

# **Bewertungsrisiken bei Störaussendungsmessungen von Prüflingen mit angeschlossenen Leitungen in GTEM-Zellen**

Philipp Wollmann, Dr.-Ing. Moawia Al-Hamid, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick  
Institut für Medizintechnik, O.-v.-G.-Universität Magdeburg, Deutschland

## **1 Einleitung**

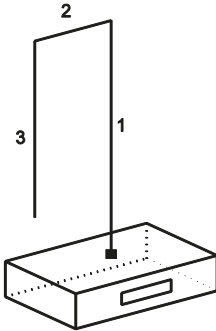
In elektrischen Systemen bilden Kabel Koppelpfade für leitungsgebundene und abgestrahlte Störungen. Als Alternative zur zeitaufwendigen Messung in der Absorberhalle nach [2] kann zur kostengünstigen Ermittlung der abgestrahlten Feldstärke für kleine Prüflinge (EUT) die GTEM-Zelle verwendet werden. Allerdings gilt die Norm IEC 61000-4-20 [1] in ihrer derzeit gültigen Fassung nicht für Prüflinge mit angeschlossenen Kabeln. Die GTEM-Zelle gehört nicht zu den etablierten Messumgebungen. Ein Grund hierfür ist die unterschiedliche Messgröße. Werden in den etablierten Messumgebungen wie OATS oder SAC die Feldstärken gemessen, so wird bei der GTEM-Zelle die Spannung am Zellenport abgegriffen. Die Spannung wird mit Hilfe eines Korrelationsalgorithmus in eine der OATS-Messung äquivalente Feldstärke umgerechnet. Ein weiterer Grund ist der große Prüfling. Als großer Prüfling wird jedes EUT bezeichnet, das entweder zu groß für das Prüfvolumen ist oder ein kleiner Prüfling mit einer oder mehreren Zuleitungen. In diesem Beitrag soll evaluiert werden, ob die GTEM-Zelle trotzdem nützlich ist, um den höchsten Aussendungspegel der internen Störquellen sicher zu erkennen ohne die Korrelationsmethode zu modifizieren. Hierfür wurden sowohl kleine Prüflinge als auch komplexe Prüflinge mit Zuleitungen ausgemessen.

## **2 Verwendete Prüflinge**

Um das Ergebnis dieser Arbeit reproduzierbar und übertragbar zu halten, wurde als Signalquelle der Rauschgenerator CNE III der Firma Schaffner verwendet, der allgemeinüblich als Testquelle verwendet wird, weil er über sein gesamtes Frequenzspektrum eine konstante Leistung liefert. Der CNE III ist ein sogenannter kleiner Prüfling (siehe [1]) der breitbandig von 9 kHz bis 2 GHz sendet. Dies qualifiziert den Rauschgenerator als Referenzquelle für die Charakterisierung und Verifizierung von geleiteten und gestrahlten Testumgebungen. Über seine BNC-Buchse kann der CNE III mit Hilfe von Antennen oder Leitungen seine Leistung an die Umwelt abgeben. Die Signalquelle wurde dann alleinstehend mit einer 80 cm langen und 1 mm dicken Kupferleitung und in einem 19“-Aluminiumgehäusen mit einer herausgeführten 3 mm dicken Kupferleitung vermessen.

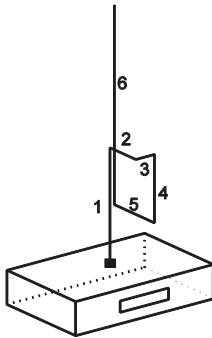
### **2.1 Rauschgenerator mit Leitung**

Bei den ersten beiden verwendeten Konfigurationen dominieren die vertikalen Leitungsanteile, siehe Abbildung 1 und Abbildung 2. Bei den Konfigurationen 3 und 4 wurde darauf geachtet, dass die vertikalen und horizontalen Anteile gleichmäßiger verteilt sind, die längsten Leitungsabschnitte sind auch hier die vertikal verlegten.



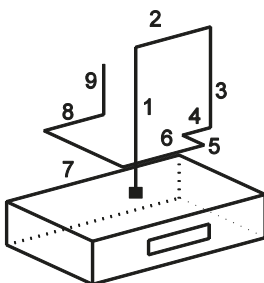
Abschnitt	Länge in cm	Ausrichtung
1	39,5	Vertikal, hoch
2	10	Horizontal, links
3	30	Vertikal, unten

Abbildung 1: Konfiguration 1 mit 1 mm-Kupferleitung (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 1 (rechts)



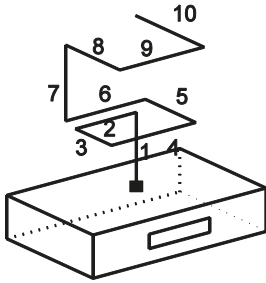
Abschnitt	Länge in cm	Ausrichtung
1	20	Vertikal, hoch
2	4,5	Horizontal, vorne
3	2,5	Horizontal, rechts
4	12	vertikal, unten
5	7	Horizontal, hinten
6	35	vertikal, hoch

Abbildung 2: Konfiguration 2 mit 1 mm-Kupferleitung (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 2 (rechts)



Abschnitt	Länge	Ausrichtung
1	20 cm	Vertikal, hoch
2	8 cm	Horizontal, rechts
3	14 cm	Vertikal, runter
4	3 cm	Horizontal, links
5	3 cm	Horizontal, vorne
6	8,7 cm	Horizontal, links
7	11 cm	Horizontal, hinten
8	5 cm	Horizontal, rechts
9	7 cm	Vertikal, hoch

Abbildung 3: Konfiguration 3 mit 1 mm-Kupferleitung (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 2 (rechts)

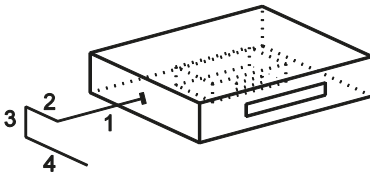


Abschnitt	Länge	Ausrichtung
1	10 cm	Vertikal, hoch
2	6,5 cm	Horizontal, links
3	5 cm	Horizontal, vorne
4	9 cm	Horizontal, rechts
5	7 cm	Horizontal, hinten
6	8,5 cm	Horizontal, links
7	10,5 cm	Vertikal, hoch
8	7,5 cm	Horizontal, vorne
9	9 cm	Horizontal, rechts
10	9,5 cm	Horizontal, hinten

Abbildung 4: Konfiguration 4 mit 1 mm-Kupferleitung (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 2 (rechts)

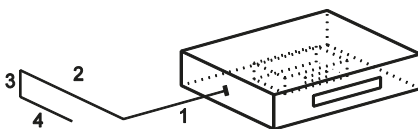
## 2.2 Komplexe Prüflinge mit Leitung

Um den Korrelationsalgorithmus auch für komplexere Strukturen zu testen, wurde der Rauschgenerator für Konfiguration 5 und 6 in 19"-Aluminiumgehäuse gebracht. Die an der BNC-Buchse des CNE III angeschlossene 3 mm-Kupferleitung wurde elektrisch leitend mit dem Gehäuse verbunden und hinausgeführt. Die angeschlossenen Kabelkonfigurationen sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Der Schlitz an der Seite ist keine tatsächliche Öffnung und dient nur zur Orientierung der angeschlossenen Leitungen.



Abschnitt	Länge in cm	Ausrichtung
1	21	Horizontal, links
2	10,5	Horizontal, hinten
3	10	Vertikal, unten
4	20,2	Horizontal, vorne

Abbildung 5: Konfiguration 5 mit 3 mm-Kupferleitung in 19"-Aluminiumgehäuse (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 3 (rechts)



Nr.	Länge in cm	Ausrichtung
1	30	Horizontal, links
2	40	Horizontal, hinten
3	10	Vertikal, unten
4	20	Horizontal, vorne

Abbildung 6: Konfiguration 6 mit 3 mm-Kupferleitung in 19"-Aluminiumgehäuse (links), Tabelle mit Leitungslängen zu Konfiguration 4 (rechts)

### 3 Messung der Störemissionen

Die Störemission dieser Konfigurationen wurde in einem Frequenzbereich von 30MHz bis 1GHz ausgemessen. Parallel zu der 12-Positionen-Messung nach [1] in der GTEM-Zelle 1750 wurden Messungen in der Absorberhalle (SAC) mit identischen Kabelkonfigurationen durchgeführt. Die Messungen in der Absorberhalle wurden in 10m Abstand normgemäß durchgeführt, siehe Abbildung 7. Der Drehteller wurde in 30°-Schritten von 0° bis 330° gedreht. Die Antenne wurde in 30 cm-Schritten von 1 m bis 4 m höhenvariiert. Damit ergaben sich 132 Messpunkte. Mit Hilfe des Korrelationsalgorithmus nach der Norm IEC 61000-4-20 wurden die Daten aus der GTEM-Zelle mit denen der Absorberhalle verglichen.

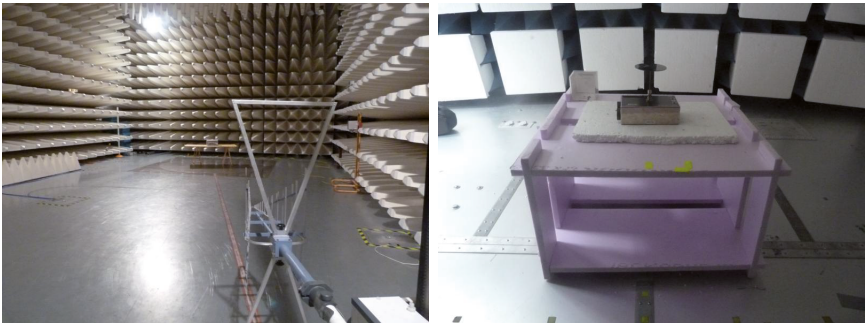


Abbildung 7: Messaufbau in der Absorberhalle für eine Störemissionsmessung (links), Messaufbau in der GTEM-Zelle, (rechts)

#### 3.1 Rauschgenerator mit Leitung

Die ersten Messungen erfolgten für die Konfigurationen mit der 1 mm-Kupferleitung in der GTEM-Zelle. Die Ergebnisse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen für das gleiche Kabel in unterschiedlichen Konfigurationen ab Frequenzen von 150 MHz vermehrt auftreten. Bei 270 MHz weisen Konfiguration 1 und 3 eine fast 20 dB höhere Feldstärke auf als Konfiguration 2 und 4. Die Orientierung der Leitungen hat einen großen Einfluss auf die Abstrahlcharakteristik des Prüflings.

Vertikal verlegte Leitungen werden messtechnisch besser erfasst, da sie stets parallel zur vertikal polarisierten Antenne verlaufen. Die horizontal verlegten Leitungen verlaufen dahingegen teilweise orthogonal zur horizontal polarisierten Antenne. So erzielten vertikal verlegte Leitung höhere Feldstärken bei Messungen. Simulationstechnisch kann aber nachgewiesen werden, dass horizontal verlegte Leitungen die stärkeren Strahler sind [6].

Zur Validierung der korrelierten Ergebnisse, wurden für Konfiguration 1 und 2 die Messungen in Position a1 in der Absorberhalle wiederholt, siehe Abbildung 8. Nach Norm soll die Störemission nur für eine Position des Prüfling gemessen werden.

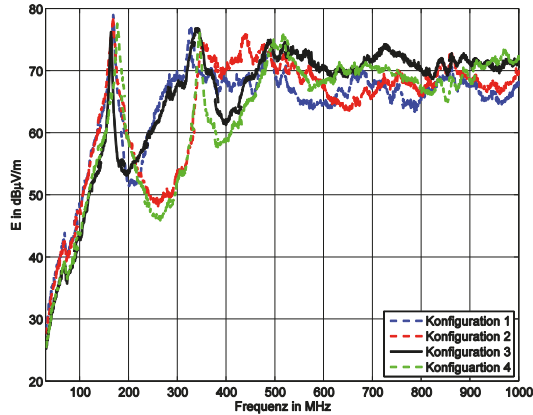


Abbildung 8: Korrelierte Ergebnisse der Konfigurationen 1, 2, 3 und 4

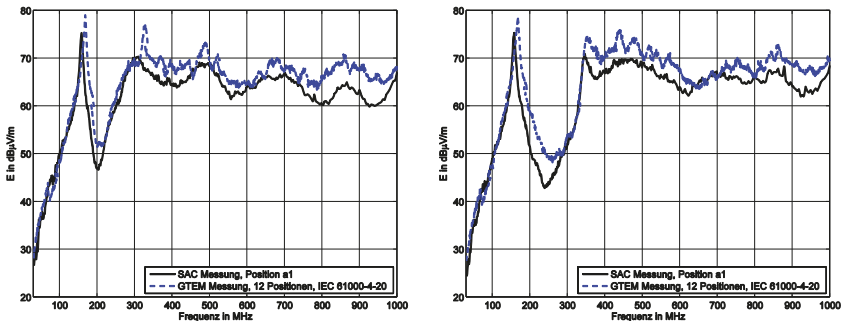


Abbildung 8: Vergleich der Mess- und Korrelationsergebnisse für Konfiguration 1 (links) und 2 (rechts)

Die erste Resonanzerscheinung tritt bei der SAC-Messung für beide Konfigurationen um 5 MHz früher auf als bei den korrelierten Ergebnissen. Bei ungefähr 315 MHz hat die in der GTEM-Zelle gemessene Feldstärke von Konfiguration 1 einen Peak, der in der SAC-Messung nicht sichtbar ist. Die korrelierten Ergebnisse sind gegenüber der SAC-Messung für beide Konfigurationen fast im gesamten Frequenzbereich überbewertet. Es tritt nur eine Unterbewertung von 2 dB auf. Das ist im Frequenzbereich von ca. 67 MHz bis 80 MHz zu sehen. Laut [5] ist die Ursache hierfür die erste Resonanz des H-Modus in der GTEM-Zelle, die bei 62 MHz auftritt. Weder das Widerstandsnetzwerk noch die Wandabsorber haben eine Dämpfungswirkung im Frequenzbereich von 30 bis 100 MHz. Die GTEM-Zellen-Messung kann als validiert angesehen werden, da die Verläufe denen der SAC-Ergebnisse stark ähneln. Zwischen 300 und 350 MHz, sowie von 630 bis 690 MHz sind die beiden Verläufe für Konfiguration 2 deckungsgleich.

### 3.2 Komplexe Prüflinge mit Leitung

Die Ergebnisse der komplexen Prüflinge weichen im Vergleich zu denen ohne Gehäuse erheblich ab. Das 19“-Gehäuse hat einen Einfluss auf die Abstrahlcharakteristik des Prüflings. Die elektrisch leitend mit dem Gehäuse verbundene Leitung sorgt dafür dass ein Teil der abgegebenen Leistung über das Gehäuse abgestrahlt wird. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen für Konfiguration 5 und 6 dargestellt. Es sind starke Abweichungen zwischen den Ergebnisse der jeweiligen Messumgebung zu sehen. Die starken Resonanzen der SAC-Messung werden nur minimal durch die stark überbewertete GTEM-Zellen-Messung widerspiegelt. Der Verlauf der korrelierten GTEM-Zellen-Ergebnisse ähnelt dem eines Monopols. Die Messung in der GTEM-Zelle legt damit nahe, dass der Prüfling ein nahezu isotroper Strahler ist. Das könnte mit der Geometrie der GTEM-Zelle zusammenhängen, bei welcher durch die leitenden Flächen viele Reflexionen auftreten. Hierfür spricht, dass die meisten in der Absorberhalle gemessenen Resonanzen auch in der GTEM-Zelle auftreten, durch die über den gesamten Frequenzbereich hohe Feldstärke jedoch stark abgeschwächt werden.

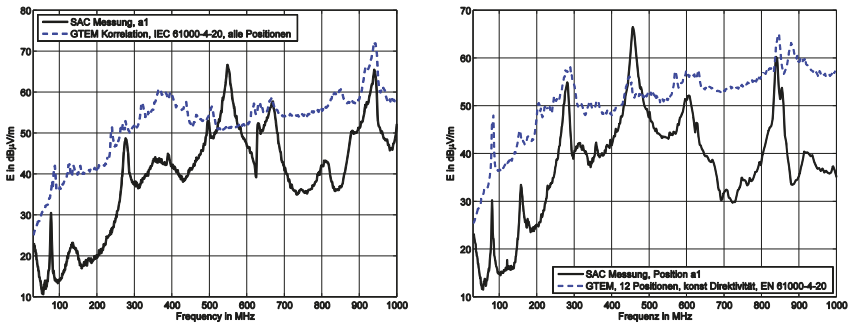


Abbildung 9: Vergleich der Mess- und Korrelationsergebnisse für Konfiguration 5 (links) und 6 (rechts)

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Feldstärken deutlich niedrigere Werte erreichen als die der übrigen Prüflinge. Die aus der GTEM-Zelle korrelierten Ergebnisse sind teilweise mit mehr als 20 dB überbewertet. Bei 550 MHz hat die Messung für Konfiguration 5 in der SAC eine Resonanz, die in der GTEM-Zelle nicht gemessen wurde. Dadurch ist die Amplitude der korrelierten Feldstärke mit 15 dB deutlich unterbewertet. Eine Unterbewertung der korrelierten Ergebnisse ist zu vermeiden, da sonst nicht garantiert werden kann, dass sie alle Strahlungsspitzen verlässlich liefert und somit der geforderte Grenzwert eingehalten werden kann. Eine zu starke Überbewertung, wie hier, kann dazu führen, dass ein Prüfling stärker störungsarm gemacht wird als nötig, um die geforderten Grenzwerte einzuhalten. Das hätte unnötige Kosten zur Folge. Konfiguration 6 weist eine Unterbewertung von 13 dB der korrelierten Ergebnisse im Peak bei 450 MHz auf. Diese Resonanzerscheinung wird bei den korrelierten GTEM-Zellen-Ergebnissen zumindest angedeutet.

Durch unterschiedliche Geometrie und variable Materialien existieren Prüflinge mit den unterschiedlichsten Abstrahlcharakteristika. Zusätzlich existieren unbegrenzte Konfigurationsmöglichkeiten für Zuleitungen. Leitungstechnisch ist zu beachten, dass längere Leitungen früher in Resonanz gehen und häufige Knicke der Leitung die Resonanzen im höheren Frequenzbereich vermehren. Für komplexe Prüflinge gilt dies allerdings nicht. Da es von wirtschaftlichem Interesse ist, muss also über praktikable Alternativen zu [1] nachgedacht werden, weil auch Schlitze und Öffnungen im Gehäuse dazu führen, dass die Abstrahlcharakteristik eines Prüflings verändert wird. Ein Ansatz ist eine Modifikation des Positionierungsverfahrens des Prüflings. Das in der Norm [1] vorgeschlagene 3- beziehungsweise 12-Positionen-Verfahren ist nicht dafür ausgelegt alle Strahlungskeulen eines komplexen Prüflings zu erfassen. Um dieses Problem zu lösen, wurde in [3] einen ergänzenden Einsatz von Nahfeldmessung vorgeschlagen. Die Positionen stärkster Abstrahlung werden über eine Nahfeldmessung ermittelt und zusätzlich zu den bisherigen Positionen in der GTEM-Zelle mit ausgemessenen. Weiterhin wird in [4] gezeigt, dass zwei der 12 Positionen aus [1] redundant sind. Mit Hilfe eines neuen Verfahrens zur Positionsermittlung wurde in [4] einen Satz an 12 nicht redundanten Positionen ermittelt. Eine weitere Möglichkeit bietet der Einsatz einer variablen Direktivität [3]. Diese wird im nächsten Abschnitt weiter untersucht.

#### 4 Simulation

Um eine Überbewertung der korrelierten Ergebnisse für nicht komplexe Prüflinge über den gesamten Frequenzbereich zu gewährleisten eignet sich der Einsatz einer variablen Direktivität. In [1] wird mit einer festen Direktivität von 3 gerechnet. In [3] wurde gezeigt, dass das frequenzabhängige Maximum der Direktivität bis 1 GHz auf Werte über 20 steigen kann und selbst für niedrige Frequenzen nie unter 3 fällt. Zur Ermittlung der frequenzabhängigen Direktivität wurde im Zuge dieser Arbeit die Störaussendung des modellierten Prüflings in Konfiguration 2 auf einer unendlich ausgedehnten Bodenplatte mit Hilfe des Programmtools CONCEPT II simuliert [6].

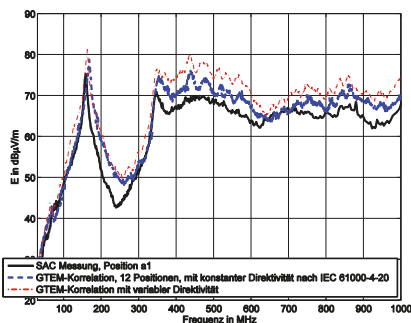
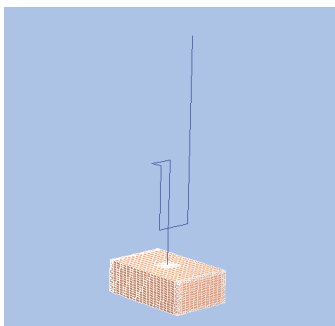


Abbildung 10: Simulationsmodell für Konfiguration 2 (links), Vergleich der SAC-Messung mit den korrelierten Ergebnissen mit unterschiedlichen Direktivitätswerten für Konfiguration 2 (rechts)

Das korrelierte Ergebnis mit der frequenzabhängigen Direktivität ist in Abbildung 10 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verwendung einer variablen Direktivität die Korrelationsergebnisse noch stärker überbewertet. Auch die beiden Frequenzbänder von 300 bis 350 MHz und von 630 bis 690 MHz sind jetzt überbewertet. Der Einsatz einer frequenzabhängigen Direktivität ist somit nützlich.

Über das validierte Simulationsmodell können weiterhin die Abstrahlcharakteristik des Prüflings und der Feldstärkeverlauf über der Frequenz ermittelt werden. So könnte eine mögliche Nahfeldmessung zur Positionsermittlung entfallen. Mithilfe der Simulation können weitere neue Kabelverlegungen kostengünstig und zeitabwendig untersucht werden. Dadurch können auch weitere wichtige Eigenschaften des Prüflings, wie die Strahlungscharakteristika und die Direktivität, ermittelt werden.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, inwiefern die in [1] dargestellte Korrelationsmethode auch auf Prüflinge mit Zuleitungen risikofrei anwendbar ist. Kleine Prüflinge ohne Diskontinuitäten an der Oberfläche liefern in der GTEM-Zelle sichere Ergebnisse, auch wenn Zuleitungen angeschlossen sind. Eine variable Direktivität kann diese Ergebnisse weiter verbessern. Die Messergebnisse komplexer Prüflinge legen nahe, dass die GTEM-Zelle ohne Modifizierung des Korrelationsalgorithmus nicht dazu genutzt werden kann, kostengünstige Messungen zum Auffinden der Störquellen durchzuführen. Die teils starken Überbewertungen von 20dB bedürfen nicht zwangsläufig einer Unterdrückung, da die Grenzwerte für die Absorberhallenmessung unter Umständen nicht überschritten werden. Damit ist die Absorberhalle als Messumgebung für komplexe Prüflinge mit den jetzigen Möglichkeiten nicht zu umgehen.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN 61000-4-20, Prüf- und Messverfahren – Messungen der Störaussendung und Störfestigkeit in transversal elektromagnetischen TEM-Wellenleitern (IEC 61000-4-20:2003+A1:2006)
- [2] DIN EN 55016-2-3: "Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit", Teil 2-3: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung, Ausgabe März 2008
- [3] Al-Hamid, Schulze, Leone, "Verbesserung der Korrelation zwischen GTEM-Zelle und Absorberhalle durch Nahfeldmessung", EMV Düsseldorf 2014
- [4] Hamann, D., Charakterisierung komplexer Systeme in GTEM-Zellen, Sierke Verlag, 2014
- [5] Al-Hamid, M., et al., Untersuchung der Korrelation zwischen SAC und GTEM-Zelle anhand von Simulationen und Messungen an einem einfachen Prüfling, Konferenzband EMV 2012, Düsseldorf, März 2012
- [6] Wollmann, Einfluss der Kabelverlegung auf die Störemission in der GTEM-Zelle verglichen mit der Störemission in der Absorberhalle, Magdeburg, 2015