

Elektromagnetische Feldstärkesimulation mit MEFiSTo-2D Classic

Simulation der Felder eines zweikanaligen Kompensationsstromsensors, Teil 1

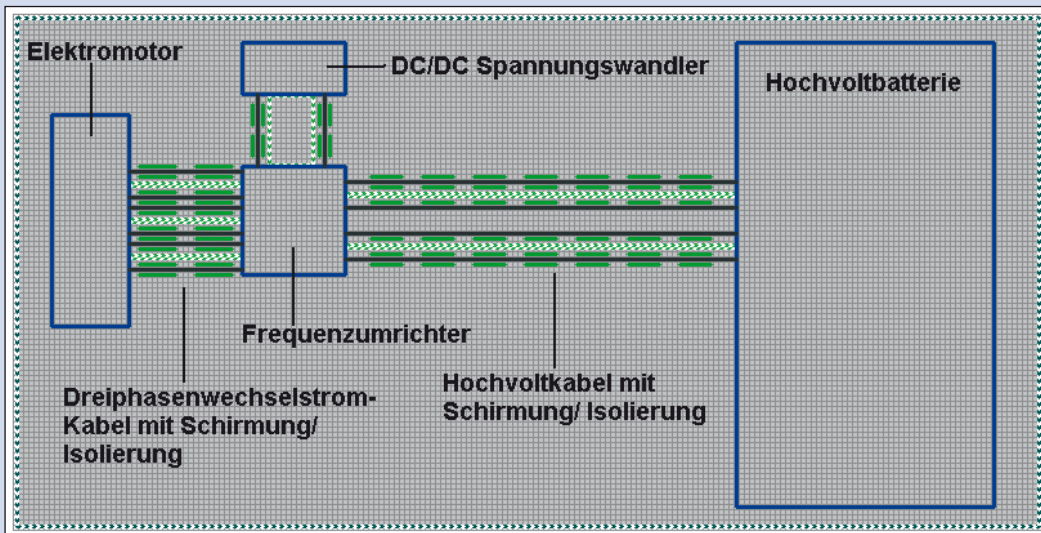


Bild 1: Aufbau des Simulationsmodells unter MEFiSTo-2D Classic

Abstract

In der Elektromobilität kommt der elektromagnetischen Verträglichkeit eine wesentliche Bedeutung zu, weil die dort verwendeten elektronischen Komponenten hohen elektromagnetischen Einflüssen ausgesetzt sind. 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 Feldsimulationsprogrammes untersucht, wo sich der beste Einbauort für einen Stromsensor in einem Elektrofahrzeug befindet.

Dazu wurde ein Modell eines Elektrofahrzeuges erstellt, mit welchem die elektromagnetischen Einflüsse auf unterschiedliche Einbauorte sowie verschiedene Gehäuseformen des Stromsensors simuliert wurden. Auf diese Weise konnte eine Vielzahl von Simulationsergebnissen gewonnen werden, von denen nur einige dargestellt worden sind. Bei der Auswertung der

Ergebnisse zeigte sich, dass die anfänglich aufgestellte These, dass der Stromsensor räumlich möglichst weit entfernt von einer potenziellen Störquelle angebracht sein muss um geringen elektromagnetischen Störeinflüssen ausgesetzt zu sein, nicht zutrifft. In einer abschließenden Betrachtung wurden Schwierigkeiten bei der Modellerzeugung und Schwächen der Simulationssoftware diskutiert.

Einleitung

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung bestand darin, den optimalen Einbauort eines Stromsensors in ein Elektrofahrzeug, unter den Gesichtspunkten der elektromagnetischen Verträglichkeit, herauszufinden. Um eine hohe Störfestigkeit und damit verbunden eine große Messgenauigkeit des Stromsensors zu erreichen, müssen elektromagnetische Störeinflüsse nach Möglichkeit gering gehalten werden. Im Gegensatz zu dem durch einen Verbrennungsmotor angetriebenen herkömmlichen Kraftfahrzeug, ist das elektromagnetische Störpotenzial in Fahrzeugen mit einem elektri-

schen Antriebsstrang erheblich größer. In elektrisch angetriebenen Kraftfahrzeugen kommen Batterien mit Nennspannungen von 400 V und mehr zum Einsatz. Abhängig von der Art des Antriebs werden der Batterie Ströme von mehreren 100 A entnommen. Dabei entstehen starke Magnetfelder um die Leitungen des Hochvoltbordnetzes herum, welche die Bordelektronik empfindlich stören können [1]. Der Motor in einem Elektrofahrzeug wird mit einer dreiphasigen Wechselspannung betrieben. Um die Gleichspannung der Hochvoltbatterie in eine Dreiphasenwechselspannung umzuwandeln, kommt ein Frequenzumrichter zum Einsatz.

Damit der Frequenzumrichter eine möglichst sinusförmige Ausgangsspannung bei gleichzeitig kleinen Glättungsspulen liefert, sind hohe Schaltfrequenzen von über 10 kHz notwendig. Gleichzeitig soll der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs groß sein, um eine hohe Reichweite des Elektrofahrzeugs zu erzielen. Dazu muss die Verlustleistung des Frequenzumrichters gering gehalten werden. Dies wird mit möglichst kurzen Schaltzeiten der Leistungshalbleiterbauelemente im Frequenzumrichter erreicht. Dabei entstehen aber steile Schaltflanken, die sich aus hochfrequenten Spektralanteilen zusammensetzen. Diese werden bei einer entsprechenden Leitungslänge sowie ungenügender Schirmung als elektromagnetische Felder von den Hochvoltkabeln abgestrahlt oder breiten sich als Transienten leitungsgebunden aus [2].

Eine weitere Störquelle im Elektrofahrzeug ist der DC/DC-Wandler, der das Hochvoltbordnetz mit dem 12-V-Bordnetz verbindet und nach dem gleichen Prinzip wie der Frequenzumrichter arbeitet. Des Weiteren

stellt das Batteriemanagementsystem eines Elektrofahrzeugs eine emissions- als auch immunitätskritische Baugruppe dar. Batteriemanagementsysteme sind über den CAN-Bus mit anderen elektronischen Baugruppen verbunden, um beispielsweise den Ladevorgang zu steuern. Die dafür notwendige hohe Rechenleistung wird mittels FPGAs oder ASICs realisiert. Da diese Schaltkreise mit hohen Taktfrequenzen arbeiten, stellen sie eine potenzielle Störquelle dar.

Das Batteriemanagementsystem enthält ebenso Leistungselektronikkomponenten, welche die hohen Ströme beim Aufladevorgang und Entladen steuern [3]. Aus diesen Gründen wird ersichtlich, dass ein Stromsensor in einem Elektrofahrzeug in ein leistungselektronisches Umfeld eingebunden und somit elektromagnetischen Störeinflüssen ausgesetzt ist. Um Vorhersagen über einen geeigneten Einbauort treffen zu können, wurde mit dem Simulationsprogramm MEFiSto-2D Classic ein Modell eines existierenden Elektrofahrzeugs erstellt und der Einfluss eines elektrischen Feldes auf den Stromsensor an unterschiedlichen Positionen mit verschiedenen Gehäuseformen und verschiedenen Leitungslängen simuliert.

Die Simulation elektromagnetischer Felder als Hilfsmittel zur Vorhersage und Vermeidung von EMV-Problemen

Bei der computerunterstützten Entwicklung neuer technischer Produkte ist eine Simulation von mechanischen, thermischen, strömungsmechanischen und elektromagnetischen Erscheinungen zu einem unverzichtbaren Werkzeug geworden. Der Simulation geht dabei die möglichst wirklichkeitsnahe Abbildung des zu simulierenden Systems, der Baugruppe oder des Bauelements, voraus. Für eine EMV-Simulation bedeutet das, dass die Eigenschaften und

die Anordnung von Störquellen, Übertragungsstrecken und Störsenken durch das Modell so genau wie möglich erfasst werden müssen [4]. Mit Hilfe von entwicklungsbegleitenden EMV-Simulationen ab der ersten Entwicklungsphase ist es möglich, frühzeitig EMV-Probleme aufzudecken und Konzepte zur Vermeidung dieser in die Entwicklungsarbeit einzubinden. Dadurch wird ein aufwendiges und mitunter teures Beheben von EMV-Problemen am fertigen Produkt vermieden [5]. Ein weiterer Vorteil von EMV-Simulationen ist die Möglichkeit, Aussagen über elektromagnetische Feldgrößen zu machen, die sonst für Messungen nicht oder nur schwer zugänglich sind. Auch werden durch eine Simulation die Systemeigenschaften nicht verändert.

Die Simulation von EMV-Problemen weist einige Unterschiede im Vergleich zur Simulation von herkömmlichen Hochfrequenzthemen auf. Während bei Simulationen in der Hochfrequenztechnik der betrachtete Frequenzbereich dem des Nutzsignals entspricht, ist bei typischen EMV-Problemen der betrachtete Frequenzbereich weit größer als der des Nutzsignals.

Sind die Abmessungen der betrachteten Strukturen kleiner als die Wellenlänge, können die Koppelmechanismen, bestehend aus galvanischer-, kapazitiver- und induktiver- Kopplung, durch Ersatzschaltbilder mit konzentrierten Bauelementen modelliert werden. Bei höheren Frequenzen, wenn also die Wellenlänge kleiner als die Abmessungen der betrachteten Strukturen ist, muss das elektromagnetische Feld betrachtet werden. Das Verhalten von elektromagnetischen Feldern wird vollständig durch die Maxwell'schen-Gleichungen beschrieben. Um das Verhalten von elektromagnetischen Feldern simulieren zu können, müssen die Maxwell'schen-Gleichungen gelöst werden [6]. Dabei haben sich numerische Feldberechnungsverfahren bewährt. Zu diesen numerischen Feldberechnungsverfahren zählen die

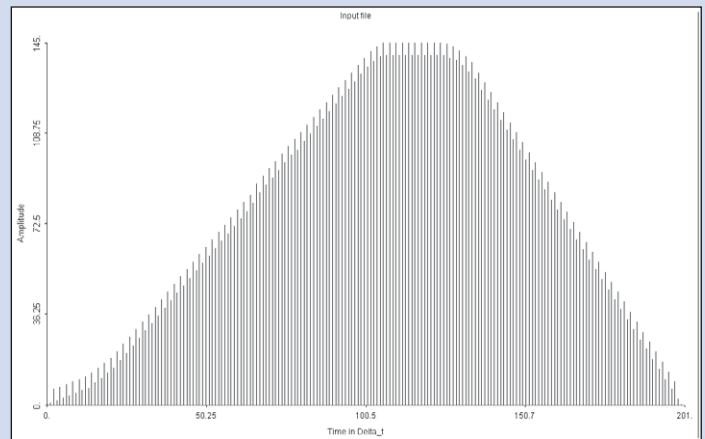


Bild 2: Pulsweitenmoduliertes Signal mit überlagertem CAN-Bus Signal

Finite-Elemente-Methode, die Finite-Differenzen Methode, die Randelementmethode sowie die Transmission-Line-Matrix-Methode.

Die numerischen Berechnungsverfahren sind allgemein gültig und lassen einen hohen Frei- raum in der Anwendung bezogen auf Strukturen und Materialeigenschaften zu. Jedoch unterscheiden sich die numerischen Lösungsverfahren in ihrer Eignung bei der Bearbeitung von bestimmten Problemstellungen. Die Finite-Elemente-Methode kann zur Lösung von geschlossenen Problembereichen mit einer beliebigen Geometrie und beliebigen Materialeigenschaften verwendet werden.

Mit der Finite-Differenzen-Methode können ebenfalls geschlossene Problembereiche mit beliebigen Materialeigenschaften bearbeitet werden. Sie ist jedoch nicht für alle geometrischen Strukturen geeignet. Die Randelementmethode kann auf einen offenen Problembereich angewendet werden. Mit ihr können die Ränder von beliebigen Geometrien erfasst werden. Allerdings ist diese Methode bei nichtlinearen Materialeigenschaften ungeeignet [5]. Das Simulationsprogramm, welches zur Bearbeitung der Ausgangs-problematik zum Einsatz kam, verwendete die Transmission-Line-Matrix-Methode.

Das Feldsimulationsprogramm MEFiSto-2D Classic

Mit dem Programm MEFiSto-2D Classic können elektromagnetische Felder in zweidimensionalen Strukturen simuliert werden. Da oftmals räumliche elektromagnetische Sachverhalte auch vereinfacht durch zweidimensionale Strukturen noch gut abgebildet werden können, eignete sich der Simulator bei der Bearbeitung der Problemstellung. Zusätzlich können mit dem Programm die drei Komponenten eines elektromagnetischen Skalarfeldes in einer dynamischen dreidimensionalen Animation dargestellt werden. Wie oben erwähnt, arbeitet der Simulator nach der Transmission-Line-Matrix-Methode im Zeitbereich. Dazu wird das zu simulierende Gebiet in ein Netzwerk aus TEM-Wellenleitern (engl. Transmissionlines) unterteilt. Bei TEM-Wellen stehen die Feldkomponenten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wellen, im Gegensatz zu Longitudinalwellen. Die TEM-Wellenleiter sind mit ihren Eingangstoren zu einem TLM-Knoten, auch TLM-Zelle genannt, miteinander verbunden. Das so entstandene Netzwerk kann durch verschiedene Standardwellenformen wie zum Beispiel Dirac-Impuls, Sinus, Gauss-Impuls oder raised-cosine sowie durch vom Nutzer erzeugte Signale angeregt werden. Die Impulse werden an der Knotenmitte gestreut und

gelangen zurück über die Eingangstore in benachbarte Zellen, von deren Knotenmitte sie wiederum gestreut werden. Die Impulsantwort des Systems wird im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich als Fouriertransformierte, nach Realteil und Imaginärteil getrennt, angegeben. Die Impulse entsprechen den Wellenamplituden und werden zur Darstellung der elektromagnetischen Feldkomponenten verwendet [7].

Einbauort eines Strommessensors in einem Elektrofahrzeug

Der genauen Messung der Stromstärke auf der Verbraucherseite einer Hochvoltbatterie in einem Elektrofahrzeug fällt eine große Bedeutung zu. Von den spezifischen Eigenschaften eines Strommessensors, wie dem verwendeten Messverfahren, dem Innenwiderstand, der Genauigkeit der Referenzspannungsquelle des Analog-Digital-Wandlers abgesehen, beeinflussen elektromagnetische Störeffekte die Genauigkeit der Messung. Da gerade in Elektrofahrzeugen, trotz Schirmungs- und Filterungsmaßnahmen, ein großes Potenzial für elektromagnetische Störstrahlung vorhanden ist, muss der Einfluss von Störfeldern auf einen empfindlichen Stromsensor möglichst gering gehalten werden. Dies scheint am ehesten dann gewährleistet zu sein, wenn sich der Stromsensor, räumlich gesehen, weit entfernt von einer potenziellen Störquelle befindet. Das bedeutet, dass der Stromsensor in räumlicher Distanz zu den Komponenten der Leistungselektronik und ihren Verbindungsleitungen, also nah an der Hochvoltbatterie, eingebaut wird. Die Gültigkeit dieser These wurde anhand der durch Simulation gewonnenen Ergebnisse überprüft.

Erstellung eines Simulationsmodells

Ausgehend von einem Opel Corsa, der auf einen reinen elektrischen Antrieb umgerüs-

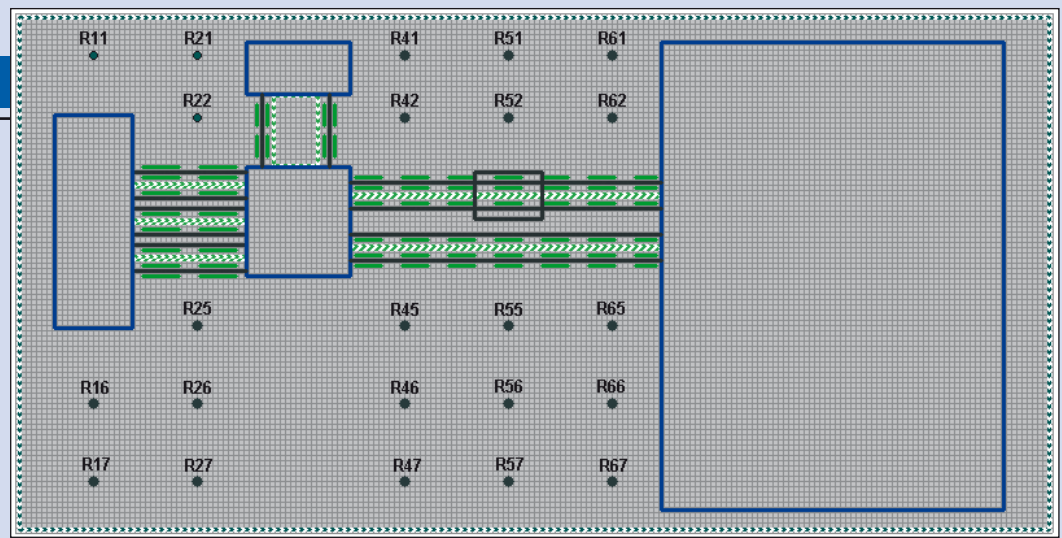


Bild 3: Vollständige Anordnung der Messproben im Simulationsmodell

tet wurde, erfolgte die Modellierung in MEFiSto-2D Classic. Dazu wurde ein grundlegendes Modell erstellt, auf dem wiederum verschiedene Varianten aufbauen. Auf diese Weise wurde eine Vielzahl von Simulationsergebnissen gewonnen, die als Grundlage bei der Entscheidungsfindung für den optimalen Einbauort des Stromsensors aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit dienen.

Die Umsetzung des Fahrzeugaufbaus

Da das verwendete Feldsimulationsprogramm im zweidimensionalen Raum arbeitet, konnte von dem vorhandenen E-Corsa Fahrzeug nur ein schematischer Grundaufbau angefertigt werden, der in Bild 1 zu sehen ist. Darin sind nur die wesentlichen Komponenten eines Elektrofahrzeugs enthalten.

Die Komponenten Elektromotor, Frequenzumrichter, DC/DC-Spannungswandler und Hochvoltbatterie wurden durch ideal magnetisch leitende Wände in Bild 1 blau dargestellt. Da diese Komponenten von einem metallischen Gehäuse umgeben sind, konnte so ihre Beeinflussung durch das elektromagnetische Feld am besten angenähert werden. Zudem hat das Metallgehäuse dieser potenziellen Störquellen eine abschirmende Wirkung. Auch diese konnte durch die magnetischen Wände nachgebildet werden. Die elektrischen Leitungen zwischen Hochvoltbatterie, Frequenzumrichter, Elektromotor und DC/DC Wandler, in Bild 1 grün-weiß dargestellt, wurden durch

Quellregionen nachgebildet. Sie stellen damit die Störquellen in der EMV-Simulation dar. Der Aufbau der Hochvoltkabel im Simulationsmodell knüpft an eine Projektarbeit an, die sich mit der Schirmdämpfung von Isolationsmaterialien beschäftigte und ebenfalls mit MEFiSto-2D Classic simuliert wurde [8]. Die durchgehenden schwarzen Linien sind sogenannte Interface-Wände. Sie haben im Simulationsprogramm MEFiSto-2D Classic die Eigenschaft eines idealen Transformators. Das heißt, dass die Eigenschaften der Interface-Wand so gewählt werden können, dass eine auf die Wand auftreffende Welle entweder verstärkt oder abgeschwächt wird. Im Modell schwächen die Interface-Wände die ausgesendeten Wellen der Quellregionen zur anderen Seite hin ab.

Die kurzen grünen Linien, welche um die schwarzen Interface-Wände angeordnet sind, stellen Reflexionswände dar. Sie können auftreffende Wellen unterschiedlich stark reflektieren oder absorbieren. Im Modell wurde ein Reflexionsfaktor gewählt, der knapp unter eins liegt. Dadurch werden auftreffende Wellen fast vollständig reflektiert. Auf diese Weise pendeln die Wellen zwischen den gegenüberliegenden Reflexionswänden hin und her und können teilweise an den Lücken zwischen den Reflexionswänden austreten. Mit dem Einsatz von Reflexionswänden als schwach absorbierende Schicht konnte die Abschwächung durch die Interface-Wände so gewählt werden, dass noch ein Teil der von den Quell-

regionen ausgesendeten Wellen in die Umgebung abgestrahlt wird. Durch die parallele sowie nicht durchgängige Anordnung der Reflexionswände um die Quellenregionen herum, bilden sich bei bestimmten Leitungslängen Stehwellen aus. So lassen sich in mehreren Modellen mit unterschiedlichen Leitungslängen die Umgebungsbedingungen für den Stromsensor variieren. Die relative Permittivität der Simulationsumgebung wurde auf eins festgelegt. Sie weicht damit nur geringfügig von der relativen Permittivität der Luft ab und gibt somit gut die realen Bedingungen im E-Corsa Fahrzeug wieder.

Fortsetzung folgt

Autor:



Christian Hübner wurde 1981 in Jena geboren. Nach der Berufsausbildung zum Kommunikationselektroniker war er mehrere Jahre angestellt bei der Funkwerk AG in Köllda. Danach folgte die Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife am Thüringenkolleg in Weimar mit anschließendem Studium der Informationstechnik an der Hochschule Schmalkalden. Der Fachartikel entstand während eines Praktikums bei der IMG Nordhausen. Der Betreuer dort war Herr Prof. Gräbner.