Vorhersage von CISPR 25 Antennenmessergebnissen unter 30 MHz auf Basis von Nahfeldmessdaten

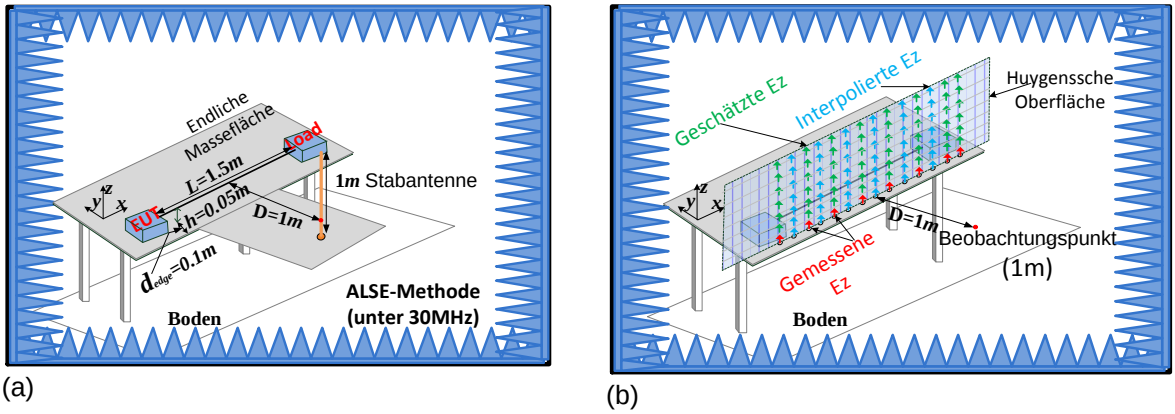
Zongyi Chen, TU Dortmund, zongyi.chen@tu-dortmund.de
Denis Rinas, TU Dortmund, denis.rinas@tu-dortmund.de
Stephan Frei, TU Dortmund, stephan.frei@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Kfz-Komponenten müssen Emissionsprüfungen bestehen, bevor sie auf den Markt kommen. Im Kfz-Umfeld wird oft die Antennenmessung nach CISPR-25 [1] verwendet. Ein typischer Testaufbau für die Frequenz unterhalb von 30 MHz wird in Abbildung 1.1(a) gezeigt. Dieser besteht aus einem metallischen Tisch und einem 1,5 langen Kabelbündel, welches das EUT mit der Peripherie zum Betrieb verbindet, und einer Empfangsantenne (1 m Stabantenne). Die Antenne wird in 1 m Abstand zum Zentrum des Kabelbündels platziert und ist aufgrund des Impedanzwandlers im Fußpunkt besonders gegenüber E-Feldern empfindlich. Der Test wird in einer geschirmten Absorberkammer durchgeführt, die sehr teuer und platzaufwendig ist und nicht immer in allen Laboren und Unternehmen zu Verfügung steht. Alternativen werden in [2-6] diskutiert. In [2] wird ein SPICE-Modell zur Berechnung von Strömen in der Konfiguration vorgestellt. Die ermittelten Ströme werden für ein Dipolabstrahlmodell verwendet. Damit ist die Vorhersage von Feldmaxima in einem Frequenzbereich zwischen 60 MHz bis 1 GHz möglich. Jedoch funktioniert diese Methode nicht zuverlässig unterhalb von 60 MHz. In [3, 5, 6] wird ein Strom-Scan basiertes Verfahren vorgestellt, welches mittels einer Stromsonde an verschiedenen Positionen entlang eines Kabelbündels die Stromverteilung aufnimmt und mit einem Multi-Dipolmodell Emissionen von 30 MHz bis 1 GHz vorhersagt. Bei niedrigen Frequenzen ist das Verfahren sehr empfindlich gegenüber der Phasenverteilung im Kabel [6].

Zur Lösung dieses Problems wird in dieser Arbeit eine alternative Methode zur Emissionsvorhersage auf Basis von Nahfeld-Messungen vorgeschlagen. Nahfeld-Messungen sind nur geringfügig durch die Messumgebung beeinflusst und minimieren die Einkopplung von benachbarten strahlenden Strukturen. Sie stellen außerdem mehr Informationen über die zu untersuchende Struktur zur Verfügung.

In [7] und [8] wurde das Huygenssche Prinzip theoretisch für einen CISPR-25 Testaufbau durch Verwendung einer geschlossenen Huygens Oberfläche angewendet. Im Unterschied dazu verwendet das hier vorgeschlagene Verfahren eine nicht geschlossene Huygenssche Oberfläche (Abbildung 1.1(b)). Das vertikale elektrische Feld (E_z) wird an mehreren Punkten mit einer E-Feldsonde entlang der Randlinie der Huygensschen Oberfläche gemessen, die den Abschluss zu dem leitfähigen Messtisch bildet. Die entlang der Randlinie gemessenen Feldwerte werden in Verbindung mit bekannten Verteilungsfunktionen zur Abschätzung von E_z auf der gesamten Huygensfläche verwendet. Das E-Feld in 1 m Abstand wird dann durch Verwendung des berechneten Flächenstroms bestimmt.



(a) (b)

Abbildung 1.1: (a) CISPR-25 (ALSE - Methode), (b) Auf Nahfeldmessungen basierende Methode

2 Anwendung des Huygensschen Prinzips auf einen CISPR 25 Testaufbau

Das vorgeschlagene Verfahren basiert auf dem Huygensschen Prinzip, welches im Folgenden kurz vorgestellt wird. Die Größe und Diskretisierung einer entsprechenden Huygensschen Oberfläche werden definiert.

2.1 Huygenssches Prinzip

Das Huygenssche Prinzip ist auch als Oberflächen-Äquivalenztheorem [9] bekannt. Es wird eine geschlossene imaginäre Fläche als Huygenssche Oberfläche definiert, welche eine strahlende Struktur umschließt. Die Felder, die von dieser strahlenden Struktur ausgehen, können durch Felder der entsprechenden Flächenströme (elektrischer Strom $\overrightarrow{J_S}$ und magnetischer Strom $\overrightarrow{M_S}$) auf der definierten Huygensschen Oberfläche ersetzt werden. Dies gilt jedoch nur für die Felder außerhalb der Huygensschen Oberfläche. Der Raum innerhalb der Oberfläche ist feldfrei.

2.2 Definition einer geeigneten nicht geschlossenen Huygensschen Oberfläche

In [7, 8] wurde das Huygenssche Prinzip in einer Simulation hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für CISPR-25 Aufbauten theoretisch untersucht. Jedoch existiert, aufgrund der Schwierigkeit, die elektrische und magnetische Feldverteilung auf einer Huygensschen Oberfläche zu bestimmen, keine praktische Realisierung. Als besonders problematisch erweist sich hier das elektrische Feld, das im Freiraum nicht genau gemessen werden kann, aber für eine Vorhersage der Antennenmessergebnisse sehr wichtig ist.

Für Voruntersuchungen zur notwendigen Diskretisierung und der Beschaffenheit der Huygens-Fläche wird ein vereinfachtes Modell des Aufbaus für das auf der Momentenmethode (MoM) basierende Simulationstool CONCEPT-II [10] erstellt (Abbildung 2.1(a)). Das Kabelbündel wird durch eine 1,5 m lange Einzelleitung ersetzt, die in einer Höhe von 5 cm verläuft. Die Massefläche wird zunächst als unendlich ausgedehnt betrachtet. Die Quellspannung beträgt $V_S = 1\,V$, die Quellimpedanz ist

$Z_s = 50\ \Omega$ und die Lastimpedanz beträgt $Z_L = 50\ \Omega$. Der Beobachtungspunkt P liegt bei [0,75, -1, 0,05] m. Abbildung 2.1(b) zeigt die gewählte nicht geschlossene Huygenssche Oberfläche (Huy_L = 3 m, Huy_W = 1 m). Die Huygenssche Fläche ist parallel zur XY-Ebene und wird vor dem Kabelmodell in 5 cm Abstand angenommen. Der Fußpunkt der Huygensschen Oberfläche liegt in der Massefläche. Abbildung 2.1(c) zeigt den Vergleich der z-Komponente des elektrischen Feldes E_z im Beobachtungspunkt P, zwischen der Berechnung mittels Flächenströmen auf der Huygensschen Oberfläche und der direkten MoM-Simulation.

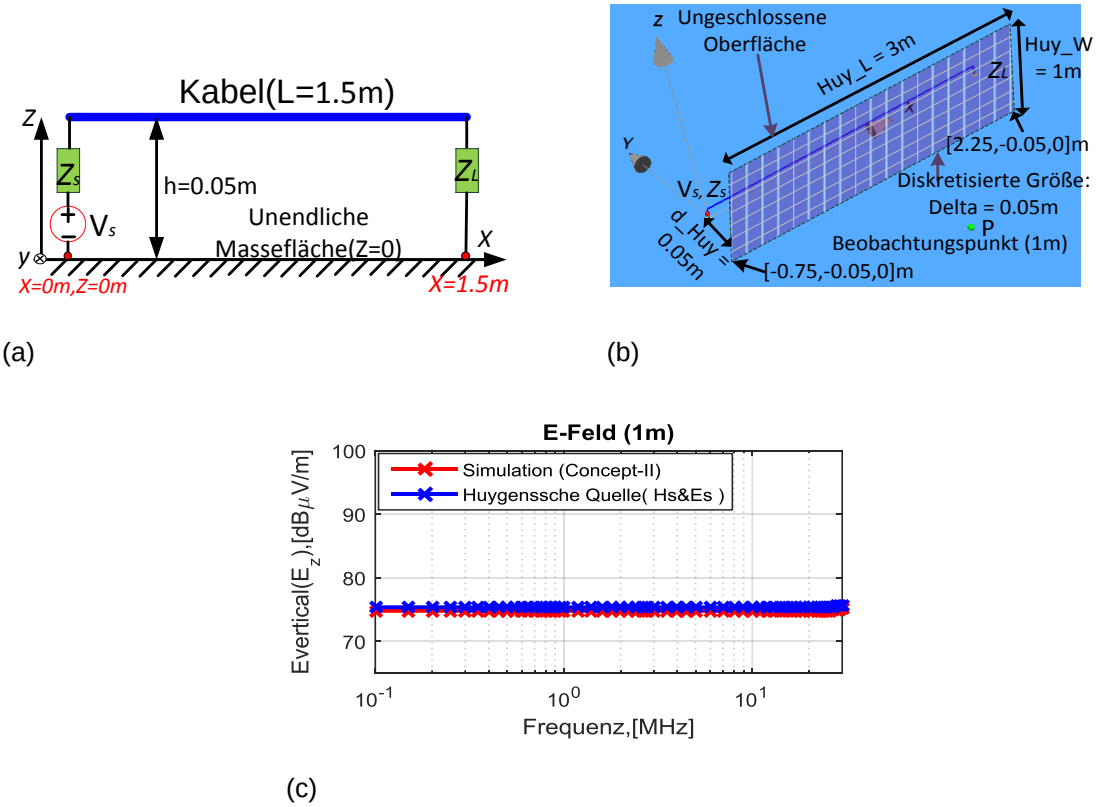


Abbildung 2.1: (a) Simulationsmodell, (b) Definierte Huygenssche Oberfläche, (c) Vergleich des elektrischen Feldes am Beobachtungspunkt (Simulation und Huygenssche Quelle)

Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse sehr gut übereinstimmen, und die nicht geschlossene Huygenssche Oberfläche verwendet werden kann.

Die Feldkomponenten auf der definierten Huygensschen Fläche sind E_X, E_z, H_x und H_z. Die E_x Komponente wird nicht beachtet, da das Kabel parallel zur x-Achse orientiert ist, und das Feld in E_x-Richtung sehr schwach und damit zu vernachlässigen ist. Um den Beitrag verschiedener Feldkomponenten zu untersuchen, wird die Abschlussimpedanz Z_L variiert. Die Ergebnisse für E_z am Beobachtungspunkt P werden in Abbildung 2.2(a)-(c) gezeigt, wo Z_L die Werte 10 Ω, 50 Ω und 10 MΩ hat. E_z (blaue Kurve) und H_x (türkisene Kurve) erzeugen die wesentlichen Beiträge zum Feld

in Punkt P, der Beitrag von H_z ist geringer. E_z ist die dominierende Komponente, unabhängig von der Variation von Z_L. Somit reicht es, E_z unter Verwendung eines Feldsensor zur messen. H_x und H_z liefern keine nennenswerten Beiträge.

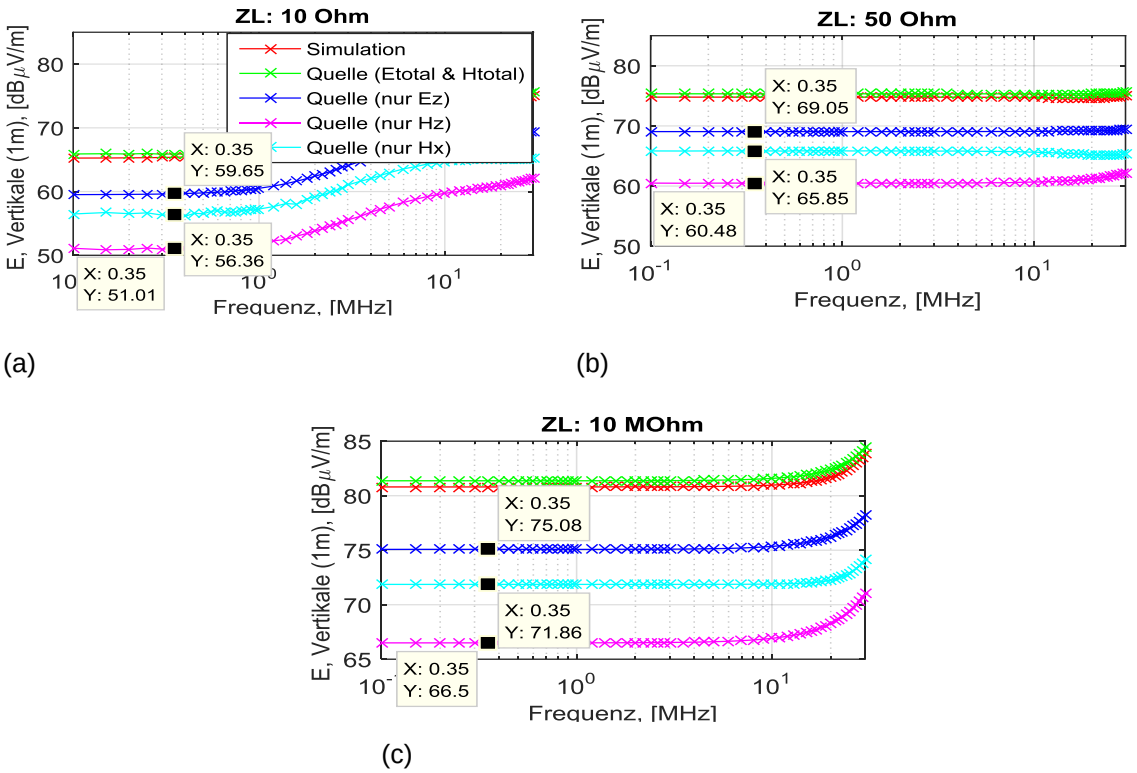


Abbildung 2.2: Feldbeitrag aus verschiedenen Feldkomponenten für verschiedene Lastimpedanzen

3 Funktionsapproximation zur Berechnung von E_z entlang der Huygensschen Oberfläche

Da E_z auf der Huygensschen Oberfläche das Feld am Beobachtungspunkt P dominiert, jedoch die Messung im freien Raum mit Schwierigkeiten verbunden ist, wird E_z nur auf der Tischoberfläche gemessen. Um E_z auch oberhalb der Tischoberfläche zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass die Feldverteilung im Wesentlichen durch die festgelegte Kabel- und Tischgeometrie definiert wird und somit für einen normgerechten Aufbau immer den gleichen ortsabhängigen Verlauf aufweist. Die Lage des Maximums variiert nur. Die Lage des Maximums wird durch den Wert bestimmt, der direkt auf dem Metalltisch zuverlässig gemessen werden kann. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden durch Simulationen belegt.

Die Feldverteilungen an den Positionen x = 0,25 m, 0,75 m und 1,25 m werden in 3.1(a)-(d) gezeigt. Dabei wurden die Abschlussimpedanzen $Z_L = 50\,\Omega$ und $Z_L = 1000\,\Omega$ sowie die Frequenzen 150 kHz und 30 MHz simuliert. Die Quellenspannung ist $V_s = 1\,V$ und Quellenimpedanz ist $Z_s = 50\,\Omega$. Es wird klar, dass die Verläufe immer sehr ähnlich sind. Die Kurve bei x = 0,75 m (in Abbildung 3.1 (c), blaue Kurve) wird als Standardfeldverteilung, zur Approximation einer Funktion für den grundsätzlichen

Feldverlauf angenommen. Die Ergebnisse der Approximation sind in Abbildung 3.2 (a)-(c) dargestellt.

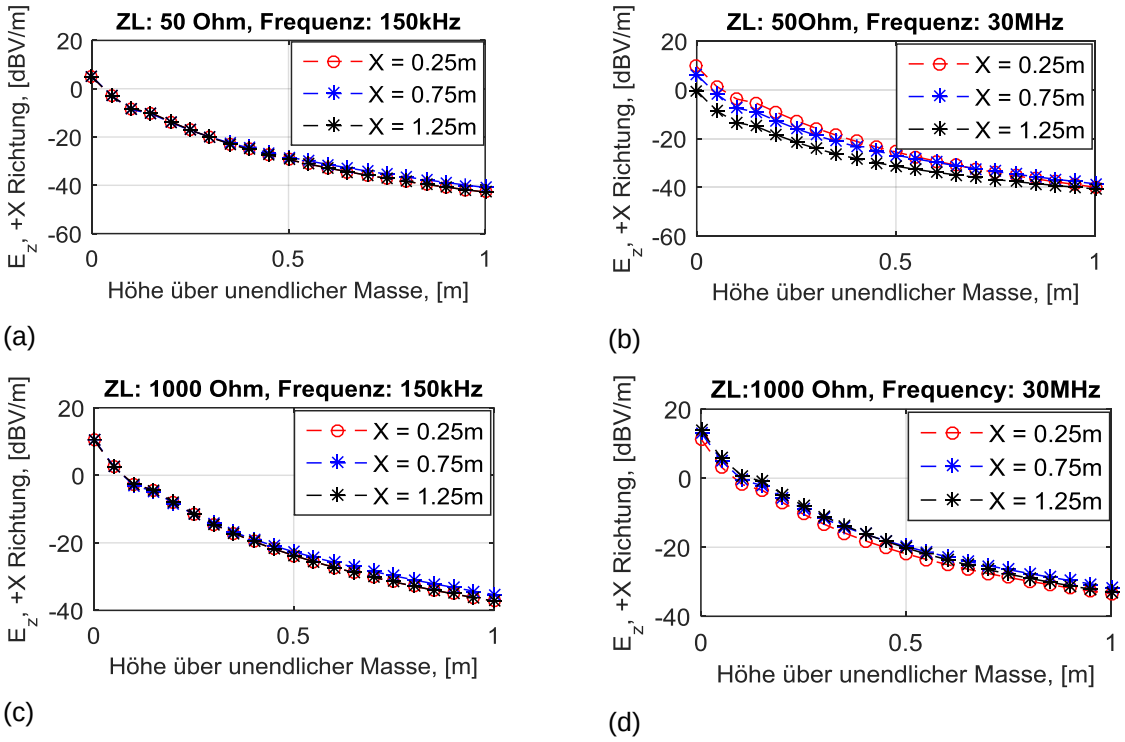


Abbildung 3.1: Simulierte Ez-Verteilung der Lastimpedanzen 50 Ω und 1000 Ω

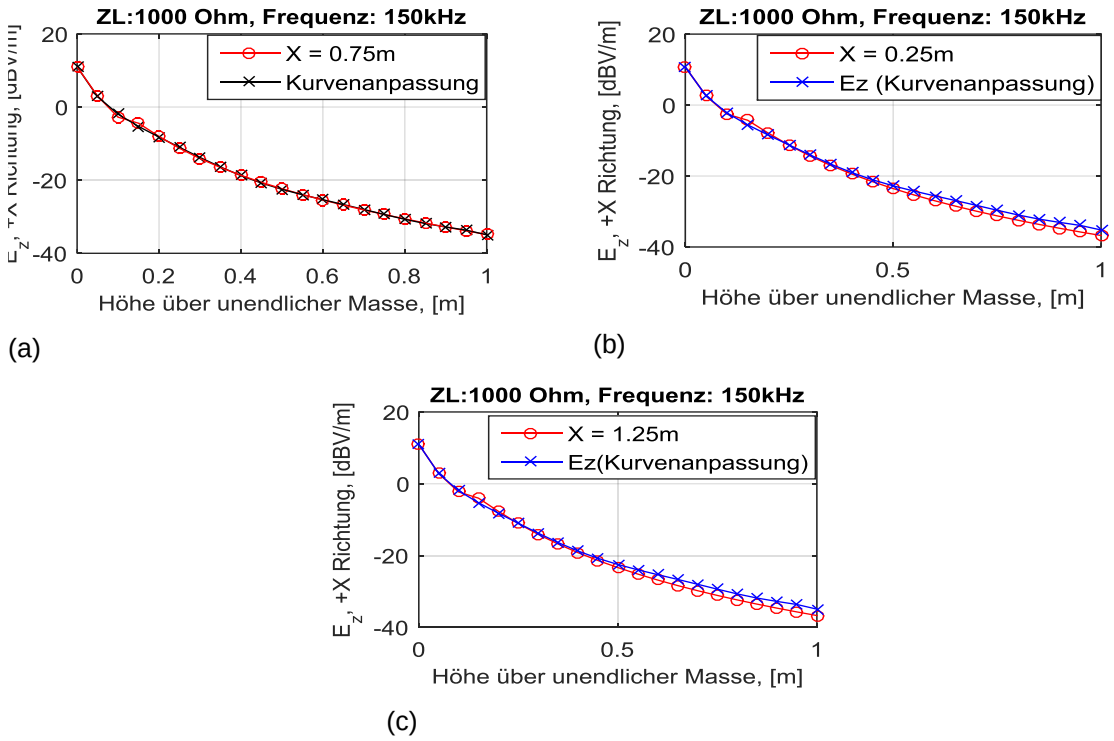


Abbildung 3.2: Polynomanpassung

Die Approximationsergebnisse werden verwendet werden, um die E_z Feldverteilung auf der Huygensschen Fläche auf Basis des Messwerts an der Metalltischoberfläche zu berechnen.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird E_z mit einer Monopolantenne an mehreren Stellen entlang der x-Achse gemessen. In Abschnitt 4.1 wird die gemessene E_z Komponente mit Simulationsergebnissen verglichen. In 4.2 wird die mit dem vorgestellten Verfahren vorhergesagte E_z Feldkomponente am Beobachtungspunkt P mit den Messergebnissen eines 1 m-Stabs und MoM-Simulationsdaten verglichen.

4.1 E_z-Messungen mit der Feldsonde

Ein vereinfachtes Modell für einen CISPR-25 Aufbau ist in Abbildung 4.1(a) gezeigt. In der Simulationskonfiguration beträgt die Quellenspannung $V_s = 1.6\,V$, die Quellenimpedanz $Z_s = 50\,\Omega$ und Lastimpedanz $Z_L = 50\,\Omega$ (Abbildung 4.1(a)). Abbildungen 4.1(b) zeigt den Messaufbau. Die gemessenen E_z-Feldwerte (rot) werden mit den simulierten E_z-Daten in verschiedenen Höhen über der Massefläche verglichen. Für die Frequenz von 150 kHz wird ein Vergleich der Mess- mit den Simulationsdaten in Abbildung 4.1(c) gegeben. Für die Frequenz von 30 MHz ist das Ergebnis in Abbildung 4.1(d) dargestellt.

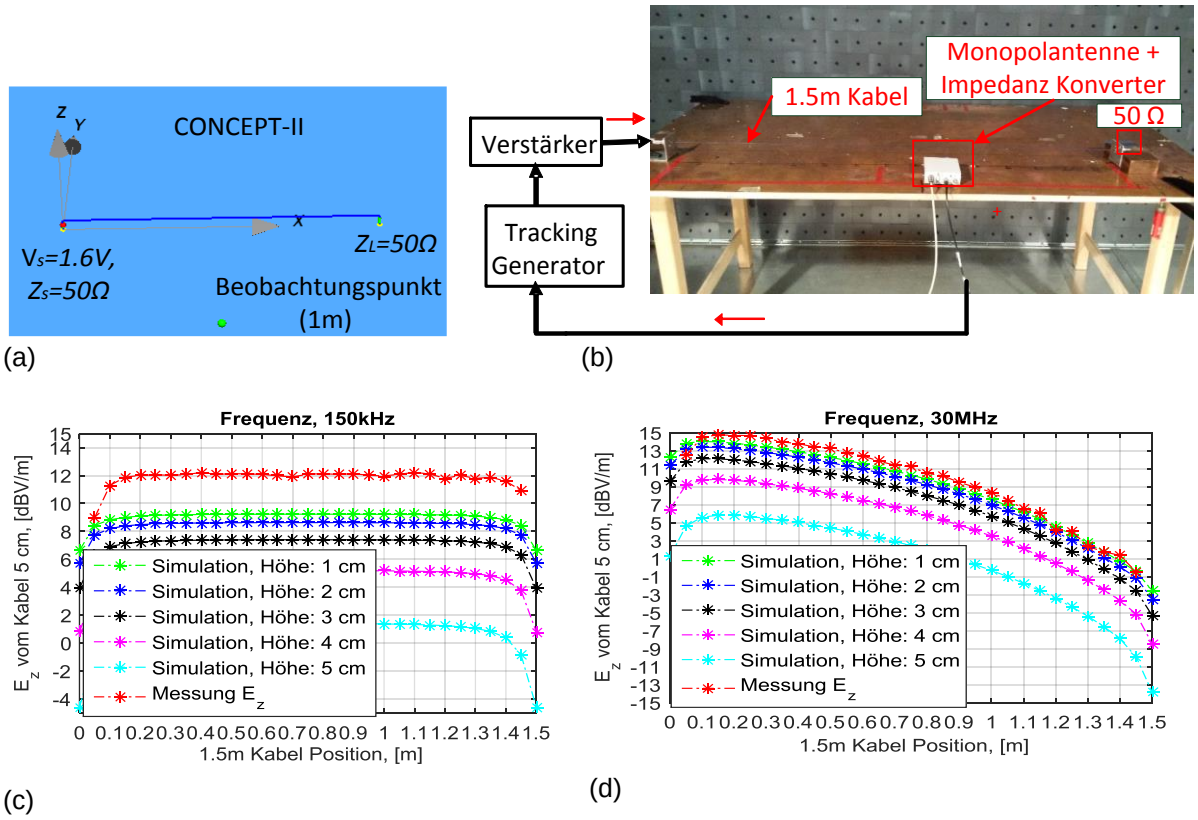
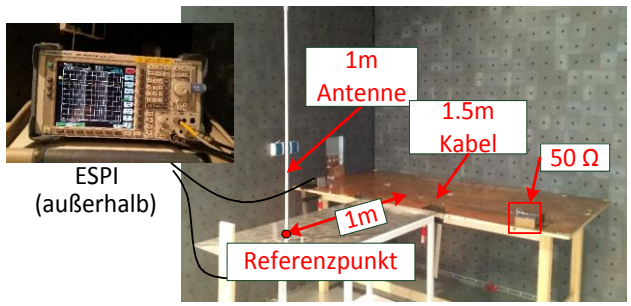


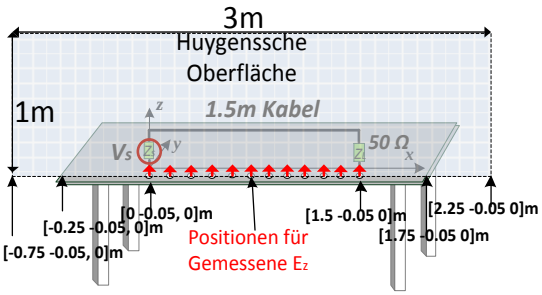
Abbildung 4.1: (a) Simulationsmodell, (b) Testaufbau, (c)-(d) Vergleich von Simulationen und Messungen

4.2 E-Feld im Abstand von 1 m

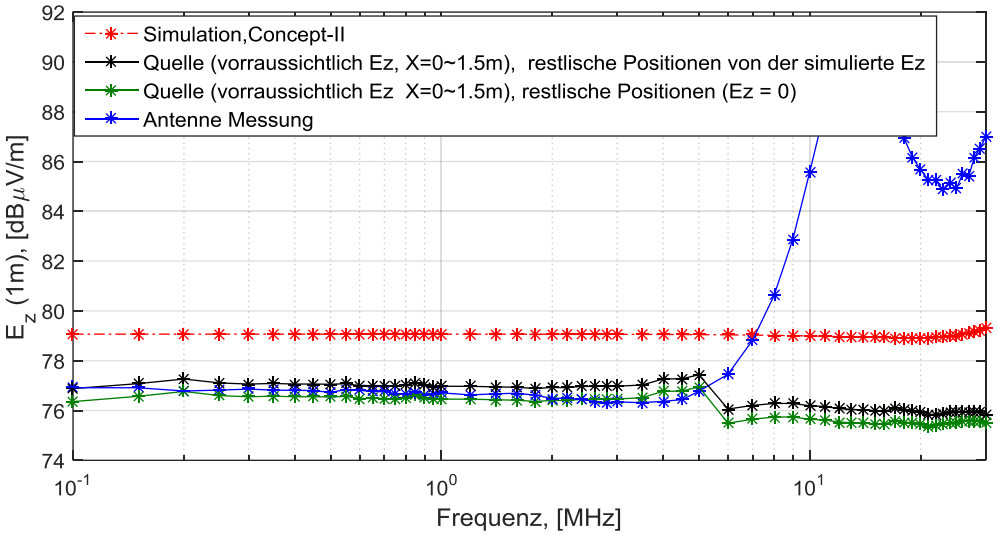
Der Versuchsaufbau ach CISPR-25 wird in Abbildung 4.2(a) gezeigt. Die Huygenssche Oberfläche zeigt Abbildung 4.2(b). Abbildung 4.2(c) zeigt den Vergleich von E_z im Abstand von 1 m zwischen der Simulation, der Antennenmessung und dem aus den Nahfeldmessungen vorhergesagten Feld. Für Frequenzen unterhalb von 6 MHz wird gezeigt, dass hier eine Abweichung von nur ca. 3 dB im Vergleich zur Messung vorliegt. Oberhalb von 6 MHz wird die Abweichung größer, dies ist durch die Kopplung zwischen dem Kammerboden und dem Metalltisch begründet und allgemein ein Problem des Messverfahrens. Die schwarze Kurve ergibt sich aus der Messung von E_z an den Positionen zwischen x = 0,05 m und x = 1,45 m (in Abbildung 4.2(b)) und einer Approximation für die Zwischenwerte.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.2: (a) Der Testaufbau für die Antennenmessung, (b) Definierte Huygenssche Oberfläche, (c) Der Vergleich des E-Feldes im Abstand 1 m

5 Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt ein neues Messverfahren zur Vorhersage der gemessenen Störfelder nach CISPR-25 unterhalb von 30 MHz vor. Hierfür werden lediglich einige einfache Nahfeldmessungen benötigt. Eine große geschirmte Kabine ist nicht

erforderlich. Das Verfahren basiert auf dem Huygensschen Prinzip und nutzt eine offene Huygenssche Oberfläche. Das vorhergesagte E-Feld im Abstand von 1 m stimmt mit dem Standardantennenmessergebnis gut überein.

Literaturverzeichnis

[1] *CISPR 25 Ed.3, „Vehicles, boats and internal combustion engines-Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurements for the protection of on-board receivers", 2015.*

[2] G. Li, W. Qian, A. Radchenko, J. He, G. Hess, R. Hoeckele, T. Doren, D. Pommerenke, and D. Beetner, "Prediction of radiated emissions from cables over a metal plane using a SPICE model," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.,* 2014.

[3] J. Jia, D. Rinas, S. Frei, "Prediction of radiated fields from cable bundles based on current distribution measurements," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.,* pp. 1-7, September 2012.

[4] H. Rebholz, S. Tenbohlen: "A fast radiated emission model for arbitrary cable harness configurations based on measurements and simulations," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.,* pp.1-5, August 2008.

[5] S. Daniel, M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen, W. Kohler. "Radiated emissions of an electric drive system estimated on a bench using disturbance currents and transfer Functions," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.,* vol. 57, no. 3, pp. 311-321, June 2015.

[6] J. Jia, „Current Scan Methods to Predict Radiated Emissions of Automotive Components According to CISPR 25,'' Ph.D. dissertation, Arbeitsgebiet Bordsysteme, TU Dortmund, Dortmund, Germany, 2015.

[7] M. Gonser, C. Keller, J. Hansen, V. Khillkevich, A. Radchenko, D. Pommerenke, and R. Weigel, "Simulation of automotive EMC emission test procedures based on cable bundle measurements," IEEE Int MTT-S, pp. 1-3, 2012.

[8] A. Radchenko, V. Khilkevich, N. Bondarenko, D. Pommerenke, M. Gonser, J. Hansen, and C. Keller, "Transfer function method for predicting the emissions in a CISPR 25 test-setup," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.,* vol. 56, no. 4, pp. 894-902, August 2014.

[9] C. A. Balanis, Advanced Engineering Electromagnetics. NewYork, NY, USA:Wiley, 1989, pp. 329–332.

[10] CONCEPT-II-12.0, Technische Universität Hamburg-Harburg. (2015). [Online]. Available: http://www.tet.tuhh.de/en/concept/.