller Prüfverfahren*
- [3] *EMV-Installationsmaßnahmen für Frequenzumrichter; EMV-gerechte Installation von elektrischen Antriebssystemen*; Danfoss Offenbach, 3. Ausgabe, 2001
- [4] ECE-R10; *Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit Funkentstörung*;
- [5] ISO 7637, *Road Vehicles - Electrical disturbance by conduction and coupling*
Part 1: Definitions and general considerations
Part 2: Electrical transient conduction along supply lines only on vehicles with nominal 12 V or 24 V supply voltage
Part 3: Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines
Part 4 (draft): Electrical transient conduction along shielded high voltage supply lines only
- [6] IEC CISPR-25; *Limits and methods of measurement of radio interference characteristics of vehicles for the protection of receivers used on vehicles*
- [7] A. Muetze; *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*; Ph.D. dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Deutschland, 2004.
- [8] S. Ogasawara; *Modeling and Damping of High-Frequency Leakage Currents in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems*; IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5):1105-1114.
- [9] X. Pei, K. Zhang, Y. Kang and J. Chen, *Analytical Estimation of Common Mode Conducted EMI in PWM Inverter*; Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting, October 3-7, 2004. Vol.4 2651-2656.
- [10] G. Grandi, D. Casadei and U. Reggiani; *Analysis of Common- and Differential-Mode HF Current Components in PWM Inverter-Fed AC Motors*; Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, May 17-22, 1998. Vol.2 1146-1151.
- [11] L. Ran, S. Gokani and J. Clare; *Conducted Electromagnetic Emissions in Induction Motor Drive Systems Part II: Frequency Domain Models*; IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4):757-767.
- [12] L. Ran, S. Gokani and J. Clare; *Conducted Electromagnetic Emissions in Induction Motor Drive Systems Part I: Time Domain Analysis and Identification of Dominant Modes*; IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4):768-776.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN - ISSN geplant -	2. Berichtsart - Schlussbericht -
3. Titel Entwurfs- und EMZ-Messmethodik für EMZ-Analysen auf EV-Gesamtsystemebene	
4. Autor(en) Dr.-Ing. J. Leopold/ M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) T. Enzinger/Dipl.-Ing. F. Jacob Dipl.-Ing. Ch. Lippert/Dipl.-Ing. K. Friedrich/ M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) M. Kühn/ M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) H. Feng/M. Sc. David Krause	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31. März 2015
	6. Veröffentlichungsdatum 30. September 2015
	7. Form der Publikation Technischer Bericht
8. Durchführende Institution AUDI AG Entwicklung EMV / Antennen, Bordnetzerprobung - I/EE-25 85045 Ingolstadt	9. Berichts-Nr. <i>Durchführende Institution</i> - entfällt -
	10. Förderkennzeichen 16 M3092A
	11. Seitenzahl 28
12. Fördernde Institution Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 12
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 18
16. Zusätzliche Angaben - entfällt -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) - entfällt -	
18. Kurzfassung Im Rahmen des Förderprojekts EM4EM wurde eine ganzheitliche Betrachtung der EMV von elektrifizierten Fahrzeugen durchgeführt. Hierfür wurden alle Ebenen der Wertschöpfungskette (Halbleiter-, Komponenten-, System- und Fahrzeugebene) sowie Universitäten berücksichtigt. Das Teilvorhaben der AUDI AG <i>Entwurfs- und Messmethodik für EMZ-Analysen auf EV-Gesamtsystemebene</i> erzielte die nachfolgend aufgelisteten Ergebnisse (Auszug): <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Auswirkungen von Leichtbauweisen auf das EMV-Verhalten von Komponenten und Fahrzeugen <input type="checkbox"/> Entwurfsregeln für HV-Architekturen, HV-Kabelführung, HV-Topologien <input type="checkbox"/> Erstellung von Simulationsmodellen für den elektrifizierten Antriebsstrang <input type="checkbox"/> Bereitstellung und Optimierung eines Demonstratorfahrzeugs (eBuggy) auf Basis der Projektergebnisse <input type="checkbox"/> Ermittlung und Klassifizierung der auftretenden Pulse im HV-Netz. EM4EM generierte ein ganzheitliches Verständnis für die EMV im Kontext der Elektromobilität. Die nächsten Herausforderungen zeichnen sich bereits ab, wie beispielsweise das autonome Fahren, welches gänzlich neue Herausforderungen birgt. Diese Herausforderungen sind beispielsweise die höchstzuverlässige Daten- und Energieübertragung im Fahrzeug.	
19. Schlagwörter Elektromagnetische Verträglichkeit - Elektromagnetische Zuverlässigkeit - Elektrofahrzeuge - HV-Topologien - HV-Netz - Elektrischer Antriebsstrang - Pulstestkonzepte - Filterentwurf - Schirmungskonzepte - EMV-Zonenkonzepte - EV-Entwurfsregeln - Leichtbau - Simulation - Modellierung	
20. Verlag - entfällt -	21. Preis - entfällt -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN - ISSN planned -	2. Type of Document Final Report
3. Title <i>Design and Measurement Methodologies for EMR Analysis on EV System Level</i>	
4. Author(s) Dr.-Ing. J. Leopold/ M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) T. Enzinger/Dipl.-Ing. F. Jacob Dipl.-Ing. Ch. Lippert/Dipl.-Ing. K. Friedrich/ M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) M. Kühn/ M. Sc. Dipl.-Ing. (FH) H. Feng/M. Sc. David Krause	5. End of Project 31. March 2015
	6. Publication Date 30. September 2015
	7. Form of Publication Technical Report
8. Performing Organization(s) AUDI AG Entwicklung EMV/Antennen, Bordnetzerprobung - I/EE-25 85045 Ingolstadt	9. Originator's Report No. - not applicable -
	10. Reference No. 16 M3092 A
	11. No. of Pages 28
12. Sponsoring Agency Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. No. of References 12
	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 18
16. Supplementary Notes - none -	
17. Presented at (Title/Place/Date) - not applicable -	
18. Abstract The project EM4EM used a holistic approach to analyse and optimize the EMC of electric vehicles. For this, consideration of the whole added value chain (semiconductor, component, system and vehicle level) and universities was necessary. The sub project of the AUDI AG called Design and Measurement Methodologies for EMR Analysis on EV System Level gained the following R&D results during the EM4EM project (extract): <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Influence of lightweight construction to the EMC behavior of components and vehicles<input type="checkbox"/> Design rules and guidelines for HV-architectures, HV-cable routing, HV-topologies<input type="checkbox"/> Development of simulation models (SPICE) for the electrical drive train<input type="checkbox"/> Deployment and optimization of a demonstrator vehicle (eBuggy) based on the EM4EM results<input type="checkbox"/> Determination and evaluation of pulses in the HV-net. EM4EM generated a holistic understanding of EMC in the context of electric mobility. The next challenges are still in the line of sight, like autonomous driving and optimized board net architectures. These challenges will need high reliable and secure data and energy communication in the vehicle.	
19. Keywords Electromagnetic Compatibility - Electromagnetic Reliability - Electric Vehicles – HV Topologies- HV Net - Pulse Testing Concept - Filter Design – Shielding Concepts – EMC Zone Concepts – EV Design Rules - Lightweight Engineering - Simulation - Modelling	
20. Publisher - not applicable -	21. Price - not applicable -