

Elektromagnetische Feldstärkesimulation mit MEFiSTo-2D Classic

Simulation der Felder eines zweikanaligen Kompensationsstromsensors, Teil 2

Damit die empfindlichen elektronischen Komponenten fehlerfrei arbeiten können, müssen bei der Konstruktion von Elektroautos von Anfang an Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund wurde mit Hilfe eines zweidimensionalen Feldsimulations-Programmes untersucht, wo sich der beste Einbauort für einen Stromsensor in einem Elektrofahrzeug befindet.

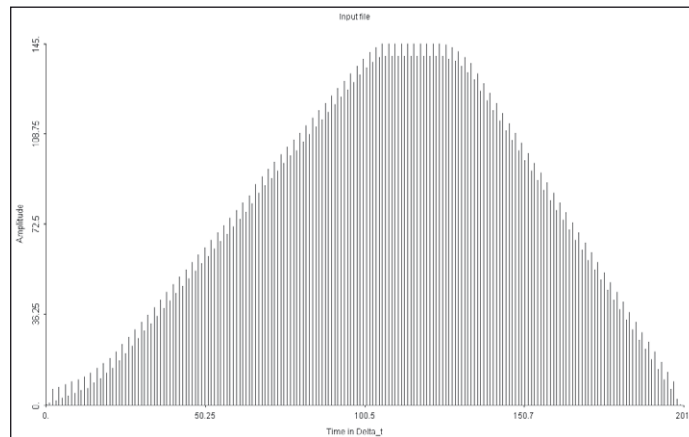


Bild 2: Pulsweitenmoduliertes Signal mit überlagertem CAN-Bus Signal

Durchführung der Simulation

Wie bereits in Teil 1 erwähnt, wurden zwei grundlegende Modelle des E-Corsa-Fahrzeugs erstellt. In einem Modell wurde die Kabellänge zwischen der Hochvoltbatterie und dem Frequenzumrichter zu 1824 mm gewählt. Dabei bildeten sich im Simulationsverlauf auf der Hochvoltleitung deutliche Stehwellen aus. In einem zweiten Modell wurde die Kabellänge auf 1800 mm festgelegt. Hier

konnten keine ausgeprägten Stehwellen mehr beobachtet werden. Ausgehend von diesen zwei Grundmodellen wurden drei Versionen mit verschiedenen Gehäuseformen des Stromsensors erstellt: ein Stromsensor jeweils mit einem kurzen und einem langen Gehäuse sowie ein zweikanaliger Stromsensor in einem doppelten Gehäuse. Die verschiedenen Gehäuseformen des Stromsensors wurden an drei Stellen auf dem Kabel zwischen Hochvoltbatterie und Frequenzumrichter angeordnet. Das

Gehäuse des Stromsensors ist durch Interface-Wände nachgebildet worden. Von innerhalb des Gehäuses ausgestrahlte elektrische Wellen werden nach außen hin leicht verstärkt. Von außerhalb auf das Gehäuse treffende elektrische Wellen werden dagegen zum Inneren des Sensorgehäuses leicht abgeschwächt.

So war es am besten möglich, unter Ausnutzung der Möglichkeiten des Simulationsprogramms, allgemeine elektromagnetische Eigenschaften des Sensorgehäuses nachzubilden. Als Wellenform der Quellregionen wurde ein pulswellenmoduliertes Signal verwendet, das zusätzlich von CAN-Bus-Signalen überlagert ist. Damit ist der Frequenzumrichter mit den von ihm erzeugten pulswellenmodulierten Signalen als Hauptstörquelle berücksichtigt worden. Das Quellensignal für die Simulation stammt ebenfalls aus der Projektarbeit, aus welcher auch der Aufbau der Hochvoltkabel übernommen wurde und ist in Bild 2 zu sehen [8]. Der Frequenzbereich, in dem die Simulation stattfand, wurde von 0 Hz bis 3 GHz festgelegt und

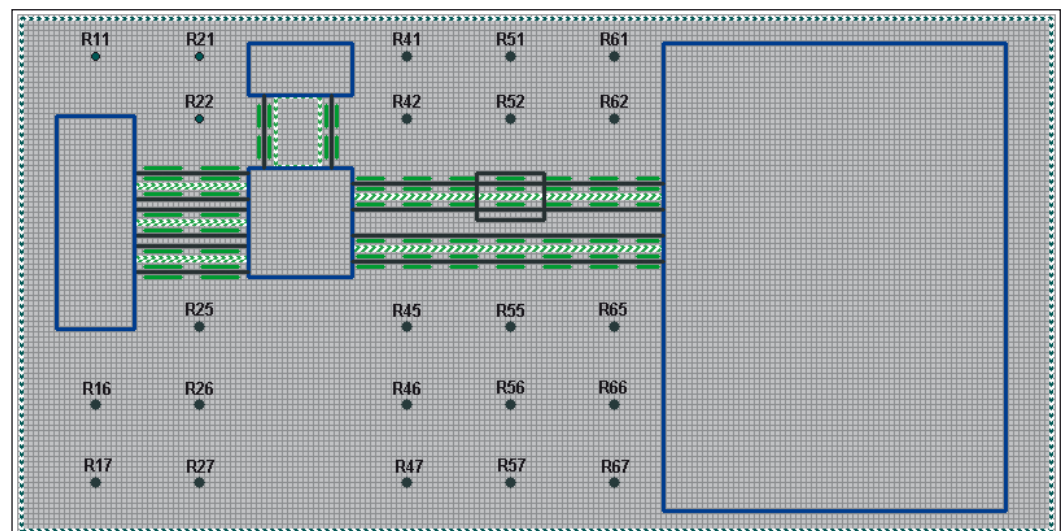


Bild 3: Vollständige Anordnung der Messproben im Simulationsmodell

Christian Hübner,
Frank Gräbner,
Ass.Prof.(BG) Dr.-Ing.
IMG Electronic & Power
Systems GmbH
www.img-nordhausen.de

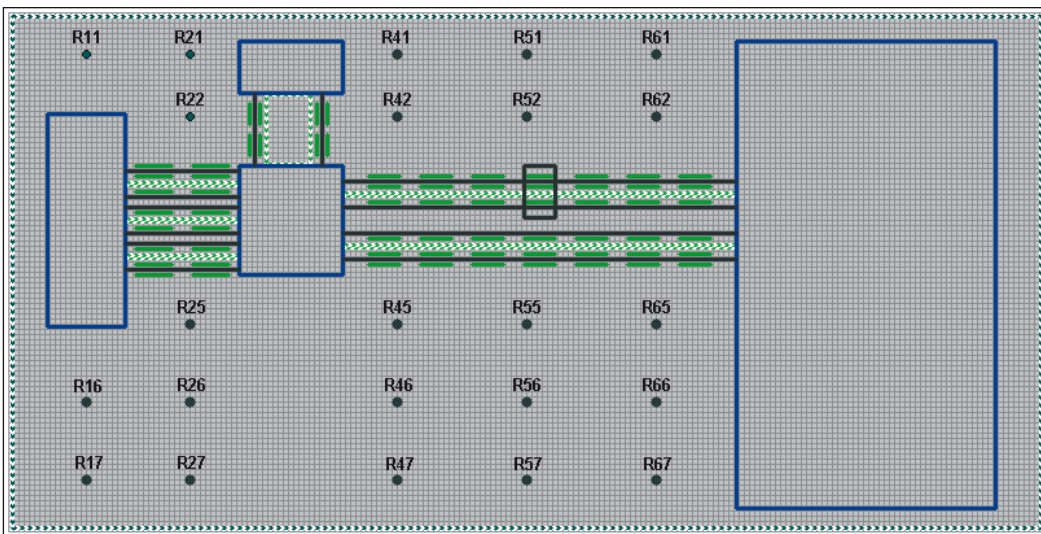


Bild 4: Simulationsmodell mit Messproben, Modell „lange Leitung, kurzer Sensor mittig“

die Feldkomponente, die senkrecht auf den zweidimensionalen Strukturen steht. Aus diesen Gründen können insgesamt keine quantitativen, sondern nur qualitative Aussagen über die Feldverteilung im Modell gemacht werden. Die Erfassung der Verteilung des elektrischen Feldes im Modell erfolgte durch 23 Messproben. Die Anordnung der Messproben unterscheidet sich nur zwischen den beiden grundlegenden Modellen mit langer Leitung und kurzer Leitung. In einem Simulationsdurchlauf konnten jeweils programmbedingt nur drei Messproben eingesetzt werden. Deswegen setzt sich ein vollständig simuliertes

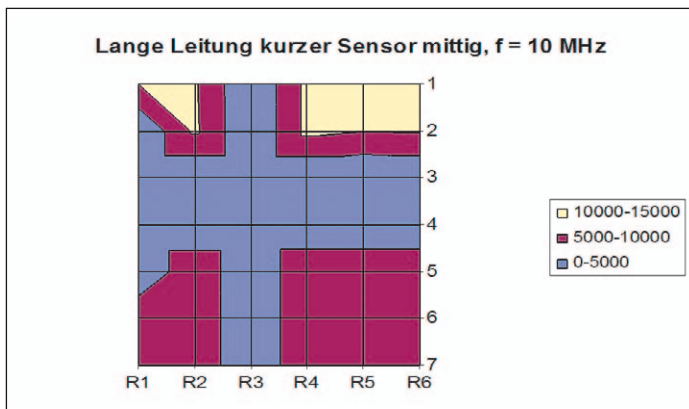


Bild 5: Feldstärke-Flächenscan zu Bild 4

in 300 Schritte unterteilt. Das bedeutet, dass in einer Schrittweite von 10 MHz Simulationsergebnisse vorliegen und dass

sich das Frequenzspektrum aus 300 Werten zusammensetzt. Die mittels Fouriertransformation erzeugten Messergebnisse sind

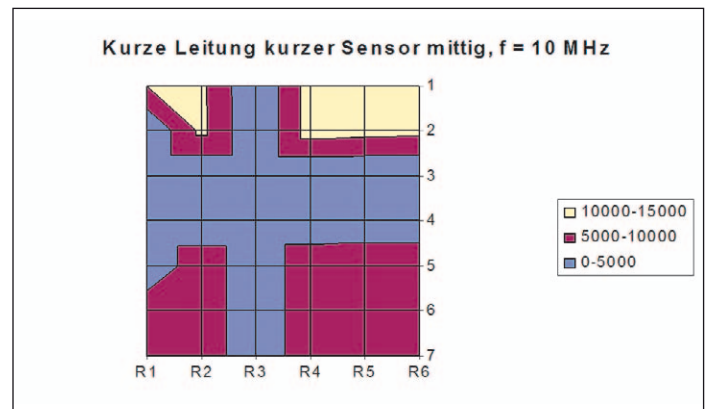


Bild 7: Feldstärke-Flächenscan zu Bild 6

einheitenlos, da es sich um normierte Werte handelt. Außerdem wurde nur das elektrische Feld in Y-Richtung simuliert, also

Modell aus acht Teilsimulationen zusammen. In Bild 3 ist die vollständige Struktur der Messproben beispielhaft für das Modell mit kurzer Leitung und mittig angeordnetem Stromsensor mit langem Gehäuse dargestellt.

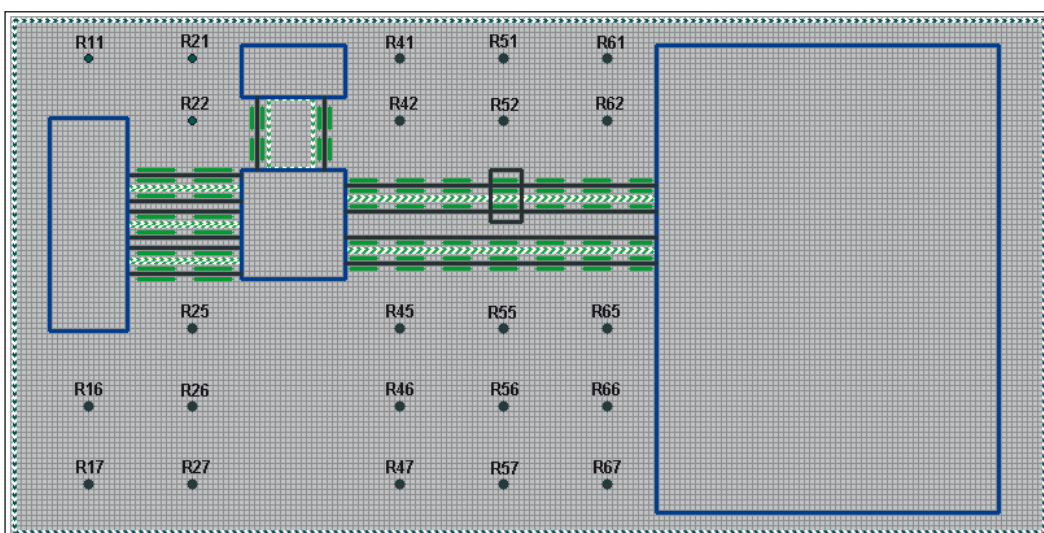


Bild 6: Simulationsmodell mit Messproben, Modell „kurze Leitung, kurzer Sensor, mittig“

Die Messproben sind mit R11 bis R67 durchnummeriert. Die Positionierung der Messproben wurde so gewählt, dass sie den für einen störsticheren Einbaulort des Stromsensors relevanten Feldstärkeverlauf gut erfassen. Da die Fouriertransformation der Impulsantworten der jeweiligen Messproben das Ergebnis für jeden Frequenzpunkt in Realteil und Imaginärteil aufgeteilt liefert, wurde für jede Messprobe für jeden Frequenzpunkt der Betrag aus Realteil und Imaginärteil ermittelt und zur Darstel-

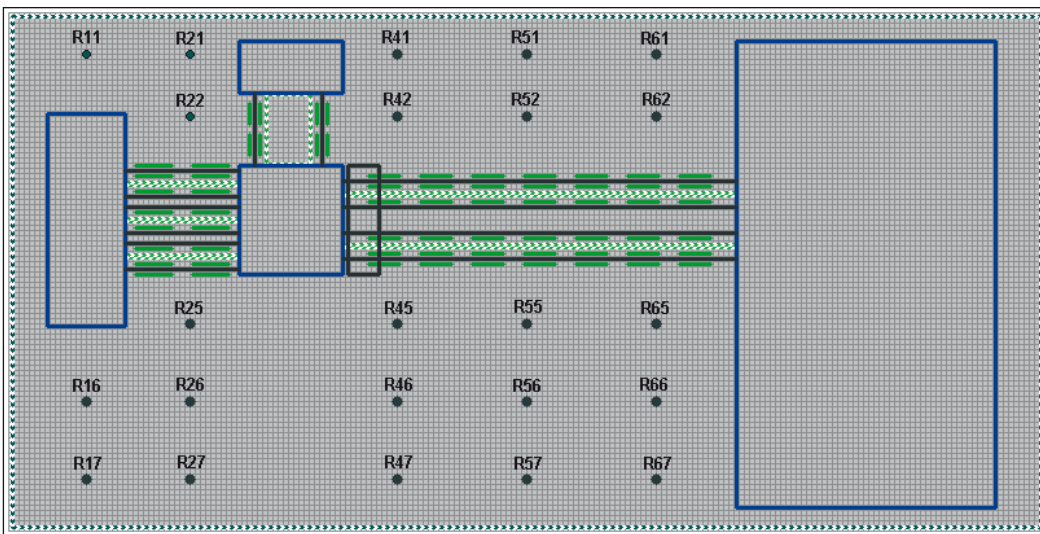


Bild 8: Simulationsmodell mit Messproben, Modell „lange Leitung“ doppelter Sensor“ links

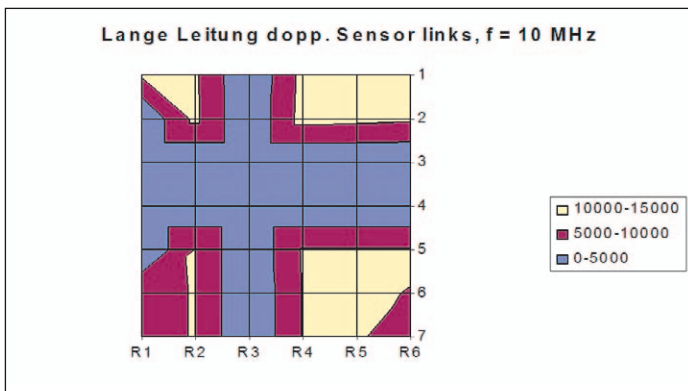


Bild 9: Feldstärke-Flächenscan des vorhergehenden Modells

lung der Simulationsergebnisse verwendet.

Darstellung der Simulationsergebnisse

Insgesamt wurden 18 verschiedene Modelle erzeugt und simuliert. Diese können jedoch aus Platzgründen nicht alle dargestellt und ausführlich ausgewertet werden. Deshalb beschränke ich mich an dieser Stelle auf eine Darstellung von vier Ergebnissen. Außerdem erfolgt eine Begrenzung der Darstellung der Simulationsergebnisse auf einen Frequenzbereich von 10 MHz, da diese Frequenz aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit relevant ist. Zuerst werden die Modelle mit einem kurzen Sensorgehäuse auf der langen und kurzen Leitung mit dem jeweils mittig angebrachten Sensorgehäuse miteinander

verglichen. In Bild 4 sind die Anordnung der Messproben und der Stromsensor in der Mitte der Leitung zu sehen.

Die Schnittpunkte im Raster des Koordinatensystems des Feldstärke-Flächenscans aus Bild 5 geben die Lage der Messproben aus dem zugehörigen Modell in Bild 4 wieder. Dabei wird beispielsweise die Lage der Messprobe R11 aus Bild 4 durch den Schnittpunkt der R1-Spalte und der 1. Reihe wiedergegeben. Die Position der Messprobe R45 aus Bild 4 entspricht in Bild 5 dem Schnittpunkt der R4-Spalte mit der 5. Reihe. Der Feldstärke-Flächenscan gibt die Verteilung des elektrischen Feldes in der Simulationsebene an. Den normierten und dimensionslosen Beträgen der elektrischen Feldstärke sind unterschiedliche Farben zugeordnet, wie die Legende auf der

rechten Seite in Bild 5 verdeutlicht. Die von den jeweiligen Messproben detektierten Beträge der Feldstärke wurden nicht einzeln angegeben, da die Streuung der Beträge sehr gering ist und sie sich somit nur übersichtlich, wie in Bild 5 gezeigt, in einem Flächenraster darstellen lassen. Die blau markierte Fläche gibt den Bereich mit der geringsten Feldstärke an. Das liegt daran, dass sich in diesem Bereich keine Messproben befinden und somit auch keine Feldstärke detektiert werden konnte. Die gelbe Fläche markiert den Bereich, in dem die größte elektrische Feldstärke auftrat. Rot dargestellt sind die Bereiche mit einer mittleren elektrischen Feldstärke sowie Übergangsbereiche zwischen den größten und kleinsten Werten. In Bild 6 und 7 ist das äquivalente Simulationsmodell nur mit einer kürzeren Hochvoltleitung und damit geringer ausgeprägten Stehwellen abgebildet. Ein Vergleich der beiden Feldstärke-Flächenscans aus Bild 5 und Bild 7 zeigt nur sehr geringe Unterschiede.

Als nächstes wird das Simulationsmodell für eine lange Leitung mit einem doppelten Sensorgehäuse, welches am linken Ende der Leitung angebracht wurde, dargestellt.

Der Feldstärke-Flächenscan aus Bild 9 unterscheidet sich ebenfalls nicht wesentlich von

den Feldstärke-Flächenscans in Bild 5 und 7. Es fällt lediglich auf, dass die Messproben R25, R26 und R27 in Bild 9, eine größere elektrische Feldstärke detektiert haben. Im Vergleich mit den ersten beiden Modellen mit den mittig angebrachten kurzen Sensorgehäusen aus Bild 4 bis 7, ist jedoch eine größere elektrische Feldstärke im unteren rechten Bereich von Bild 9 zu erkennen. Zuletzt soll noch ein Simulationsergebnis für eine kurze Leitung mit einem langen Sensorgehäuse, welches rechts auf dem Hochvoltkabel angeordnet ist, dargestellt werden.

Auch der Feldstärke-Flächenscan in Bild 11 unterscheidet sich nicht wesentlich von den bereits gezeigten Feldstärke-Flächenscans. Im Vergleich mit den beiden ersten Feldstärke-Flächenscans in Bild 5 und 7 ist auch hier in der rechten unteren Ecke eine größere elektrische Feldstärke zu erkennen. Jedoch nimmt die Feldstärke in Richtung zum unteren Rand hin stärker ab als in dem Feldstärke-Flächenscan aus Bild 9. Da sich die übrigen Simulationsergebnisse nicht wesentlich von denen der hier dargestellten Ergebnisse unterscheiden, werden sie an dieser Stelle nicht aufgelistet.

Auswertung der Simulationsergebnisse

Die ersten beiden Feldstärke-Flächenscans in Bild 5 und 7 weisen keine Unterschiede auf. Die den Simulationsergebnissen zugrunde liegenden Modelle unterscheiden sich nur hinsichtlich der Länge des Hochvoltkabels zwischen Hochvolt-Batterie und Frequenzrichter. In dem Modell aus Bild 4 kam es zudem zu einer ausgeprägten Stehwellen-Ausbildung. Dies ist auf die längere Hochvoltleitung zurückzuführen. Auf die Verteilung des elektrischen Feldes im Modell hatte dies aber keine Auswirkung. Es fällt jedoch auf, dass die größten Beträge der elektrischen Feldstärke oberhalb der Dreiphasenwechselstromkabel sowie des Hochvoltkabels zwischen Batterie und Frequenzrichter detektiert wurden. Dieser

Umstand lässt sich durch das Hochvoltkabel zwischen Frequenzrichter und dem DC/DC-Spannungswandler erklären, welches als zusätzliche Störquelle auf die Messproben einwirkt.

In dem darauffolgenden Beispiel wurde ein Modell mit langer Hochvoltleitung, mit einem doppelten Sensorgehäuse welches sich nah am Frequenzrichter befindet simuliert. Das Simulationsmodell mit dem dazugehörigen Feldstärke-Flächenscan ist in Bild 8 und 9 zu sehen. Wie unter [5] bereits erwähnt, unterscheidet sich die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Vergleich zu den beiden vorangehenden Modellen nicht wesentlich voneinander. Lediglich im unteren linken und rechten Bereich des Feldstärke-Flächenscans des Modells mit dem doppelten Sensorgehäuse, Bild 9, wurde eine größere Feldstärke detektiert. Dies liegt daran, dass das doppelte Gehäuse des Stromsensors auch die untere Leitung des Hochvoltkabel überdeckt und somit in diesem Bereich die Abstrahlung der elektrischen Feldstärke durch das Hochvoltkabel verstärkt wird. Dieser Effekt wird auf die Eigenschaften der Interface-Wände zurückgeführt, welcher schon unter [4] erwähnt wurde. Auf diese Weise sind Reflexionseigenschaften des Sensorgehäuses gegenüber elektrischen Wellen im Simulationsmodell berücksichtigt worden. Vergleicht man die Feldstärke-Flächenscans der ersten beiden Modelle mit dem mittig angeordneten Sensorgehäuse aus Bild 5 und 7 mit den Feldstärke-Flächenscans der nachfolgenden beiden Modelle, die Bild 9 und 11 zeigt, fällt auf, dass im rechten unteren Bereich von Bild 9 und 11 eine größere Feldstärke detektiert wurde als in Bild 5 und 7. Dies lässt sich ebenfalls dadurch erklären, dass durch die größere Sensorfläche der langen und doppelten Gehäuseform aus den von ihnen überdeckten Bereichen des Hochvoltkabels, verstärkt elektrische Wellen abgestrahlt wurden, als

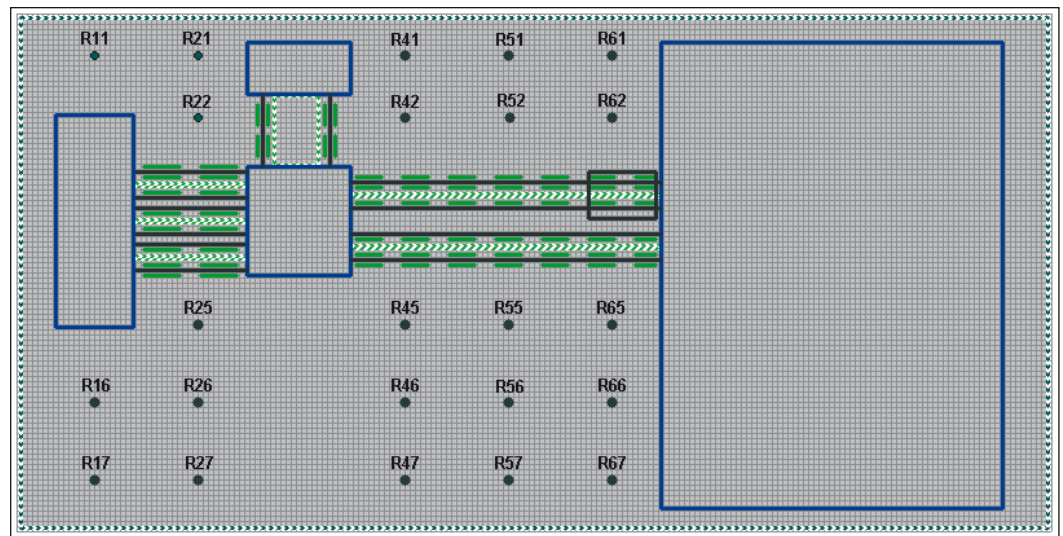


Bild 10: Simulationsmodell mit Messproben, Modell „kurze Leitung, langer Sensor, rechts“

bei den Modellen mit der kurzen Gehäuseform des Sensors.

In der Simulation des letzten dargestellten Modells mit einem langen Sensorgehäuse, das auf einer kurzen Hochvoltleitung rechts nahe der Hochvoltbatterie angebracht war, nimmt im rechten unteren Bereich des Feldstärke-Flächenscans, Bild 11, die elektrische Feldstärke nach außen hin etwas stärker ab, als in dem vorangehenden Modell mit den Feldstärke-Flächenscan aus Bild 9. Dies liegt an der verwendeten kürzeren Hochvoltleitung, auf der sich nur geringfügig Stehwellen ausbreiteten und somit auch eine geringere Feldstärke abgestrahlt wurde. Die Simulationsergebnisse der vier vorgestellten Modelle unterscheiden sich nur unwesentlich, trotz unterschiedlicher Länge der Hochvoltkabel, der Gehäuseform und des Einbauortes des Stromsensors in ihrer Verteilung der elektrischen Feldstärke entlang des Hochvoltkabels, an dem der Stromsensor angebracht wurde, voneinander. Aus diesem Grund kann keine abschließende Aussage über einen bestmöglichen Einbauort für einen Stromsensor getroffen werden. Die These, die unter 2.2 aufgestellt wurde, dass sich ein Stromsensor möglichst weit von einer elektromagnetischen Störquelle befinden soll, um nur geringsten Störungen ausgesetzt zu sein, konnte mit

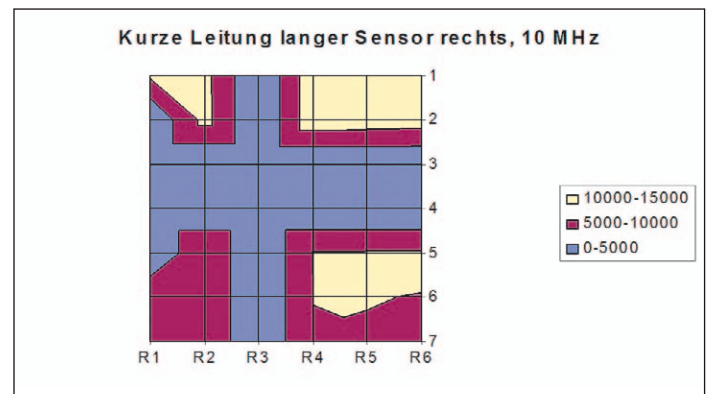


Bild 11: Feldstärke-Flächenscan des oberen Modells

den durchgeführten Simulationen nicht bestätigt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel war es, einen geeigneten Einbauort aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit für einen Stromsensor in ein Elektrofahrzeug zu finden. Um diese Aufgabe lösen zu können, wurden mit dem Simulationsprogramm MEFiSTo-2D Classic, welches zur Darstellung von elektromagnetischen Wellen konzipiert ist, verschiedene Modelle eines Elektrofahrzeugs entworfen und simuliert. Als Vorlage für die Simulationsmodelle diente dabei ein E-Corsa Fahrzeug. Als Hauptstörquellen im Elektrofahrzeug sind die Hochvoltleitungen zwischen Hochvoltbatterie und Frequenzrichter sowie zwischen Fre-

quenzrichter und Elektromotor mit ihren pulsformigen Signalen ausfindig gemacht worden. Die übrigen Komponenten der Leistungselektronik, wie beispielsweise der Frequenzrichter, sind von einem schirmenden Gehäuse umschlossen und kommen damit als potenzielle Störquelle weniger in Betracht. Dieser Umstand wurde bei der Erstellung der Simulationsmodelle berücksichtigt. Die erstellten Modelle unterschieden sich hinsichtlich der Länge des Hochvoltkabels zwischen Frequenzrichter und Hochvoltbatterie sowie zwischen unterschiedlichen Gehäuseformen des Sensors und verschiedenen Einbauorten des Stromsensors. Durch die verschiedenen Gehäuseformen des Stromsensors sollten Rückschlüsse über das Reflexionsverhalten des Gehäuses getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Friedhelm Weidlich: „Elektromagnetische Störquellen im Elektroauto“, in: INGENIEUR.de, 2012, VDI Verlag GmbH, unter:
<http://www.ingenieur.de/Themen/Elektromobilitaet/Elektromagnetische-Stoerquellen-im-Elektroauto>
- [2] Helmut Tschöke (Hrsg.), Ralf Wick: „Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs – Basiswissen“, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [3] „Schönheit und Schrecken – Messtechnik & EMV“, in: E&E Faszination Elektronik, 2016, publish-industry Verlag GmbH, München, unter:
http://www.mobility20.net/E-und-E-Magazin/de_DE/themen/Messtechnik-undEMV/schoenheit-und-schrecken-1606903?searchTerm=Akkumulatoren
- [4] Bastian Arndt: „EMV-Simulation an einem HV-Systembeispiel“, in: „EMV von Hochvolt-Antriebssystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen“, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V., Regensburg, 2015
- [5] Werner Walzik (Hrsg.), Lothar Laske, Wolfgang Kühn: „EMV in der Kfz-Technik – Störquellen, Koppelmechanismen, Meßmethoden, Meßmittel, EMV-Vorschriften“, Franzis-Verlag GmbH, Poing, 1995
- [6] Florian Krug: „Simulationstechnik von EMV-Problemen“, in: Elektrofachkraft, 2012, WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, Kissing, unter:
<http://www.elektrofachkraft.de/expertenbeitraege/simulationstechnik-von-emv-problemen>
- [7] „MEFiSto-2D Electromagnetic Simulator“, von: Faustus Scientific Corporation, 1256 Beach Drive Victoria, BC V8S 2N3 Canada, unter:
http://www.faustcorp.com/products/mefisto2dclassic/brochure_classic.pdf
- [8] Gospodinov, Ivanov, Nedev: „E-car EMC Project“, 2014

Die Simulation von mehreren unterschiedlichen Modellen liefert insgesamt eine Vielzahl von Ergebnissen und erhöht so den Freiheitsgrad bei der Entscheidungsfindung für einen möglichen Einbauort des Stromsensors. Die anfänglich aufgestellte These, dass sich der Stromsensor räumlich entfernt von einer potenziellen Störquelle befinden muss, um nur geringen elektromagnetischen Störungen ausgesetzt zu sein, konnte in der Auswertung der Simulationsergebnisse nicht nachgewiesen werden, da sich die qualitative Verteilung des elektrischen Feldes in der unmittelbaren Umgebung des Stromsensors in den verschiedenen Modellen nicht wesentlich voneinander

unterscheidet. Jedoch fällt auf, dass ein kleines Sensorgehäuse geringere elektromagnetische Abstrahlungen verursacht als ein langes oder doppeltes Gehäuse.

Ein wesentlicher Einfluss als elektromagnetische Störquelle auf den Stromsensor konnte der Dreiphasenwechselstromleitung zwischen Frequenzumrichter und Elektromotor nicht nachgewiesen werden. Dies lag daran, dass der Stromsensor durch das Gehäuse des Frequenzumrichters gut von der Dreiphasenwechselstromleitung abgeschirmt wurde. Auch die Leitung zwischen Frequenzumrichter und DC/DC-Spannungswandler, die als Störquelle fungierte, übte in sämtlichen Modellen einen konstanten elektromagnetischen Ein-

fluss auf den Stromsensor aus, unabhängig von der Stelle an dem der Sensor angeordnet war.

Um aussagekräftigere Simulationsergebnisse zu erhalten, hätte das Fahrzeugmodell detaillierter modelliert werden müssen. So sind die Fahrzeugaußenwände, die das Fahrzeug abschließen und so einen Resonanzraum für elektromagnetische Wellen bilden, in den simulierten Modellen nicht berücksichtigt worden. Auch ist es kritisch zu sehen, dass sich bei der Auswahl der Störquellen auf die Hochvoltleitungen beschränkt wurde. Die Komponenten der Leistungselektronik hätten als Störquellen stärker berücksichtigt werden können. Ebenso wäre es besser gewesen als Gehäuse-

wände für den Stromsensor Reflexionswände anstelle von Interface-Wänden zu verwenden. Auf diese Weise ließen sich die reflektierenden Eigenschaften des Gehäuses besser nachbilden.

Um eine feinere Auflösung in den Feldstärke-Flächenscans zu erreichen, wäre es nötig gewesen ein dichteres Netz von Messproben im Simulationsmodell aufzubauen. Dies hätte jedoch den Aufwand in der Auswertung erheblich erhöht, da in einem Simulationsdurchlauf programmbedingt nur drei Messproben zur Verfügung stehen. Erwähnt werden soll auch, dass die Möglichkeiten des Programms MEFiSto-2D Classic bei der Erstellung von Simulationsmodellen limitiert sind. Die Anzahl der in einem Modell eingesetzten Interface- und Reflexionswände ist durch das Programm begrenzt. Zudem können nur relativ einfache Geometrien aufgebaut werden. Insgesamt sind aber die Möglichkeiten, die das Programm MEFiSto-2D Classic bietet, gut ausgenutzt worden. Möchte man genauere Erkenntnisse über die räumliche Verteilung der elektromagnetischen Felder in einem Elektrofahrzeug gewinnen, ist vermutlich ein mächtigeres Simulationswerkzeug, welches die Erstellung eines dreidimensionalen Modells erlaubt, zu empfehlen, da die Abbildung des inneren Aufbaus eines Elektrofahrzeugs in einem wirklichkeitsnahen Modell doch recht komplex ist. Zudem wäre die Kenntnis über die Verteilung der wahren Feldimpedanz im Elektrofahrzeug notwendig. ◀