Elektromagnetische Verträglichkeit frühzeitig integrieren

© Mooser

AUTOREN

Jakob Mooser
ist geschäftsführender Gesellschafter der Jakob Mooser GmbH in Egling und der Mooser EMC Technik GmbH in Ludwigsburg.

Die Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erfordert einen umfassenden Ansatz, da die Kopplungspfade der Störaussendungen weit über die elektronischen und elektrischen Komponenten hinausreichen. Wichtig ist eine frühzeitige Berücksichtigung EMV-relevanter Aspekte im Entwicklungsprozess. Die Jakob Mooser GmbH und die Mooser EMC Technik GmbH haben dafür Grundlagenarbeit geleistet.

In der europäischen Richtlinie ist die EMV definiert als „die Fähigkeit eines Apparates, einer Anlage oder eines Systems, in der elektromagnetischen Umwelt zufriedenstellend zu arbeiten, ohne dabei selbst elektromagnetische Störungen zu verursachen, die für alle in dieser Umwelt vorhandenen Apparate, Anlagen oder Systeme unannehmbar wären“ [1]. Die ungewollte wechselseitige Beeinflussung ist dabei nicht nur eine Frage der Technik, sondern auch des Rechts. Denn elektromagnetische Störungen können zum Beispiel den Ausfall von Bauteilen in Herzschrittmachern, Flugzeugen oder Kraftfahrzeugen, bewirken.

EIGENSCHAFTEN DER STÖRPEGEL

Prinzipiell sind die EMV-Anforderungen für elektrifizierte Fahrzeuge die gleichen wie bei Verbrennungsmotoren. Allerdings bewirken die viel höheren Spannungen – aktuell bis zu 800 V – wesentlich höhere Störpegel. Um die Umwandlung von Batterie-Gleichspannung in eine Dreiphasen-Wechselspannung für den Traktionsmotor möglichst verlustarm zu gestalten, sind sehr schnelle Schaltflanken vorteilhaft. Moderne IGBTs arbeiten mit Anstiegs- und Abfallzeiten von weniger als 0,1 µs, Mosfets mit wenigen Picosekunden. Damit

werden die Oberwellen der Schaltflanken immer höher und stören jetzt bis einige hundert MHz.

Hauptstörquelle ist der Inverter, der die Gleichspannung der Batterie gleichsam „zerhackt“ und daraus dreiphasigen Wechselstrom erzeugt, **BILD 1**. Ein Teil der Störungen koppelt über die Inverterverkabelung aus. Ein größerer Teil koppelt über den Läufer des E-Motors und die Welle des Motors aus. Ein weiterer Kopplungsweg ist über die Motorwelle in das Getriebe und von dort auf die Antriebswellen [2].

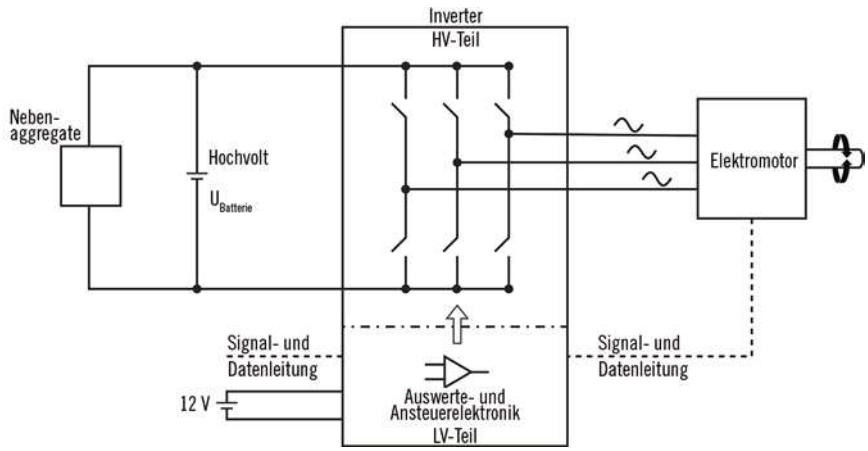

BILD 1 Prinzip des Elektroantriebs. Die Gleichspannung der Batterie wird durch „zerhacken“ eine 3-Phasen-Wechselspannung mit variabler Frequenz (und damit variabler Drehzahl des Motors) umgewandelt (© Mooser)

ÜBERTRAGUNGSWEGE

Die sehr hohen Störungen (mit Störspannungen von 140 dBµV und mehr) des Inverters können, trotz heutiger Schirmkonzepte, auf andere Leitungen und Schaltkreise überkoppeln, die mit der Traktionsspannung mit elektrischer Energie versorgt werden. Ein geläufiger Übertragungsweg ist vom Hochvolt(HV)-Teilbordnetz in das 12-V-Low-Voltage(LV)-Teilbordnetz. Durch den DC/DC-Wandler und die HV-LV-Kopplung im Gehäuse werden die Störungen in die 12-V-Kabel oder die Signal- und Datenleitungen eingebracht und auf diesem Weg in das gesamte Bordnetz eingekoppelt.

Das gleiche Verbreitungsprinzip gilt beispielsweise für eine elektrische Hochvoltheizung, falls dort kein Hochfrequenzschalter vorhanden ist. Die Heizung kann dadurch zu einer hochfrequenten Störquelle mit fremdem Störpegel werden, selbst wenn EMV-Prüfungen im Entwicklungsstadium der Heizung keine Störphänomene feststellten.

Ein weiterer charakteristischer Störungspfad ist vom Inverter durch die Motorwelle und das Getriebe. Dabei koppeln die hochfrequenten Störungen vom Inverter in die Erregerspulen des E-Motors, dort in dessen Rotor und über die Achse des Läufers bis ins Getriebe und dort über kapazitive Kopplungsprozesse von Zahnrad zu Zahnrad weiter bis in die Achsen, **BILD 2**.

Dieser Effekt ist am stärksten, wenn sich der E-Motor dreht, da im bewegten Zustand sich zwischen den Kugellagern und den Lagerschalen ein Ölfilm aufbaut. Er wirkt wie eine hochohmige Widerstandsschicht, dadurch werden die Störungen nicht mehr zwischen dem Rotor und dem Motorgehäuse kurzgeschlossen und koppeln von der Motorwelle vollständig in das Getriebe ein. Bei üblichen EMV-Tests im ruhenden Zustand des E-Motors werden dagegen die von den Spulen ausgehenden Störungen über die Antriebswellen und die Kugellager kurzgeschlossen und weitgehend eliminiert. Diesen Effekt hat Mooser als erstes Unternehmen messtechnisch nachgewiesen. Bei den EMV-Messungen ist es daher wichtig, dass sich der E-Motor dreht. Das Unternehmen hat dafür ein Ersatzmessverfahren entwickelt, das diesen Effekt im Motor und Getriebe bereits in der Entwicklungsphase noch ohne Inverter untersuchen kann.

Die hochfrequenten Störungen auf der Welle sorgen aber nicht nur für Funkstörungen. Sie können sich auch in Form von hochfrequenten Entladungen äußern, die vorzeitige Lagerschäden provozieren können. Je steiler die Schaltflanken der IGBTs oder FETs, desto aggressiver sind die Entladungsphänomene und somit desto ausgeprägter die Schäden in den Lagern, **BILD 3**.

FELDÜBERTRAGUNG

Neben den Störfrequenzen über eine

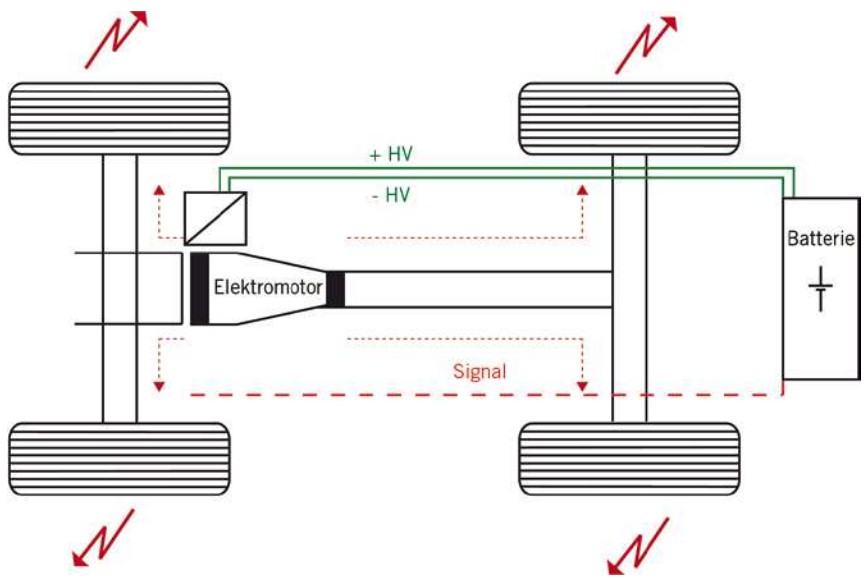

BILD 2 Hochfrequente Störungen des Inverters können über den Elektromotor und das Getriebe bis in die Achsen auskoppeln (© Mooser)

physische Verbindung in benachbarte Komponenten muss bei EMV-Prüfungen auch immer die weitere Umgebung betrachtet werden. So kann ein elektrischer Traktionsmotor an der Vorderachse zum Beispiel die Hall-Sensoren der benachbarten elektrisch unterstützten Lenkung beeinflussen. Hier gilt es, durch EMV-Messungen einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu ermitteln, bei dem Beeinflussungen und Fehlfunktionen der Sensoren mit Sicherheit auszuschließen sind. Nach dem gleichen Prinzip wird auch die EMV-Verträglichkeit von Hochvoltantrieben mit Personen im oder neben dem Fahrzeug ermittelt.

Ein neues Phänomen der elektrischen Hochvoltantriebe sind Störungen beim Ladevorgang an Ladesäulen. Beispielsweise muss die Ladeeinheit des Fahrzeugs die Anforderungen der EN-Normen 61000-6-ff bezüglich Störaussendungen und Störfestigkeiten erfüllen, sowie weitere Anforderungen an zum Beispiel die Restwelligkeit, Flicker und Oberwellen.

ENTWICKLUNGSPROZESS

Der oberste Leitsatz bei der elektromagnetischen Verträglichkeit lautet: EMV kann man nicht ins System prüfen, sondern muss sie von Anfang an ins System entwickeln und konstruieren. Die EMV-Entwicklung der Komponenten im Fahrzeug ist zeitraubend und unwirtschaftlich, da EMV-Messungen im fertigen Fahrzeug erst kurz vor SOP möglich sind. Bei Problemen ist fast keine Zeit mehr für Nachentwicklungen. Außerdem muss der Prüfling jeweils zeitraubend aus dem Fahrzeug aus- und später wieder eingebaut werden. Dies führt zu hohem Zeitaufwand und einer Blockade wertvoller Prüfstandkapazitäten, **TABELLE 1**.

Erster Schritt ist eine messtechnische Untersuchung des Prüflings im jeweils aktuellen Entwicklungsstadium. Neben der Ermittlung unzähliger Kennwerte erfolgt dabei auch die Lokalisierung möglicher Störquellen. Anschließend werden im Bereich der Störquelle die Schaltungstechnik, die Bauteile und das Layout analysiert und identifizierte Schwachstellen mit dem Lötkolben verbessert. Anschließend wird der Prüfling erneut vermessen. Je nach Ergebnis wird der Störpunkt erneut bearbeitet oder die nächste Störquelle optimiert. Diese Vorgehensweise wird vor allem bei 12/24-V-Ansteuerungselektroniken gewählt.

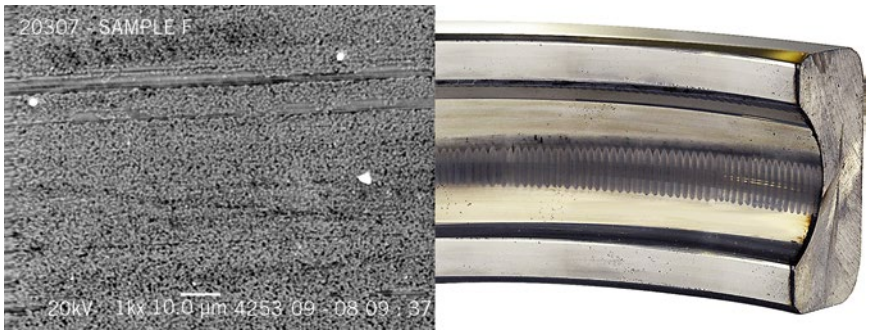

BILD 3 Hochfrequente Störungen des Inverters können ohne Schutzmaßnahmen zu Lagerschäden führen; links beginnende Schäden, rechts massive Folgeschäden (© AEGIS | Electro Static Technology)

Beim Entstören eines Hochvolt-Bauteils ist es im Prinzip das gleiche Vorgehen: Messen, Analysieren, Optimieren, Messen. Wobei unter Optimieren meist nicht das Löten auf einem Layout gemeint ist, sondern meist Arbeiten an der Leitungsführung, die elektrische und mechanische Optimierung der Filterkomponenten sowie Arbeiten am Gehäuse oder der Massekontaktierung.

Der große Vorteil bei dieser Arbeitsweise besteht darin, dass sehr schnell ein valides Ergebnis messtechnisch vorliegt. Mit diesen Ergebnissen können die Entwicklerinnen und Entwickler die Verbesserung 1:1 nachbilden, etwa am Layout, am Gehäuse, bei der Leitungsführung oder Bauteildimensionierung. Auch wenn sich in seltenen Fällen bei einer Verbesserung neue Fehler einschleichen können, ist bei diesem Verfahren die Anzahl der Iterationsschleifen sehr gering.

EMV IST FRONTLOADING

Gemeinsam mit Kunden und Partnern wurden umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zur EMV an Hochvoltantrieben durchgeführt. Diese Erkenntnisse wurden in die Normen CISPR 25-4 und ISO 7637-4 überführt, die wesentliche Leitlinien für EMV-Messungen an Hochvoltantrieben definieren. Für die frühzeitige Messung der Komponenten wurden ebenfalls in Zusammenarbeit mit vielen OEMs und Komponentenlieferanten spezielle Prüfstände entwickelt. Sie ermöglichen EMV-Messungen beim simulierten Fahren, Bremsen/Rekuperieren, mit variabler Drehzahl und variablem Drehmoment und bei Wellenstörungen.

Optimalerweise ist die EMV schon im Lastenheft umfassend verankert. Aktuell sind Konzepte mit geschirmtem Hochvoltkabel gebräuchlich. Bei diesen Schirmsystemen kann aber durch die Verkopplung zwischen Hochvolt- und 12-V-Bereich potenziell jede Hochvoltkomponente unerwünschte Abstrahlungen über das 12/24-V-Bordnetz oder über die Mechanik von E-Motor und Getriebe aussenden. Hier sind besondere Schutzkonzepte gefragt, die eine Störaussendung über diese Pfade minimieren.

Um die Störaussendungen systematisch zu verhindern, werden bereits Filter an den Inverterausgängen zu weiteren Hochvolt- oder 12/24-V-Komponenten erprobt, **BILD 4**. Diese Filter verbessern die Standfestigkeit und Reparaturfreundlichkeit der elektrischen Komponenten. Außerdem begrenzen sie den Aufwand und die Kosten für Abschirmmaßnahmen auf den mechanischen Teil des Antriebsstrangs. Beispielsweise kann dadurch die Schirmung eines Batteriedeckels entfallen, was etwa 40 bis 50 Euro Kosten spart. Die problematischen Aus-

	Messverfahren	Zeitaufwand	Ingenieur und Labor
Fahrzeugtest	2-3	5-10	3-5
Komponententest	1	1	1-2
	Geringe Kosten bei Komponententests		

TABELLE 1 Werden die Kosten für den Komponententest mit dem Faktor 1 angenommen, ergeben sich für den Fahrzeugtest Kosten mit den Vergleichsfaktoren 2 bis 10 (© Mooser)

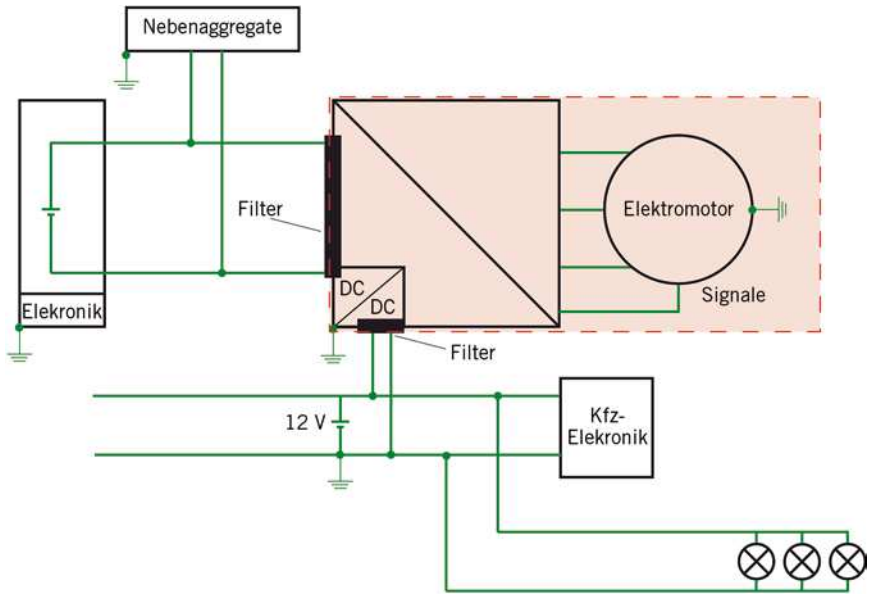

BILD 4 Das EMV-Konzept mit Inverter-Filtern und Teilschirmung des Elektromotors kann, je nach Projektlayout, günstiger sein als komplett geschirmte Hochvolt-Bordnetze (© Mooser)

kopplungen über die Motorwelle lassen sich durch eine frühzeitige Festlegung von Schirmmaßnahmen verringern. Dazu muss aber schon vor der Konstruktion der Bauteile beispielsweise die Position von Ableitbürsten festgelegt sein, damit die Schirmmaßnahmen konstruktiv – etwa in den Gießformen – berücksichtigt werden können.

Um die Störfestigkeit gegen Restwechselspannungen zu optimieren, genügt es nicht, die in der ISO 7637-4 geforderten Sinusimpulse anzuwenden. Viele OEMs fordern weiterhin die deutlich anspruchsvolleren Tests mit den früher in der ISO 7637-4 geforderten Rechtecksignalen. Restwechselspannungen sind insbesondere bei Komponenten mit Schnittstellen zum öffentlichen Netzen zu prüfen, etwa bei Ladegeräten.

Über die reinen Tests und die Qualifizierung der Komponenten für die EMV-Vorgaben hinaus bietet Mooser seinen Kunden auch die Weiterentwicklung von Komponenten und Systemen an. Etwa durch ein verbessertes Schaltungslayout, eine geänderte Leitungsführung oder ein optimiertes Massekonzept kann die EMV im System erheblich verbessert werden. Auch die Ermittlung von Störsicherheits-Abständen zwischen zwei EMV-kritischen Objekten kann dazu beitragen. Die Absicherung dieser Dienstleistungen erledigt das Unternehmen dabei zeit- und kostensparend an seinen Prüfständen für Hochvoltantriebe.

AUSBLICK

Die EMV stellt bei elektrischen Hochvoltantrieben parallel zu den immer vielfältigeren Konzeptlayouts und den immer höheren Spannungslagen immer größere Anforderungen. Ein neues Aufgabengebiet wird beispielsweise die EMV von elektrischen Antrieben mit Brennstoffzellentechnik.

Zusätzlich ist ein wachsender Bedarf an EMV-Testverfahren für das autonome Fahren und seine Subsysteme zu erwarten. Bei diesem sicherheitsrelevanten Thema ist noch viel Abstimmungsbedarf mit den OEMs und Tier-1-Lieferanten erforderlich. Dafür wird die Teststrategie wohl in Richtung Funktionsverbunde erweitert. Tests von Einzelkomponenten werden in vielen Fällen nicht mehr ausreichen.

LITERATURHINWEISE

[1] Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit. Online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32014L0030, aufgerufen am 19.7.2021

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelectronics-worldwide.com

SPRINGERNATURE