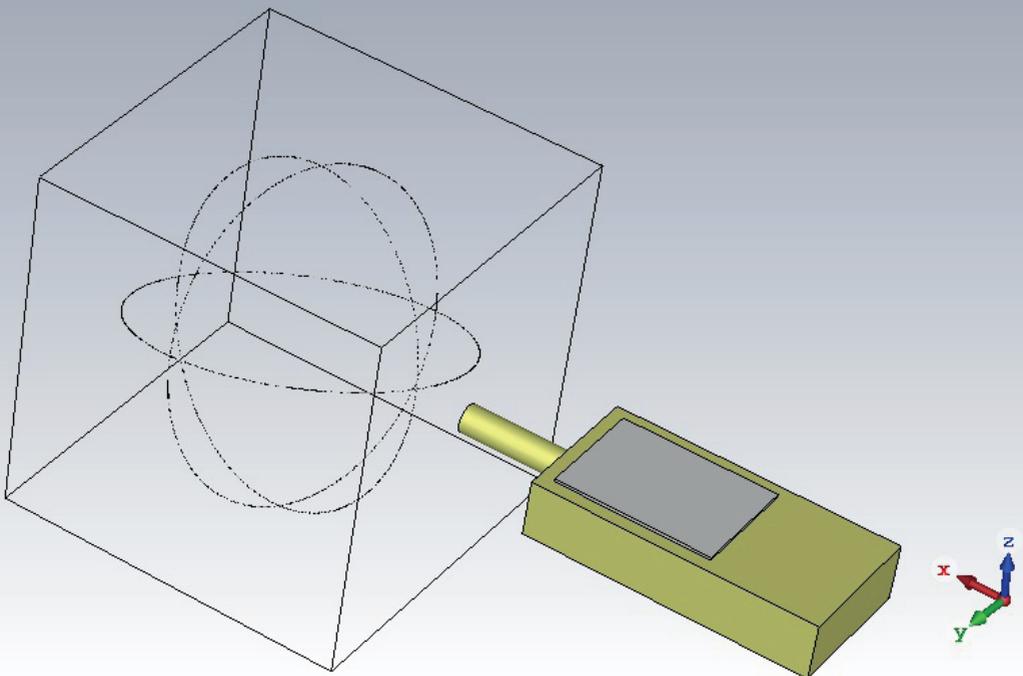


Aufbau eines hybriden Simulationsmodells zur Vorhersage von Magnetfeldern im Gesamtfahrzeug

Marcel Messer



Aufbau eines hybriden Simulationsmodells zur Vorhersage von Magnetfeldern im Gesamtfahrzeug

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Marcel Messer

aus Köthen (Anhalt)

eingereicht am: 02.06.2020

mündliche Prüfung am: 03.12.2021

1. Referent: Prof. Dr. rer. nat. Achim Enders
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Form

Druckjahr: 2022

**Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik**

Berichte aus der Elektrotechnik

Marcel Messer

**Aufbau eines hybriden Simulationsmodells zur
Vorhersage von Magnetfeldern im Gesamtfahrzeug**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8418-4

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner dreijährigen Tätigkeit als konzerninterner Doktorand bei der AUDI AG in Ingolstadt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Achim Enders vom Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit der TU Braunschweig für die wissenschaftliche Betreuung, der konstruktiven Kritik und den zahlreichen fachlichen Diskussionen. Für die Übernahme des Zweitgutachtens und dem Vorsitz der Prüfungskommission möchte ich mich bei den Herren Prof. Dr.-Ing. Thomas Form und Prof. Dr.-Ing. Jörg Schöbel bedanken. Dem Leiter der EMV-Abteilung der AUDI AG, Herrn Dr.-Ing. Jörn Leopold gilt an dieser Stelle mein besonderer Dank für die Schaffung der nötigen Freiräume zur Gestaltung dieser Arbeit, sowie der Einbringung von Ideen und Anforderungen seitens der AUDI AG. Ebenfalls möchte ich mich bei allen aktiven und ehemaligen Kollegen der EMV-Abteilung der AUDI AG bedanken. Besonders sei hier namentlich Herr Dr.-Ing. Michael Kühn erwähnt, welcher mir im Jahr 2016 durch ein Industriepraktikum den Einstieg in das Unternehmen ermöglichte, meine Masterarbeit kompetent betreute, mir durch den Besuch von Fachkonferenzen das wissenschaftliche Umfeld näher brachte und dadurch mein Interesse an einer Industriepromotion weckte. Alle von mir im Rahmen einer Bachelor -oder Masterarbeit betreuten Studenten gilt mein besonderer Dank: Khaled Youssef, Linda Faust, Thomas Wenzl, Rahul Kanamarlapudi, Matthias Hammer, Christian Hildebrand, Timo Kaiser, Sahitya Yarragolla, Markus Günthner, Dominik Schmidt, Maximillian Müller und Joulia Ouchchilace. Des Weiteren möchte ich mich bei den folgenden Kollegen der EMV-Abteilung der Volkswagen AG in Wolfsburg für den konstruktiven Austausch zu Simulationsthemen und die schöne und lehrreiche gemeinsame Zeit auf internationalen Konferenzen bedanken: Oussama Sassi, Benjamin Willmann und Teresa Tumbrägel. Weiterhin danke ich meinem Stiefvater Maik für die Inspiration zur Wissenschaft in jungen Jahren. Für die seelische und materielle Unterstützung bedanke ich mich recht herzlich bei meiner Mutter Silvia und Ihrem Lebensgefährten Peer, meiner Tante Katja, meiner Cousine Nele, meinen Großeltern Christine und Arno und meinen Schwiegereltern Kathrin und Bernd. Meiner Freundin Claudia danke ich für Ihr Verständnis, Ihrer Hilfe und Ihrem Beistand in stressigen Zeiten. Ein letzter Dank geht an meine zwei besten Freunde Daniel und Denis für die Ablenkung zur rechten Stunde. Ohne euch alle wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Dissertation war die ganzheitliche Betrachtung über die virtuelle Absicherung der elektromagnetischen Verträglichkeit zur Umwelt (EMVU) für niederfrequente Magnetfelder im Frequenzbereich von $f = 1 \text{ Hz} \dots 400 \text{ kHz}$ im Fahrzeug. Durch die zunehmende Elektrifizierung vieler Komfort- und Sicherheitsfunktionen sowie des Antriebsstranges kommt es in diesem Bereich zu erhöhten magnetischen Feldexpositionen, die sowohl wegen der technischen EMV wie auch aus Personenschutzgründen genau bekannt sein und ggf. begrenzt werden müssen. Die vorliegende Arbeit entwickelt dafür mit Hilfe von Feldsimulationstools eine virtuelle Absicherungsmethodik. Die felderregenden Stromverteilungen der Fahrzeugsysteme und Verkabelungen werden durch entsprechende Messungen bestimmt und in einer Datenbank für die virtuelle Absicherung zur Verfügung gestellt. Sowohl diese Vermessung mit dem de-facto-Industriestandard-Messgerät ELT 400 als auch die zeitvarianten Stromverläufe machen eine umfangreiche Fehleranalyse erforderlich, um die Einhaltung gerade von Personenschutz-Grenzwerten auch unter „worst-case“-Fehlersituationen zu gewährleisten. Beispielhaft werden die in dieser Arbeit erstellten Simulationsmodelle und Rechenmethoden für die Untersuchung einer EMVU relevanten Komponente angewandt.

Abstract

The aim of this PhD thesis was to make an approach for the holistic view of the numerical validation of low-frequency magnetic fields in the frequency range of $f = 1 \text{ Hz} \dots 400 \text{ kHz}$ in the context of Electromagnetic Compatibility and environment. The impaired electrical control of comfort and safety functions as well as the drive trains result in the associated magnetic field exposures in this area, which must be precisely known and, if necessary, must be limited due to reliable EMC as well as from personal protection law. The present work develops a virtual validation methodology for this with the help of field simulation tools. The field-stimulating power distribution of the vehicle systems and cabling are determined by appropriate measurements and made available in a database for virtual protection. Both this measurement with the industry standard measuring device ELT 400 and the time-variant current curves require an extensive error analysis in order to ensure compliance with personal protection limit values even under „worst-case“ error situations. Finally the simulation models and calculation methods created in this work were used as examples for the investigation of an EMC relevant component.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolliste	XIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	7
2.1 Materialgleichungen	7
2.2 Randbedingungen	9
2.3 Gesetz von Biot-Savart	12
2.4 Numerische Berechnungsmethoden	14
2.4.1 Die Finite Elementen Methode (FEM)	19
2.5 Das Huygenssche Prinzip	23
2.6 Schirmdämpfung	29
2.7 ICNIRP	31

3 Genauigkeit von schnellen Fourier-Transformationen	33
3.1 Signaltheorie	34
3.2 Einflussfaktoren	37
3.2.1 Abtastfrequenz	37
3.2.2 Spektraler Leckeffekt	38
3.2.3 Rauschen	41
3.3 Parameterstudie	43
3.3.1 Einfluss der Überabtastung (F_{os})	44
3.3.2 Einfluss der Periodenanzahl (F_{nop})	46
3.3.3 Einfluss des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR)	47
3.3.4 Einfluss von F_{os} , F_{nop} und dem SNR	50
4 Hybride Simulation einer isotropen Magnetfeldsonde	57
4.1 Modellierung über Punktrastermodell (PRM)	59
4.1.1 Erzeugung des Punktrasters	60
4.1.2 Berücksichtigung der Spulenorientierung	63
4.1.3 Punktrastermodell im homogenen Magnetfeld	65
4.1.4 Punktrastermodell im inhomogenen Magnetfeld	70
4.1.5 Abweichung zwischen lokaler und gemittelter magnetischer Flussdichte	78
4.2 Modellierung über Spulenkopffmodell (SKM)	80
4.2.1 Berechnung des Umrechnungsfaktors $k(f)$	83
4.2.2 Validierung des Spulenkopffmodells	84
4.2.3 Maximalwertsuche durch Anwendung des Feld-Äquivalenzprinzips	85
4.2.4 Grenzen der Anwendbarkeit des Feld-Äquivalenzprinzips	89
4.3 Implementierung der WPM für die ICNIRP Referenzwert Simulation	93

5	Basis- und Referenzwertsimulation für eine EMVU-relevante Komponente	103
5.1	ICNIRP 1998/2010 Referenzwerte	103
5.1.1	Aufbau des Simulationsmodells	105
5.1.2	Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Referenzwerten	107
5.2	ICNIRP 1998/2010 Basiswerte	110
5.2.1	Stromdichten	112
5.2.2	Interne elektrische Feldstärke	113
6	Konklusion und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	123
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	137
A	ICNIRP 1998/2010 Basis und Referenzgrenzwerte	139
B	Qualitative Feldverteilung Helmholtz Spule	141
C	Qualitative Feldverteilung <i>KLV</i> Untersuchung	143
D	Qualitative Meshdarstellung <i>KLV</i> Untersuchung	145
E	WLC Untersuchung	147

Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
3D	dreidimensional
CAD	Computer-aided Design
CPU	Central Processing Unit
CST MWS	Computer Simulation Technology Microwave Studio
DC	Tastgrad (engl. Duty Cycle)
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DSP	Digitaler Signalprozessor
DUT	Device Under Test
ELT	Exposure Level Tester
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMF	Elektromagnetische Felder
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMVU	Elektromagnetische Verträglichkeit zur Umwelt
ESB	Elektrisches Ersatzschaltbild
FD	Frequency Domain
FDM	Finite Differenzen Methode
FDS	Frequency Domain Solver
FDTD	Finite Difference Time Domain
FEM	Finite Element Methode
FFT	schnelle Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier-Transformation)
FFTW3	Fastest Fourier-Transform in the West
FIT	Finite Integrale Technik (engl. Finite Integration Technique)
FT	Fourier-Transformation
GB	Gigabyte
GPU	Graphics Processing Unit
HV	Hochvolt
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IRPA	International Radiation Protection Association

MB	Megabyte
MoM	Momentenmethode
PCB	Printed Circuit Board
PO	Physical Optics (Ray Tracing)
PRM	Punktrastermodell
PTL	Peak To Limit
PWM	Pulsweitenmoduliertes Signal
SKM	Spulenkopfmodell
SNR	Signal to Noise Ratio
STND	Standard
TB	Terabyte
TD	Time Domain
VW	Volkswagen
WLC	Wireless Charging System
WPM	Weighted Peak Method

Symbolliste

A	Fläche
a	Radius des Sondenkopfes
a_{dipole}	Radius des magnetischen Dipols
α	Drehung um X-Achse
B	magnetische Flussdichte (Skalar)
\vec{B}	magnetische Flussdichte (vektoriell)
B_{avg}	gemittelte magnetische Flussdichte im Sondenkopf
B_{center}	lokale magnetische Flussdichte im Zentrum des Sondenkopfes
B_{coil}	magnetische Flussdichte Spule im Punkteraster
B_{FP}	magnetische Flussdichte infinitesimale Feldsonde im Punkteraster
\vec{B}_{n1}	Normalkomponente der magnetischen Flussdichte (analog \vec{H} , \vec{E} , \vec{D})
\vec{B}_{t1}	Tangentialkomponente der magnetischen Flussdichte (analog \vec{H} , \vec{E} , \vec{D})
B_x, B_y, B_z	magnetische Flussdichte für die jeweilige Spule der ELT-400
β	Drehung um Y-Achse
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
γ	Drehung um Z-Achse
D	elektrische Flussdichte (Skalar)
\vec{D}	elektrische Flussdichte (vektoriell)
$d\vec{A}$	vektorielles Flächenelement
$d\vec{F}$	Flächennormalvektor
DFT	Diskrete Fourier-Transformation (Funktionsgleichung)
dl	Linielement
$d\vec{l}$	vektorielles Linielement
$d_{\text{struktur,min}}$	kürzeste Abmessung in einer Struktur
dt	kleinster Zeitschritt
dz	kleinster Schritt im 1D Raumbgitter in Z-Richtung
$\Delta B_{\text{max}3}$	analytisch berechneter relativer Fehler zwischen B_{center} und B_{avg}
Δ_{rel}	relativer Fehler/Unterschied
$\Delta_{\text{rel}}(f)$	frequenzabhängiger relativer Fehler/Unterschied

$\delta_x, \delta_y, \delta_z$	Winkel zwischen \vec{n} und globaler Koordinatenachse
E	elektrische Feldstärke (Skalar)
\vec{E}	elektrische Feldstärke (vektoriell)
EI	Exposure Index (in dieser Arbeit als „Exposure Wert“ bezeichnet)
ε	Permittivität
ε_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
ε_r	relative Permittivität
\vec{e}	Einheitsvektor
F	Fourier-Transformation (Funktionsgleichung)
$F_{\max, \min}$	Faktor zwischen größtem und kleinstem Feldwert
F_{nop}	Grundperioden im Zeitintegrationsfenster (engl. Factor Number of Periods)
F_{os}	Überabtastungsfaktor (engl. Factor OverSampling)
f	Frequenz
f_{\max}	maximale Frequenz in einem Spektrum oder Simulationssetup
f_{\min}	minimale Frequenz in einem Spektrum oder Simulationssetup
f_{sampling}	Abtastfrequenz
f_{signal}	Grundfrequenz Signal
$f_{\text{signal-max}}$	maximal vorkommender Frequenzanteil im Signal
f_{window}	Fensterfunktion (Rechteck, Flat Top usw.)
Φ	Magnetischer Fluss
Δf	Abstand Frequenzstützstellen
$G(f)$	gewichtetes Spektrum
$g(t)$	gewichtetes Zeitsignal
$GW(f)$	Grenzwerte ICNIRP1998/2010 Empfehlung
H	magnetische Feldstärke (Skalar)
\vec{H}	magnetische Feldstärke (vektoriell)
$H'(f)$	Übertragungsfunktion eines Systems
$h'(t)$	Impulsantwort eines Systems
I	elektrische Stromstärke
i, n, m	allgemeine Laufvariable
J	elektrische Stromdichte (Skalar)
\vec{J}	elektrische Stromdichte (vektoriell)
j	Imaginäre Einheit
$KL V$	Kantenlängenverhältnis zwischen Drahtstruktur und Huygensbox
k	Wellenzahl
$k(f)$	frequenzabhängiger Umrechnungsfaktor

L	Induktivität
l_{curve}	Länge der Evaluierungskurven
l_{draht}	Kantenlänge Drahtstruktur
l_{huygens}	Kantenlänge Huygensbox
λ	Wellenlänge
λ_{min}	kleinste Wellenlänge im Simulationsmodell
Δ	Laplace-Operator
M	magnetische Stromdichte (Skalar)
μ	Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante des Vakuums
μ_r	relative Permeabilität
$\mu_r(f)$	frequenzabhängige komplexe relative Permeabilität
μ'	Realteil der komplexen Permeabilität
μ''	Imaginärteil der komplexen Permeabilität
N	Anzahl der Abtastpunkte
N_{coil}	Anzahl Windungen der Helmholtz Spule
NDIM	Anzahl Gitterzellen pro kürzester Länge
N_{grid}	Anzahl Punkte im Punktraster
NLAM	Anzahl Gitterzellen pro kürzester Wellenlänge
N_{prop}	Anzahl Propagierungen einer Welle durch Kalkulationsdomäne
N_z	Anzahl der Gitterpunkte in Z-Richtung
\vec{n}, \hat{n}	Normalvektor
n_{max}	maximaler Brechungsindex
n_{min}	minimaler Brechungsindex
∇	Nabla-Operator
P	Aufpunkt
P_{noise}	Rauschleistung
P_{signal}	Signalleistung
Q	Elektrische Raumladung
R_{coil}	Radien der Helmholtz Spulen und Abstand zwischen den Spulen
R_L	Verlustanteil einer Luftspule
R_x	Drehmatrix X-Achse
R_y	Drehmatrix Y-Achse
R_z	Drehmatrix Z-Achse
r	Abstand Zentrum magnetischer Dipol zu Zentrum der Feldsonde
r_{coil}	Radius der Spulen der ELT-400

\vec{r}, \vec{r}'	Ortsvektoren
ρ	Elektrische Raumladungsdichte
$\vec{\rho}_0$	Dipolmoment
S	Hüllfläche
SAR	spezifische Absorptionsrate
σ	elektrische Leitfähigkeit
T_{window}	Größe des Zeitintegrationsfensters
t	Zeit
t_{prop}	Zeit bis Welle einmal durch Raumgitter propagiert ist
U	elektrische Spannung
U_{IND}	induzierte Spannung
U_{noise}	Rauschspannung
$\mathcal{U}(0,1)$	normal verteilter Wahrscheinlichkeitsraum
V	Volumen
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$W(f)$	Übertragungsfunktion Gewichtungsfiler
$w(t)$	Impulsantwort Gewichtungsfiler
ω	Kreisfrequenz
X	Blindwiderstand
X_{approx}	angenäherter Wert
X_{correct}	Referenzwert (wahrer Wert)
X_L	Induktivitätsanteil einer Luftspule
$X'(f)$	Eingangssignal im Frequenzbereich
$x'(t)$	Eingangssignal im Zeitbereich
x	Koordinate in X-Richtung
x	Eingangsgröße einer Funktion (allgemein)
x_g	geometrisches Mittel
$Y'(f)$	Ausgangssignal im Frequenzbereich
$y'(t)$	Ausgangssignal im Zeitbereich
y	Ausgangsgröße einer Funktion (allgemein)
$y_{\text{noise}}(t)$	mit definiertem Rauschen überlagertes Signal
y	Koordinate in Y-Richtung
Z	Impedanz
$z(t)$	Zufallszahlenfolge
z	Koordinate in Z-Richtung