

# Aktuelle Entwicklungen bei den EMV-Anforderungen an Hochvolt-Systemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen

Christian Hillmer, Dr. Johann Heyen, Frank Golisch, Dr. Thomas Rinkleff, Volkswagen AG, Elektromagnetische Verträglichkeit, Wolfsburg, Germany

## 1 Einleitung

Dieser Artikel gibt einen Einblick in den aktuellen Stand der EMV-Normungsaktivitäten für Elektro- und Hybridfahrzeuge und -systeme.

Die physikalischen Effekte und Besonderheiten des Hochvolt-Systems bzgl. Störaussendung, Schirmung, Hochvolt-Niedervolt-Kopplung, gestrahlte, kapazitive und induktive Ausbreitungspfade von Störungen, Impulsen und Bordnetzwelligkeiten werden dargestellt.

Daraus lassen sich Konsequenzen für EMV-Messaufbauten, -Messverfahren sowie spezielle Anforderungen an Störaussendung, Bordnetzimpulse und die Ladeschnittstelle ableiten.

Die hierzu laufenden Aktivitäten in der EMV-Normung für Elektro- und Hybridfahrzeuge bei ISO, IEC, CISPR sowie den Zulassungsanforderungen nach ECE-R10 werden dargestellt.

### 1.1 Hochvolt-spezifische EMV Herausforderungen

Das Hochvolt-System eines Elektrofahrzeugs stellt besondere Anforderungen an die Einhaltung der Elektromagnetischen Verträglichkeit. Bei Versorgungsspannungen um die 400 Volt, Strömen von 200 Ampere und Taktfrequenzen der Leistungselektronik und der Nebenaggregate im einstelligen bis einigen zehn kHz-Bereich erhöhen sich die Störspektren im Vergleich zur bekannten 12V-Welt deutlich in der Amplitude (ca. Faktor 30) [1]. Auch die Pulse und Ausgleichsvorgänge im Hochvolt-Bordnetz (Bordnetzwelligkeiten) skalieren entsprechend. Bei der Ladeschnittstelle zum öffentlichen Netz sind Netzrück- und Wechselwirkungen (Blitzentladungen, Spannungsschwankungen, Harmonische, Flicker) zu berücksichtigen [2, 3].

### 1.2 Tätigkeitsfelder für die nationale und internationale Normung

Während die EMV-Normung für 12 V- und 24 V-Fahrzeugtechnik im Kraftfahrzeug über mehrere Dekaden einen hohen Reifegrad erreicht hat, müssen mit zunehmender Verbreitung von Elektro- und Hybridfahrzeugen für die Hochvolt-Systeme (HV, 60 V bis 1.500 V DC) zunächst Grundlagen geschaffen werden, die sukzessive in die EMV-Normung einfließen.

In Anlehnung an bestehende CISPR-Normung werden HV-spezifische Messverfahren vorgeschlagen. Diese Erkenntnisse fließen derzeit über die DKE in die internationale Normung (CISPR25) ein.

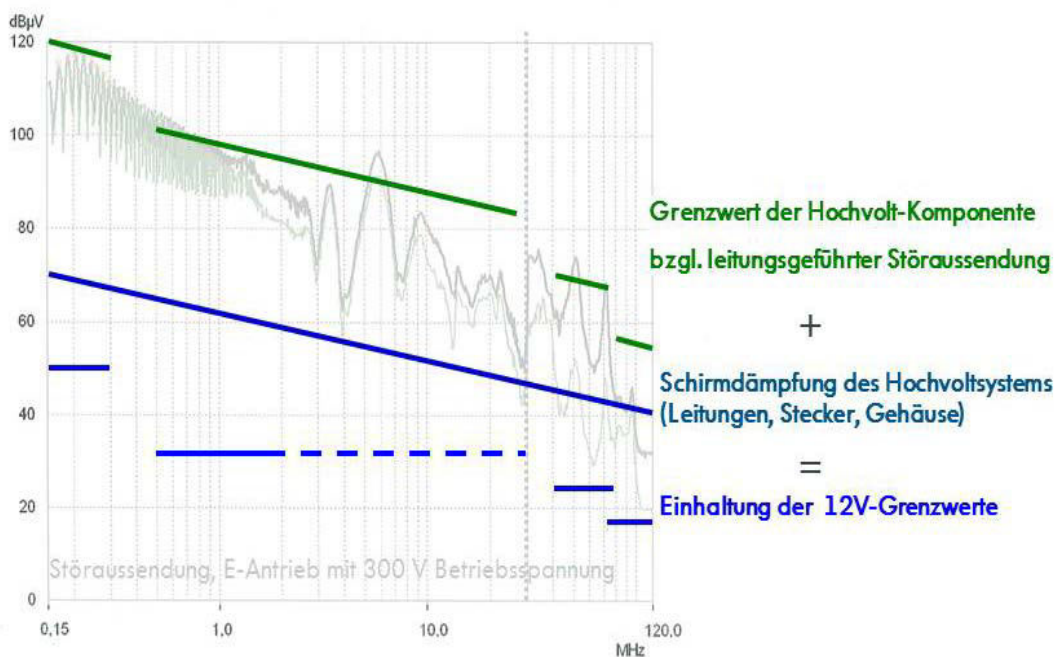
In analoger Vorgehensweise sind HV-spezifische Vorschläge für die Normung von Störimpulsen (z. B. durch PWM-Signale und deren höherfrequenten Anteile) ent-

standen, aus denen ein Entwurf für eine ISO 7637-4 abgeleitet wurde. Dieser ist von der ISO/TC22 als New Work Item Proposal (NWIP) angenommen worden. Die Schnittstelle zwischen Fahrzeug (ISO) und öffentlichem Versorgungsnetz (IEC) wird u. a. in IEC/ISO-Kollaboration bearbeitet (z. B. IEC 61851-21-x). Bezüglich der UN/ECE-weit einheitlichen EMV-Bedingungen für die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen ist zuletzt im Oktober d. J. der Entwurf einer aktualisierten ECE-R10-5 in Genf verabschiedet und an das nächst höhere Entscheidungsgremium (WP.29) weitergeleitet worden [4, 5, 6].

## 2 Störaussendung von Hochvoltssystemen

### 2.1 Grundlagen

Abbildung 1 zeigt die typische Störaussendung einer Hochvoltkomponente. Der Störpegel ist in dB $\mu$ V über die Frequenz bis 108 MHz aufgetragen. Des Weiteren sind die bekannten 12V-Grenzwerte dargestellt, deren Einhaltung für eine Nahentstörung erforderlich ist. Da die Entstörung der Hochvoltkomponente aufgrund der physikalischen Effekte (hohe Spannung, hoher Strom, schnelle Taktung) nicht immer beliebig umgesetzt werden kann, müssen weitere Maßnahmen ergriffen werden.



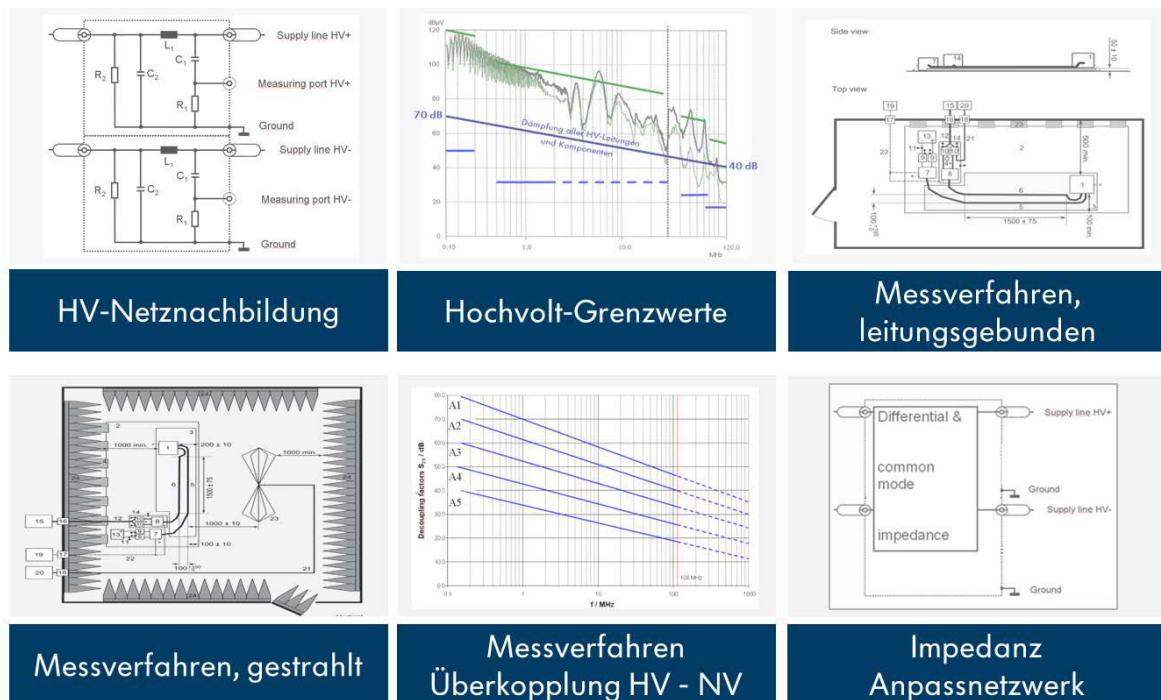
**Abbildung 1: Hochvolt-Störaussendungsanforderungen und Herleitung**

Hierzu wird das Hochvoltsystem bestehend aus mehreren Einzelkomponenten geschirmt ausgeführt. D. h., die Gehäuse der Komponenten, Hochvolt-Leitungen und –Stecker zur Verbindung der Komponenten müssen eine Schirmdämpfung aufweisen. Zusätzliche Hochvolt-Niedervolt-Entkopplung ist erforderlich, um die bekannten und bewährten 12V-Grenzwerte einzuhalten. Die benötigte Schirmdämpfung des Hochvoltsystems ist ebenfalls in Abbildung 1 eingezeichnet.

## 2.2 Hochvolt-Normungsaktivitäten (DKE 767.13.18 und CISPR 25)

Um diesen Phänomenen mit standardisierten Messaufbauten und Grenzwerten zu begegnen, wurden im Rahmen des DKE 767.13.18 deutsche Vorschläge erarbeitet. Diese sind international in die CISPR/D/WG2 Hochvolt-Taskforce eingespeist und werden in den nächsten CISPR25 Committee Draft einfließen [7]. Die Inhalte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Abbildung 2 zeigt eine Zusammenfassung der Handlungsfelder. Die Messaufbauten sind an bisherigen CISPR-Messaufbauten angelehnt, benötigen aber eine geeignete Hochvolt-Netznachbildung. Ein Impedanz-Anpassnetzwerk ermöglicht eine Anpassung der Messumgebung an reale Gegebenheiten. Dies ist aber bezüglich der Standardisierung und Vergleichbarkeit der Messungen als kritisch einzustufen.



**Abbildung 2: Handlungsfelder HV-Störaussendung**

Die Hochvolt-Grenzwerte für Störaussendung und Hochvolt-Niedervoltentkopplung sind in verschiedenen Grenzwertklassen aufgeteilt, um unterschiedlichen Eigenschaften von HV-Systemen bzgl. Entstörung, Schirmung und HV-NV-Entkopplung Rechnung zu tragen.

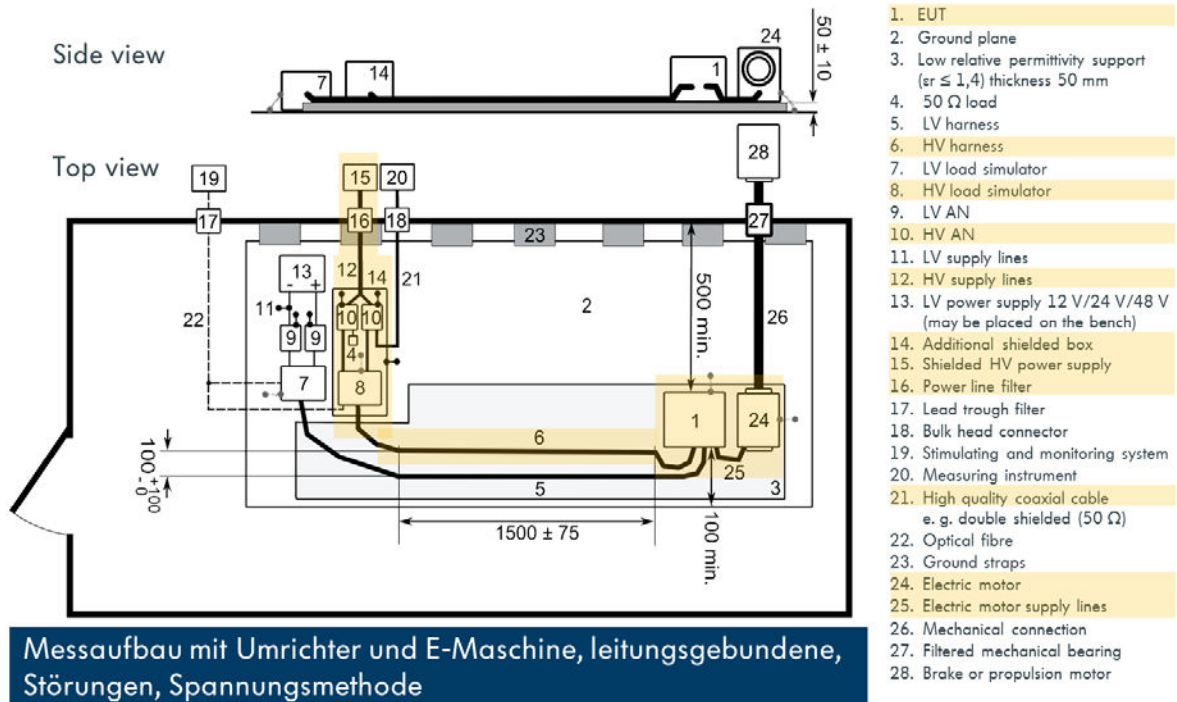
Die Messverfahren sind gestrahlt und leitungsgebunden (Spannungsmethode über HV-Netznachbildung und Strommessung via Koppelzange).

Tabelle 1 zeigt die Grenzwerte für die leitungsgebundene Messung nach der Spannungsmethode. Basierend auf den Klasse 5 Grenzwerten nach CISPR25, 6.2.3, Tabelle 5, werden zusätzliche Anforderungen addiert, die die Schirmeigenschaften und HV-NV-Entkopplung des jeweiligen HV-Systems berücksichtigen.

**Tabelle 1: Grenzwertklassen für leitungsgebundene Störaussendung nach Spannungsmethode**

Service / Band	Frequency MHz	Levels in dB(µV)				
		Class HV1	Class HV2	Class HV3	Class HV4	Class HV5
		AVG	AVG	AVG	AVG	AVG
BROADCAST						
LW	0,15 - 0,30	126	116	107	97	87
MW	0,53 - 1,8	101	92	83	74	66
SW	5,9 - 6,2	94	86	77	69	61
FM	76 – 108	65	58	51	44	37
TV Band I	41 – 88	72	65	57	50	43

Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Messaufbau für leitungsgebundene Störungen nach der Spannungsmethode. Hier ist ein komplexer Aufbau gezeigt für Umrichter als EUT (1) inklusive Peripherie, sprich Elektromotor (24), Welle (26), Wellendurchführung (27) und mechanischer Last (28). Weitere Permutationen sind dem Normentwurf zu entnehmen.



**Messaufbau mit Umrichter und E-Maschine, leitungsgebundene, Störungen, Spannungsmethode**

**Abbildung 3: Messaufbau leitungsgebundene Störung, Spannungsmethode**

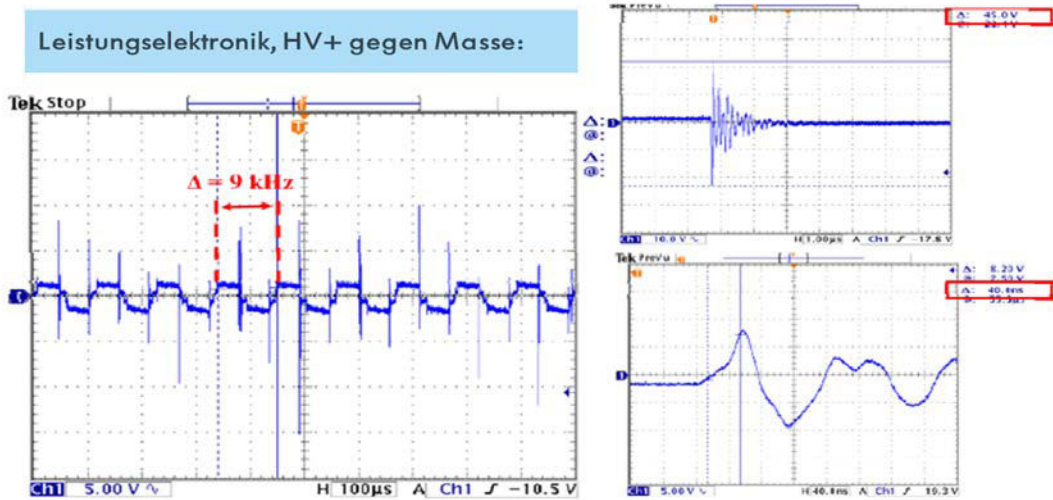
### 3 Hochvolt-Impulse

#### 3.1 Grundlagen

Die Leistungselektronik, Nebenaggregate und Batterieschütze seien beispielhaft als Ursache für Schalttransienten, Rechtecksignale, Überschwinger und deren höherfre-

quenten Anteile genannt. Diese breiten sich im Hochvolt-Bordnetz aus und können zu Störungen führen.

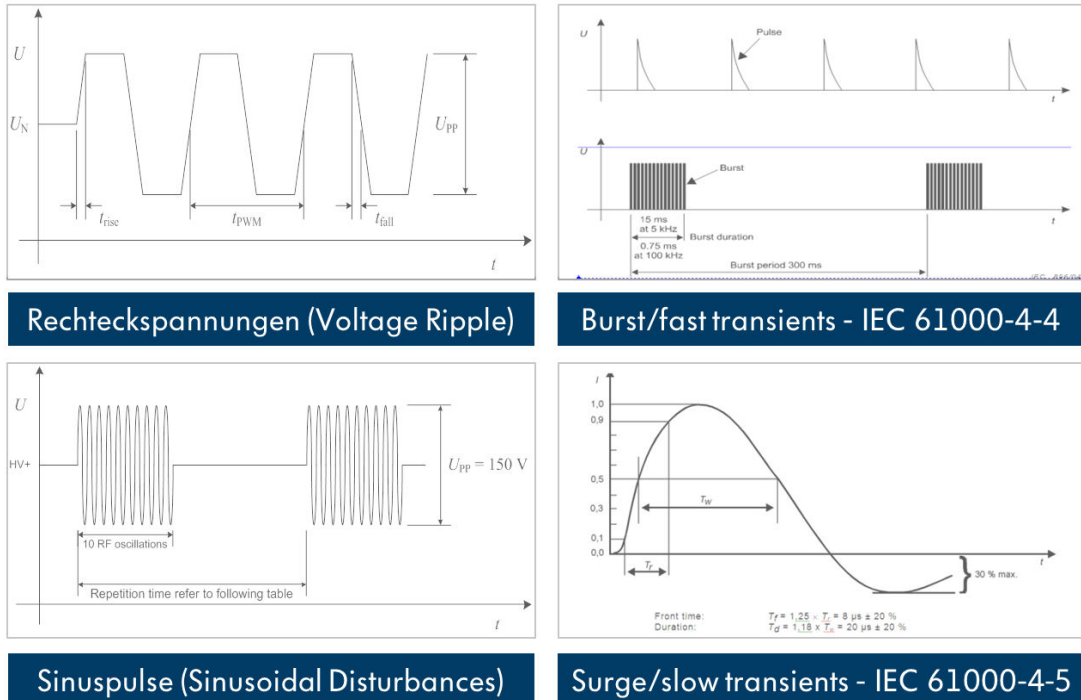
Abbildung 4 zeigt typische 9kHz-PWM-Signale einer Leistungselektronik und deren Transienten.



**Abbildung 4: PWM Nutzsignal und HV-Impulse und Transienten**

### 3.2 New Work Item Proposal (NWIP) ISO7637-4

Im DKE 767.13.18 wurde ein Vorschlag erarbeitet, der Messaufbauten und Grenzwerte für relevante Hochvolt-Pulse zusammenfasst.



**Abbildung 5: Relevante HV-Pulse**

Daraus ist ein New Work Item Proposal (NWIP) für einen vierten Teil der bestehenden ISO 7637-Reihe entstanden [8].

Abbildung 5 fasst die relevanten HV-Pulse zusammen. Rechteckspannungen und Sinuspulse bilden im Wesentlichen die Phänomene aus Abbildung 4 nach.

Tabelle 2 fasst die Grenzwertklassen für Rechteckspannungen zusammen. In Tabelle 3 sind vergleichbare Angaben für die Sinuspulse gemacht.

Schnelle und langsame Transienten sind an die bestehenden IEC 61000-4-x angelehnt und hier nicht weiter dargestellt.

Pulsfrequenz $f_{PWM}$	Frequenzschritt	Testspannung $U_{pp}$ [V]					Verweildauer (s)	Einkopplung
		Klasse						
		I	II	III	IV	V		
1 kHz - 10 kHz	1 kHz	5	25	50	150	250	2	HV+ und HV- HV+ to ground HV- to ground  optional: HV+ und HV-to ground
10 kHz - 300 kHz	10 kHz	0,5	2,5	5	15	25		

**Tabelle 2: Rechteckspannungen auf den HV-Versorgungsleitungen**

Pulsfrequenz (MHz)	Testspannung $U_{pp}$ [V]					Oszillationen/ Pulspaket	Wiederholrate ( $\mu$ s)	Testdauer (Minuten)	Test coupling
	Klasse								
	I	II	III	IV	V				
1	10	20	40	100	300	10	200 / 100 / 50	5 / 5 / 5	HV+ to HV- HV+ to ground HV- to ground
2									
5									
10									

**Tabelle 3: Transienten auf den HV-Versorgungsleitungen**

## 4 Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Versorgungsnetz

### 4.1 Grundlagen

Mit der Schnittstelle des Fahrzeugs zum öffentlichen Netz treten neue Herausforderungen bzgl. Netzurück- und Wechselwirkungen in den Vordergrund. Die „klassische“ Störfestigkeit und Störaussendung des Fahrzeugs werden durch IEC-Anforderungen ergänzt: Burst, schnelle Transienten (IEC61000-4-4), Surge, Blitzentladungen (IEC61000-4-5), Voltage Dips und Unterbrechungen (IEC61000-4-11, -34), Harmonische (IEC61000-3-2, -12), Flicker (IEC61000-3-3, -11).

## 4.2 IEC-Normungsaktivitäten

In IEC/ISO-Kollaboration wird die IEC-Normenreihe IEC61851 überarbeitet. EMV-Inhalte bzgl. Elektrofahrzeugen und ‚Onboard‘-Ladegeräten werden in IEC61851-21-1 gebündelt. Der bisherige Normentwurf zeigt hohen Deckungsgrad mit der ECE-R10-4 bzw. zukünftigen -5.

Die EMV der externen Ladegeräte (z. B. AC-Wallboxen, DC-Ladesäulen) sollen u. a. in der IEC 61851-21-2 geregelt werden. Tabelle 4 gibt einen Überblick.

**Tabelle 4: Überblick IEC61851 Normenreihe**

IEC-Norm	Beschreibung, bisherige Inhalte	Aktuelle Aktivitäten, neu
IEC 61851	Electric Vehicle Conductive Charging System	
-1	General requirements; in Überarbeitung; Ziel, EMV betreffende Teile in 21, 22, 23 zu verlagern	in Überarbeitung
-21	Electric vehicle conductive charging system – Part 21: Electric vehicle requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply	<b>IEC TC69 WG4 unter „Mode 5“-Kollaboration mit ISO TC22/SC3:</b>  <b>-21-1: EMV-Anforderungen für Elektrofahrzeuge mit eingebautem Lademodul</b>  <b>-21-2: Zusammenführen der Teile 22 und 23 in EMV-Anforderungen an externe leitungsgebundene AC- oder DC-Ladestationen</b>
-22	Electric vehicle conductive charging system – Part 22: a.c. electric vehicle charging station	
-23	Electric vehicle conductive charging system – Part 23: d.c. electric vehicle charging station	

## 5 Zulassung nach ECE R10

### 5.1 Grundlagen

Die Niederspannungsrichtlinie regelt Störfestigkeit und Störaussendung netzseitig. Gesetzliche Anforderungen an das Elektrofahrzeug sind im Rahmen der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen (ECE) in der R10 (Funkentstörung) geregelt. Mit der Revision 4 ist der Ladebetrieb explizit aufgenommen worden. In der internationalen Normung befinden sich ISO, CISPR und IEC entsprechend ebenfalls in Überarbeitung.

### 5.2 Umsetzung in ECE R10

Die Anforderungen der ECE R10 sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Neben den „klassischen“ Fahrzeugdisziplinen finden in der Revision 4 ebenfalls die zusätzlichen

Messungen für Fahrzeuge im Ladebetrieb ihre Anwendung. Mit der zukünftigen Revision 5 wird es die Möglichkeit für separate Tests auf Komponentenebene geben (ESA – electronic subassembly).

**Tabelle 5: Übersicht der ECE R10-5 Anforderungen**

Anwendung	EMV Disziplin	Messmethode/ Grundnorm	Fahrzeug/ ESA
Verbrennungsfahrzeuge und Hybridfahrzeuge	Störaussendung, breitbandig, 3m/ 10m	CISPR12	Fahrzeug
	Störaussendung, schmalbandig	CISPR12	Fahrzeug
	Störfestigkeit	ISO11451-2	Fahrzeug
	Störaussendung, breitbandig	CISPR25	ESA
	Störaussendung, schmalbandig	CISPR25	ESA
	Störfestigkeit	ISO11452-2 ISO11452-3 ISO11452-4 ISO11452-5	ESA
	Transienten	ISO7637-2	ESA
Zusätzlich für Fahrzeuge mit Ladeschnittstelle	Harmonische (AC-Leitung)	IEC61000-3-2 IEC61000-3-12	Fahrzeug/ ESA
	Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen, Flicker	IEC61000-3-3 IEC61000-3-11	Fahrzeug/ ESA
	Leitungsgebundene Störaussendung (AC- und DC-Leitung)	CISPR16-2-1	Fahrzeug/ ESA
	Leitungsgebundene Störaussendung (Network- und Telekommunikation)	CISPR22	Fahrzeug/ ESA
	Schnelle Transienten/ Burst	IEC61000-4-4	Fahrzeug/ ESA
	Stoßspannungen / Surge	IEC61000-4-5	Fahrzeug/ ESA

## 6 Zusammenfassung

Die Erfahrungen und Erkenntnisse zur EMV in Hochvoltssystemen von Elektro- und Hybridfahrzeugen sind in den vergangenen vier Jahren zunächst von den deutschen OEMs, Zulieferern und Testhäusern gemeinsam erarbeitet worden.

Die entstandenen Normentwürfe für CISPR, ISO und IEC sind im Rahmen der DKE-Arbeitskreise AK 767.13.18 und AK 353.0.6 diskutiert, ergänzt und auf internationaler Ebene vorgestellt und publiziert worden.

Eine weitere Bearbeitung auf internationaler Ebene ist bereits im Gange.

Für die EMV-Entwicklung von Hochvoltssystemen in Elektrofahrzeugen wurden solide Grundlagen geschaffen, auf die durch zukünftige Erfahrungen weiter ausgebaut werden müssen.



## 7 Literatur

- [1] C. Hillmer, M. Mayer, U. Reinhardt: EMV von E- und Hybridfahrzeugen, 5. GMM Fachtagung EMV in der Fahrzeugtechnik, München, 2009
- [2] J. Heyen, L. Diaz, K. Marschall, A. Darrat, F. Golisch: EMV-Anforderungen an die Ladeschnittstelle von Elektrofahrzeugen, 6. GMM Fachtagung EMV in der Fahrzeugtechnik, Stuttgart, September 2013
- [3] J. Bärenfänger: Schnittstelle zwischen Fahrzeug und energienetz – Ladebetrieb von Elektrofahrzeugen, 5. Wissenschaftsforum Mobilität, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Juni 2013
- [4] T. Krauß, K. Löchner: Gesetzliche Anforderungen an Elektrofahrzeugen, 6. GMM Fachtagung EMV in der Fahrzeugtechnik, Stuttgart, September 2013
- [5] C. Hillmer, J. Heyen, K. Löchner: EMV-Anforderungen an Hochvoltsysteme in Elektro- und Hybridfahrzeugen, EMV Stuttgart, Stuttgart 2013
- [6] <http://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html> für weitere Informationen
- [7] <http://www.dke.de> für weitere Informationen
- [8] ISO/NP 7637-4: Road Vehicles -- Electrical disturbance by conduction and coupling - Part 4: Electrical transient conduction along shielded high voltage-supply lines only, ISO/TC 22/SC 3 under development