

Modellierung und Validierung einer isotropen Magnetfeldsonde

M.Sc. Marcel Messer, AUDI AG, EMV Abteilung

1 Einleitung

Untersuchungen in der Vergangenheit zeigten, dass Messungen nahe einer inhomogenen Magnetfeldquelle zu Abweichungen von bis zu 20% (relativer Fehler) zwischen der lokalen magnetischen Flussdichte B_{center} im Zentrum der Magnetfeldsonde und dem gemessenen Mittelwert B_{total} ([1], [2]). Der Autor schlussfolgerte, dass „zum Beispiel, wenn das resultierende magnetische Feld in einem Abstand r von der Gerätschaft mit einer kombinierten relativen Standardunsicherheit von weniger als $\pm 10\%$ gemessen werden soll magnetische Feldsonden mit einem Abstand zu Durchmesser Verhältnis $r/a \sim 3$ ungeeignet sind“ ([1], [2]). Daran ist zu erkennen, dass der Radius der Spulen in der magnetischen Feldsonde einen großen Einfluss auf das gemessene magnetische Feld hat vor Allem im sehr stark inhomogenen Bereich nahe einer Störquelle. In der Regel bieten Simulationstools wie CST Microwave Studio (CST MWS) nur die Möglichkeit Feldwerte an diskreten Punkten im Raum zu berechnen. Wenn Vergleiche zwischen Messungen und Simulationen gemacht werden ist es notwendig in der Simulationssoftware die Spulenradien mit zu berücksichtigen. Dieser Artikel beschreibt wie eine isotrope magnetische Feldsonde in CST auf zwei verschiedene Weisen modelliert werden kann. Anschließend wird die Sonde für ein inhomogenes Feld validiert. Für das inhomogene Feld wurde in der vergangenen Veröffentlichung ([3]) ein falscher Drehwinkel verwendet. Die dadurch in den Ergebnissen entstandenen Abweichungen werden mit diesem Artikel richtiggestellt. Des Weiteren wird das Simulationsmodell der Sonde noch über eine EMVU-Bewertung hinsichtlich ICNIRP 1998 und 2010 validiert und damit auch ein Vergleich zwischen zwei Berechnungsverfahren für den Exposure Wert aus ICNIRP aufgezeigt.

2 Modellierung der isotropen Magnetfeldsonde

Die isotrope Magnetfeldsonde besteht aus 3 orthogonalen Spulen mit einer Spulenfläche von 100cm^2 ([4], [5]). Mit diesen Spulen wird die induzierte Spannung gemäß dem Faraday'schen Induktionsgesetz gemessen (siehe Gleichung 1).

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} = U_{\text{IND}} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Gleichung (1)}$$

2.1 Punktrastermodell

In CST MWS kann das magnetische Feld B direkt über Sonden, welche an einem diskreten Punkt im Raum den Wert messen, erfasst werden. Durch Verwendung einer Magnetfeldsonde wird das Magnetfeld innerhalb der Spulenfläche gemäß Gleichung 2 auf integriert und laut Gleichung 3 auf die Spulenfläche normiert (Mittelwertbildung).

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot A \cdot \cos(\delta) \quad \text{Gleichung (2)}$$

$$B_{\text{avg}} = \frac{1}{A} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Dieser physikalische Effekt muss nun in CST MWS ebenfalls berücksichtigt werden. Dafür werden im ersten Ansatz die 3 Spulen der Magnetfeldsonde über 3 Probengitter, welche orthogonal zueinanderstehen, modelliert (siehe Abb.: 1).

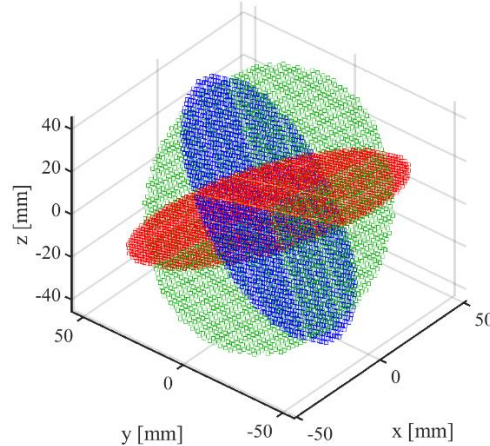


Abbildung 1 Punktrastermodell der Magnetfeldsonde (jede Farbe repräsentiert eine Spule)

Anschließend werden die Punkte in jedem einzelnen Gitter über Gleichung 4 aufsummiert und gemittelt.

$$B_{\text{Coil}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_{\text{FP},i} \quad \text{Gleichung (4)}$$

Mithilfe von Gleichung 5 wird danach der Betrag des Magnetischen Feldes aus den 3 Spulen berechnet.

$$B_{\text{total}} = \sqrt{B_{\text{coil},1}^2 + B_{\text{coil},2}^2 + B_{\text{coil},3}^2} \quad \text{Gleichung (5)}$$

Zur Validierung des Punktrastermodells wurde eine Rechteckschleife mit einer Kantenlänge von $L=400\text{mm}$ und einem Durchmesser von 1mm verwendet. Diese wurde mit einem Sinussignal mit einer Frequenz von $f=10\text{kHz}$ und einer Amplitude von $I=10\text{A}$ gespeist. Damit keine metallischen Randbedingungen in der Nähe der Rechteckschleife sind, und diese daher auch analytisch nach dem Gesetz von Biot-Savart berechnet werden kann (siehe Abbildung 2), wurde diese auf einem Holztisch platziert. Das Punktrastermodell und die reale Magnetfeldprobe wurden an demselben Punkt direkt über der Drahtschleife, wie in Abbildung 3 dargestellt, platziert. Da nah am Draht ein sehr inhomogenes Feld zu erwarten ist kann damit die integrierende Wirkung der Probe am besten kontrolliert werden. In der Simulation wurde der F-Solver verwendet, welcher auf der Finiten Elemente Methode beruht ([6]).

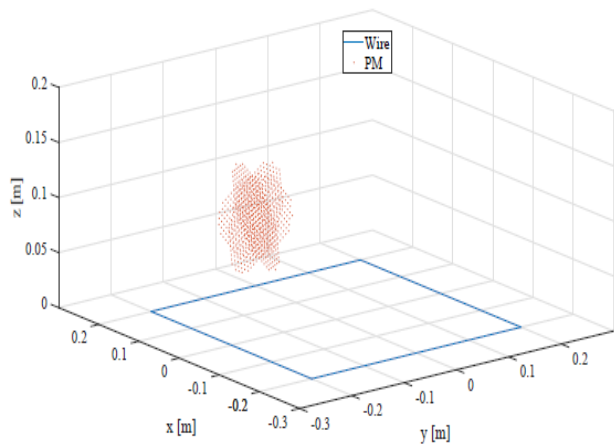


Abbildung 2 Analytisches Modell in Matlab

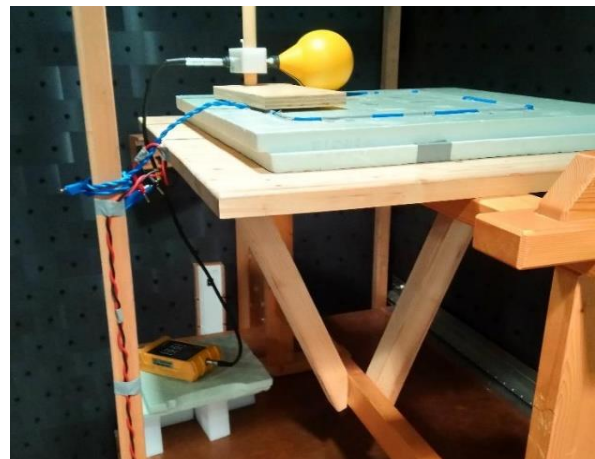


Abbildung 3 Rechteckschleife mit Messpunkt

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zu sehen und zeigen eine gute Übereinstimmung.

| Berechneter Wert B [μT] | Simulation B [μT] | Messung B [μT] |
|--|----------------------------------|-------------------------------|
| 34.4 | 33.83 | 32.8 |

Tabelle 1 Ergebnisse für inhomogenes Feld

2.2 Spulenmodell

Da in der Praxis die Orientierung der Probe an einem Punkt, in einem inhomogenen Feld im Raum, einen Einfluss auf den gemessenen Wert hat ist es im EMV Kontext speziell von Interesse diejenige Winkelstellung der Probe zu finden, bei der der größte Messwert (Worst Case) gemessen wird. In praktischen Labormessungen wird dies erreicht, indem die Magnetfeldprobe zufällig an einem Messpunkt in ihrer Winkelstellung variiert wird. Mit dem zuvor unter 2.1. beschriebenen Punktrastermodell ist es leider nicht möglich automatisiert Rotationen um alle drei Drehwinkel (α , β , γ siehe Abbildung 4) durch zu führen.

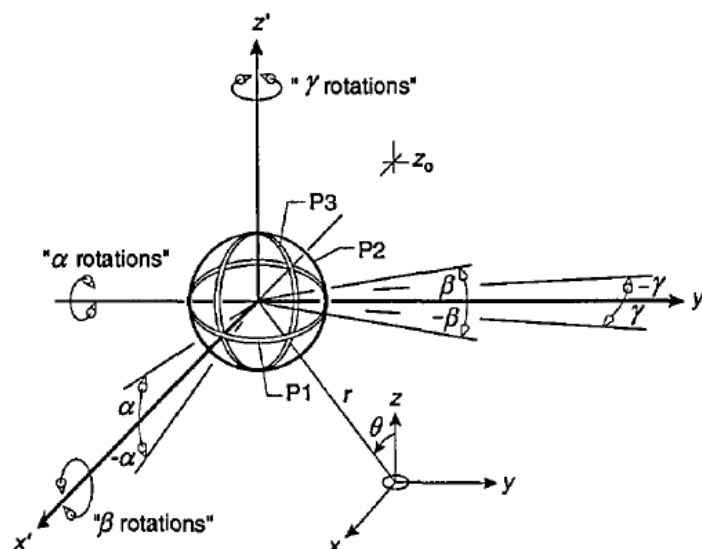


Abbildung 4 Geometrie der isotropen Sonde mit Drehwinkeln

Deshalb wird nun in einem zweiten Ansatz ein neues Modell vorgestellt. Das neue Sondenmodell besteht aus 3 orthogonal zu einander orientierten Spulen, mit welchen die induzierte Spannung gemäß dem Faraday'schen Induktionsgesetz (Gleichung 1) erfasst

werden kann. Zur Umrechnung der Spannungswerte in Feldwerte wird ein Transducer $k(f)$ verwendet, welcher über eine Kombination des alten Punktrastermodells mit dem neuen Spulenmodell, aufgestellt werden konnte (siehe Abbildung 5 und 6).

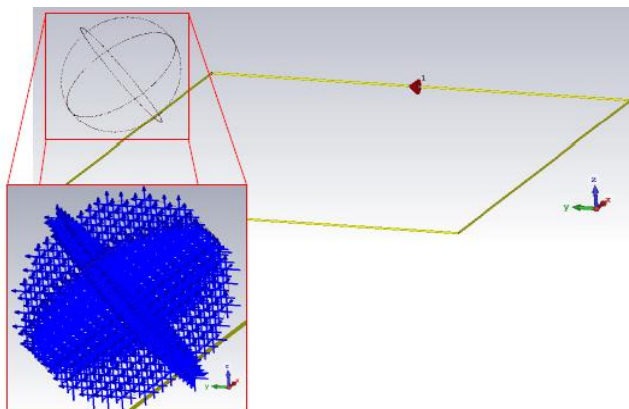


Abbildung 5 Punktrastermodell mit Spulenmodell

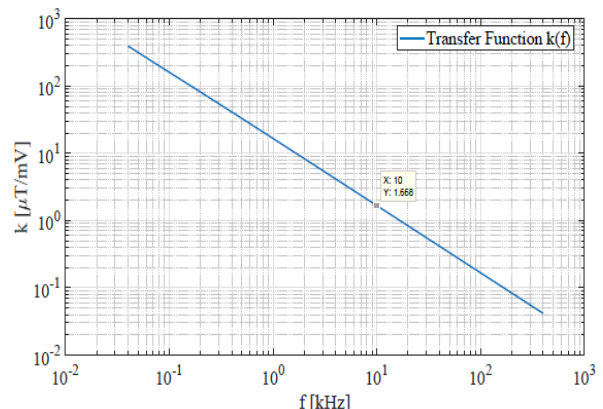


Abbildung 6 Transducer $k(f)$

Um nun automatisiert nach dem größten Messwert in CST MWS zu suchen muss das Spulenmodell automatisiert um alle Drehwinkel rotiert werden. Bei jeder Drehung der Spulen ändern sich die Randbedingungen im Modell und zuvor berechnete Ergebnisse müssen für die neuen Randbedingungen neu berechnet werden. Dies kann sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, wenn ein sehr komplexes Modell vorliegt. Mithilfe einer Huygens Box erfolgt eine Aufteilung des Modells in zwei Teile, ein Teil beinhaltet die Drahtschleife bzw. das DUT, der andere Teil das eigentliche Spulenmodell. Die tangentialen Komponenten der magnetischen Felder werden am Rand der Huygens Box aufgezeichnet. Diese werden im zweiten Teil des Modells, welcher das Spulenmodell beinhaltet, dann über speziell definierte Stromdichten auf der Boxoberfläche eingespeist. Da nun nur noch das Spulenmodell ohne das DUT um alle Drehwinkel rotiert werden muss kann somit sehr schnell und effizient nach dem größten Messwert gesucht werden. Dies ist detailliert in [3] beschrieben. Das Spulenmodell wurde in [3] für 4 verschiedene Positionen, welche in Abbildung 7 zu sehen sind, mit den Messwerten verglichen und validiert. Dabei entstanden Diskrepanzen bis zu 20% (relativer Fehler) zwischen Messung und Simulation. Wie sich gezeigt hat war der Grund dafür ein Fehler in einem der beiden Drehwinkel der 3 Spulen (siehe Abbildung 8).

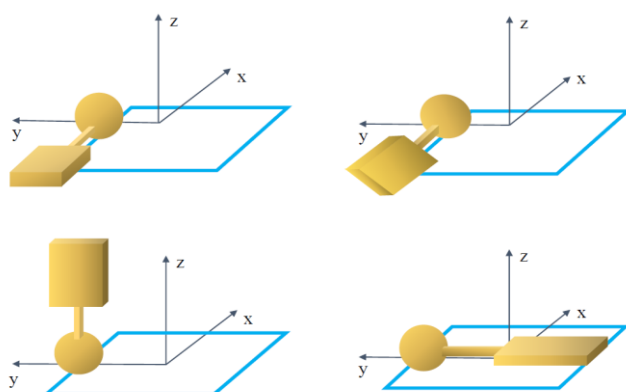


Abbildung 7 Verschiedene Positionen der Magnetfeldprobe über der Drahtschleife: Oben links: 1, Oben rechts: 2, Unten links: 3, unten rechts: 4

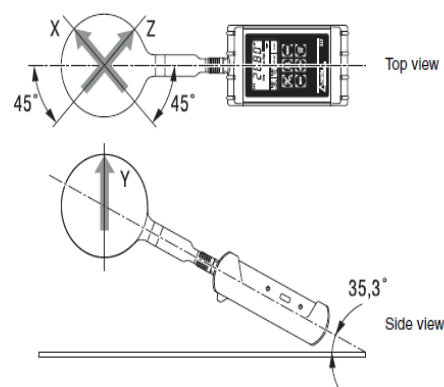


Abbildung 8 Drehwinkel der 3 Spulen der Magnetfeldprobe

Somit entsprach die Spulenorientierung der realen Magnetfeldprobe nicht exakt der des Spulenmodells. Der Fehler wurde nun korrigiert und der Vergleich erneut durchgeführt. In Abbildung 9 sind die alten Ergebnisse und in Abbildung 10 die neuen Ergebnisse dargestellt.

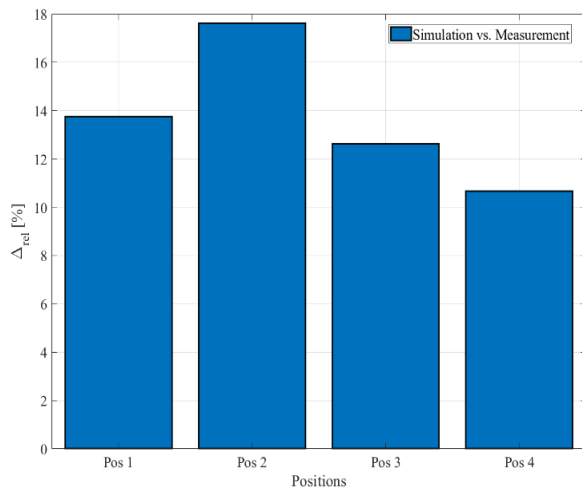


Abbildung 9 Vergleich zwischen Messung und Simulation mit der falschen Spulenorientierung

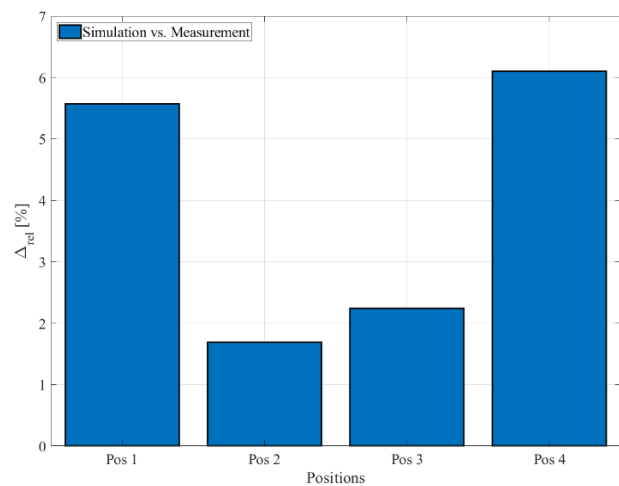


Abbildung 10 Vergleich zwischen Messung und Simulation mit der richtigen Spulenorientierung

Es ist deutlich zu sehen, dass der maximale relative Fehler von ca. 18% mit der falschen Spulenorientierung auf ca. 6% in der richtigen Spulenorientierung, gesunken ist.

3 Validierung des Spulenmodells für ICNIRP Referenzwert Simulation

Die ICNIRP liefert für die Beurteilung von sich zeitlich veränderlichen Magnetfeldern Grenzwerte, die eingehalten werden müssen, damit eine gesundheitliche Schädigung an einem Menschen ausgeschlossen werden kann. Bei der Exposition von Feldern mit unterschiedlichen Frequenzen ist es wichtig zu bestimmen, ob sich eine additive Wirkung der Exposition ergibt. Hierfür empfiehlt ICNIRP die Anwendung von Gleichung 6 [7] (Konstante b siehe auch [7])

$$\sum_{j=1 \text{ Hz}}^{65 \text{ kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1 \quad \text{Gleichung (6)}$$

Es wird jeder im Feld vorhandene Frequenzanteil H_j durch den Grenzwert $H_{L,j}$ am selbigen Frequenzpunkt dividiert und über die Summen aufsummiert. Ist die Summe kleiner als 1 bzw. 100% ist der Prüfling in Ordnung. Die Anwendung der Gleichung 6 führt meistens zu einer Überbewertung, da angenommen wird, dass alle Frequenzanteile in Phase sind und sich konstruktiv überlagern [8]. Die Magnetfeldprobe führt die Bewertung des Feldes im Zeitbereich mit der WPM (Weighted Peak Method) durch. Diese Methode stellt die zugrundeliegenden physikalischen und biologischen Effekte besser dar als alle anderen bekannten Methoden [9]. Damit nun auch mit dem Spulenmodell ICNIRP Referenzwertbewertungen durchgeführt werden können wurde die WPM Methode in Matlab als Postprocessing Schritt implementiert. Dafür mussten die Grenzwertkurven für die Referenzwerte des magnetischen Feldes der ICNIRP 1998/2010 als digitale Filter $H(f)$ erster Ordnung (Forderung aus [8]) implementiert werden. Der Kehrwert des digitalen

Filters $L(f)$ entspricht dabei der Grenzwertkurve aus den ICNIRP Richtlinien (siehe Gleichung 7).

$$|H(f)| \cong \frac{1}{L(f)} \tag{Gleichung (7)}$$

In den folgenden Abbildungen 11 und 12 sind die Grenzwertkurven für die Referenzwerte des magnetischen Feldes aus den ICNIRP Richtlinien zusammen mit dem Kehrwert $L(f)$ der digitalen Filter $H(f)$ zu ersehen.

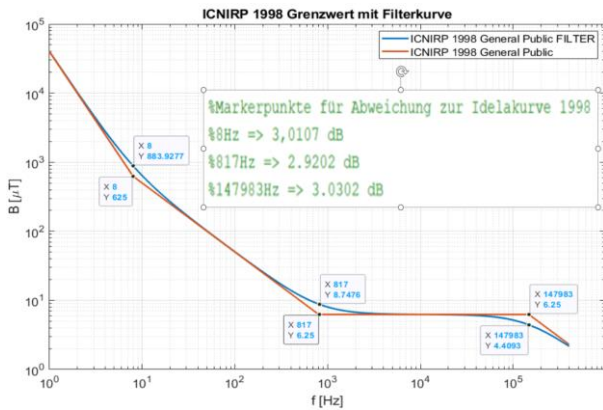


Abbildung 11 Vergleich Grenzwertkurve (rot) mit $L(f)$ (blau) für die ICNIRP 1998

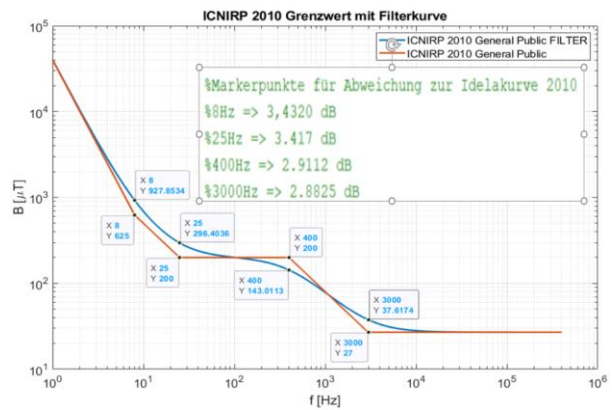


Abbildung 12 Vergleich Grenzwertkurve (rot) mit $L(f)$ (blau) für die ICNIRP 2010

An den Eckfrequenzen der Filter tritt die höchste Abweichung gegenüber dem idealen Grenzwert auf. Diese ist maximal ca. 3,5dB und damit noch im Bereich der maximal zulässigen Abweichungen (siehe [10]). Bei isotropen Magnetfeldsonden muss jede Spule mit dem Bewertungsfiler einzeln betrachtet werden. Man erhält die gewichteten Signale jeder Spule (s_x, s_y, s_z) durch Faltung des Bewertungsfilters $w(t)$ mit dem jeweiligen gemessenen Feld (g_x, g_y, g_z) im Zeitbereich (siehe Gleichungen 8-10).

$$s_x(t) = g_x(t) * w(t) \tag{Gleichung (8)}$$

$$s_y(t) = g_y(t) * w(t) \tag{Gleichung (9)}$$

$$s_z(t) = g_z(t) * w(t) \tag{Gleichung (10)}$$

Anschließend kann mit Gleichung 11 der Exposure Wert EI in Prozent berechnet werden.

$$EI = \max \left(\sqrt{s_x^2(t) + s_y^2(t) + s_z^2(t)} \right) \tag{Gleichung (11)}$$

Für die Validation des Rechenverfahrens wurde derselbe Messaufbau, wie in Abbildung 3 gezeigt, verwendet. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind verschiedene Testsignale in der ersten Spalte, der gemessene Exposure Wert mit der Magnetfeldsonde in der zweiten Spalte, der simulierte bzw. berechnete Exposure Wert mit dem Spulenmodell und Matlab Postprocessing in der dritten Spalte und der über die Gleichung 6 berechnete Exposure Wert in der vierten Spalte, gegenübergestellt.

| Signal | Mess. WPM [%] | Sim. WPM [%] | Sim. (Gl. 6) [%] |
|---------------------------|---------------|--------------|------------------|
| Sinus 500Hz | 9 | 8,8 | 11,8 |
| Sinus 50kHz | 14,1 | 13,90 | 13,65 |
| Sinus 5kHz + Sinus 10kHz | 8 | 7,8 | 8,8 |
| Sinus 30kHz + Sinus 80kHz | 2,7 | 2,29 | 2,2 |
| Impuls 100Hz | 7 | 4 | 18,4 |
| Impuls 200Hz | 13,6 | 12,1 | 55,87 |
| PWM 25Hz DC 25% | 175 | 183 | 420 |
| PWM 25Hz DC 50% | 165 | 164 | 345 |
| PWM 1kHz DC 25% | 171 | 179 | 554 |
| PWM 1kHz DC 50% | 151 | 161 | 458 |

Tabelle 2 Gegenüberstellung von gemessenen, simulierten (WPM) und simulierten (Summenformel) Exposure Werte der ICNIRP 1998 für verschiedene Signale

Es ist in Tabelle 2 zu sehen, dass alle simulierten Exposure Werte, welche nach der WPM Methode berechnet wurden (dritte Spalte), sehr gut mit den gemessenen Exposure Werten aus Spalte zwei für alle getesteten Signaltypen (schmalbandig, breitbandig) übereinstimmen. Die simulierten Exposure Werte, welche mit der Summenformel berechnet wurden (vierte Spalte), stimmen nur bei schmalbandigen Signalen (Sinus, Mischsignal mit 2 Sinusanteilen) gut mit den gemessenen Werten überein. Bei breitbandigeren Signalen (Impuls, PWM) ist deutlich zu sehen, dass die Verwendung der Summenformel (Gleichung 6) zu einer deutlichen Überschätzung des Exposure Wertes führt.

4 Zusammenfassung

Die Notwendigkeit für die Modellierung von isotropen Magnetfeldsonden in Simulationsprogramm wurde in Abschnitt 1 aufgezeigt. Im Abschnitt 2 wurde erst unter 2.1. ein Punktrastermodell vorgestellt, welches anschließend für inhomogene Magnetfelder validiert wurde. Da in einem stark inhomogenen Magnetfeld der gemessene Wert stark von der Orientierung der Spulen abhängt und im Kontext der EMV meist der Größte Messwert (Worst Case) von Interesse ist, wurde unter 2.2 ein zweites Modell (Spulenmodell) vorgestellt und die Vorteile aufgezeigt. Die Abweichungen zwischen Messung und Simulation zwischen der falschen und richtigen Orientierung der Spulen wurde in den Abbildungen 9 und 10 gegenübergestellt. Weiterhin wurde im Abschnitt 3 dieses Artikels die WPM Methode vorgestellt und begründet, warum diese der reinen Aufsummationsgleichung (6) vorzuziehen ist. Es wurde gezeigt, dass die definierten digitalen Filter $H(f)$ die Referenzgrenzwerte der ICNIRP Richtlinien hinreichend genau nachbilden (Abbildung 11 und 12). Abschließend wurden in Tabelle 2 die Exposure Werte der Simulation mit Summenformel (Gleichung 6) und der Simulation mit WPM Methode mit den gemessenen Exposure Werten für schmalbandige und breitbandige Signale, verglichen. Die Ergebnisse wurden diskutiert und haben das Spulenmodell erneut validiert.

Literatur

- [1] M. Misakian: "Coil Probe Dimension and Uncertainties During Measurements of Nonuniform ELF Magnetic Fields," *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 98,3, 05 1993, DOI:10.6028/jres.098.024
- [2] M. Misakian and C. Fenimore: "Three-axis coil probe dimensions and uncertainties during measurement of nonuniform magnetic fields," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 99, 05 1994, DOI:10.6028/jres.099.020
- [3] M. Messer and M. Kuhn, "Advanced Modeling of an isotropic Three-Axis magnetic field probe using coils and a near field source approach," *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Barcelona, Spain, 2019, pp. 173-178, DOI:10.1109/EMCEurope.2019.8872100
- [4] Narda Safety Test Solutions GmbH, "Bedienungsanleitung: ELT-400"
- [5] Narda Safety Test Solutions GmbH, "ELT400 Datasheet"
- [6] M. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB*, Third Edition. Taylor & Francis, 2009.
- [7] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)", 1998
- [8] DIN EN 62311, „Bewertung von elektrischen und elektronischen Einrichtungen in Bezug auf Begrenzungen der Exposition von Personen in elektromagnetischen Feldern (0Hz bis 300GHz)“
- [9] Helmut Keller, "The Weighted Peak Method in the Time Domain compared with alternative Methods for assessing LF electric and magnetic fields." *Health Physics* July 2017, DOI: 10.1097/HP.0000000000000667
- [10] ICNIRP, "Guidance on determining compliance of exposure to pulsed fields and complex nonsinusoidal waveforms below 100kHz with ICNIRP Guidelines", 2003, DOI:10.1097/00004032-200303000-00016