

Qualifikation von TEM Wellenleitern

Eine statistische Analyse

Dipl.-Ing. David Hamann, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik,
Leibniz Universität Hannover, FG Elektromagnetische Verträglichkeit
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik,
Leibniz Universität Hannover, FG Elektromagnetische Verträglichkeit
M.Sc. May-Britt Konerding, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik,
Leibniz Universität Hannover, FG Elektromagnetische Verträglichkeit
Dipl.-Ing. Uwe Karsten, Teseq GmbH, Kalibrier- und Prüflabor

1. Einleitung

Transversal elektromagnetische (TEM-) Wellenleiter haben sich als kostengünstige und platzsparende Alternative für die Messung der gestrahlten Störaussendung und Störfestigkeit etabliert. Die DIN EN 61000-4-20 [1] (im Folgenden als Standard bezeichnet) beschreibt ihre Anwendung und die erforderlichen Nachweise zur Eignung eines TEM-Wellenleiters. Geometriebedingt entspricht die elektromagnetische Verkopplung zwischen Prüfling und Zellenport Messungen im Fernfeld einer Antenne. Der Nachweis dieser Verkopplung erfolgt durch räumliche Messung der elektrischen Feldstärke im Prüfvolumen des Wellenleiters und durch die Ermittlung von daraus berechenbaren Güteziiffern für die Feldhomogenität sowie die Dominanz des TEM-Modus. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Feldverteilung im Prüfvolumen von verschiedenen TEM-Wellenleitern messtechnisch, simulativ und analytisch untersucht. Die so gewonnenen Daten werden einer statistischen Analyse und Auswertung unterzogen. Es wird ein Verfahren zur Qualifikation von TEM Wellenleitern hergeleitet und auf seine Sensitivität hin untersucht.

1.1 Problemstellung und bisherige Lösungsansätze

Um mit TEM Wellenleitern das Fernfeld einer Antenne nachbilden zu können, müssen vor allem zwei Bedingungen erfüllt sein:

- I. Das elektromagnetische Feld im Prüfvolumen muss homogen sein.
- II. Das elektromagnetische Feld muss rein transversal sein. E-Feld, H-Feld und Poyntingscher Vektor haben also ein Orthogonalsystem zu bilden und der Imaginäranteil des komplexen Poyntingscher Vektors muss Null sein.

Diese Bedingungen stellen einen immer nur angenäherten Idealfall dar. In der Praxis werden für den Nachweis der hinreichend idealen Feldbedingungen zwei Kriterien ausgewertet: Zum Ersten wird die so genannte primäre Komponente der elektrischen Feldstärke auf ihre Homogenität hin untersucht, zum Zweiten wird das Verhältnis der primären und der nächstgrößeren Komponente der elektrischen Feldstärke betrachtet. Diese sekundäre Komponente kann eine unerwünschte oder aber eine durch höhere Moden hervorgerufene Komponente in Ausbreitungsrichtung des elektromagnetischen

Feldes sein. Gemäß Standard werden die drei Komponenten der elektrischen Feldstärke in einer Ebene im Prüfvolumen vermessen. In der ersten Edition des Standards wurden die Feldkomponenten einem zweistufigen Vergleich mit festen Grenzwerten unterzogen. Zunächst musste die sekundäre Komponente in 75 % der vermessenen Punkte mindestens 6 dB unter der primären Komponente liegen. Dieser als Nachweis des TEM Modes bezeichneten Untersuchung folgte dann der Nachweis der Feldhomogenität. Die primäre Komponente der elektrischen Feldstärke in den nach der ersten Prüfung verbliebenen 75 % der Kalibrierpunkte mussten in einem Band von 6 dB liegen. Für eine festgelegte Anzahl von Frequenzen waren höhere Abweichungen zulässig, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird. Dieser erste Ansatz führte jedoch dazu, dass bis zu 25 % der Prüfpunkte bei der Validierung des TEM Wellenleiters nicht berücksichtigt wurden. Daher wird in der zweiten Edition des Standards ein statistischer Ansatz verwendet, in den alle gemessenen Feldstärkewerte eingehen. Unter Annahme von Normalverteilung wird eine Standardabweichung der primären Komponente gefordert, die kleiner als 2,61 dB ist. Statistisch gesehen erfüllen dann 75 % der gemessenen Werte das 6-dB-Kriterium aus Edition 1. Weiterhin wird in Annex B ein statistischer Ansatz für den Nachweis des TEM-Modes beschrieben. Auch hier wird eine Normalverteilung angenommen und darauf aufbauend gefordert, dass die obere Grenze des 75 % Intervalls der Verhältnisse aus sekundärer und primärer Komponente den Wert von -6 dB nicht überschreitet.

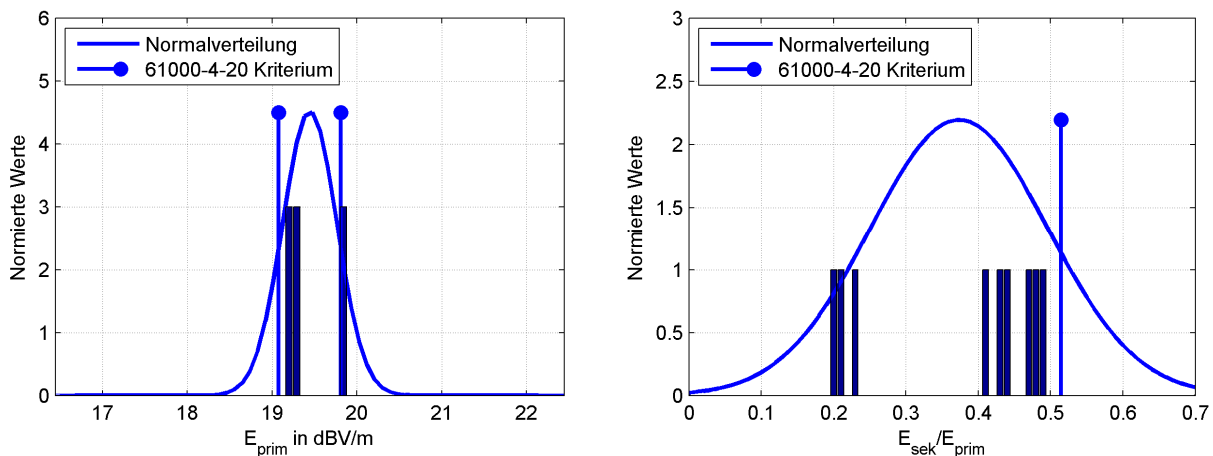


Abbildung 1: Nachweis der Feldhomogenität (links) und des TEM-Modes (rechts) einer GTEM-Zelle.

Abb. 1 zeigt reale Messwerte aus einer GTEM-Zelle. Offensichtlich ist die Feldhomogenität gegeben (links). Doch obwohl alle Verhältnisse aus sekundärer und primärer Feldstärke kleiner als -6 dB sind, liefert die Auswertung der Gleichungen aus der zweiten Edition des Standards eine Gütezahl größer -6 dB, was zum Nichtbestehen des Wellenleiters bei dieser Frequenz führt (rechts). Dieses Phänomen ist auf zwei Ursachen zurückzuführen. Zum einen kann die Annahme der Normalverteilung für das Verhältnis zweier Beträge nicht gültig sein, da dieses niemals negative Werte annehmen wird. Zum anderen führt die Symmetrie der Normalverteilung dazu, dass besonders gute Werte nahe Null eine Erhöhung der Obergrenze des 75 % Intervalls verursachen. Während bereits umfangreiche messtechnische Untersuchungen zur Feldverteilung in GTEM-Zellen durchgeführt wurden [4], [5], werden in dieser Arbeit erstmals Messwerte mit statistischen Ansätzen kombiniert und auf die normative Anwendbarkeit hin bewertet.

1.2 Durchgeführte Untersuchungen und Aufbau

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messdaten in zwei GTEM-Zellen unterschiedlicher Größe und in einer Crawford-Zelle aufgenommen. Weiterhin wurden Modelle der beiden Zellentypen in CST simuliert. Die Beschreibung der Messungen und Simulationen sind in Kapitel 2 zu finden. Auf diesen Daten basierend erfolgt in Kapitel 3 die statistische Untersuchung der Feldhomogenität. In Kapitel 4 wird der Nachweis des TEM-Modes diskutiert. Dazu werden Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen mit Mess- und Simulationen verglichen. Die Verteilungen werden auf ihre Anwendbarkeit, Gültigkeit und praktische Umsetzbarkeit hin untersucht. Von der großen Anzahl an Mess- und Simulationsergebnissen werden exemplarische Beispiele angeführt.

2. Messaufbauten & Simulation

Um Aussagen über die Eignung verschiedener Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen treffen zu können, musste eine sehr große Stichprobe durchgeführt werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze wurden mit einem speziellen Messaufbau und mit Simulationen in CST erzeugt. In allen Fällen wurde die Kalibrierebene größer als vom Zellenhersteller empfohlen gewählt, um Messwerte nahe den Grenzwerten zu erhalten.

2.1 Messaufbauten

Alle Messungen wurden mit einer baukleinen optischen E-Feld Sonde durchgeführt. Die Sonde kann mit den Halterungen im rechten Teil von Abb. 2 in die Messpositionen x , y und z gedreht werden. Dabei ist die z -Achse gemäß dem im Standard beschriebenen Koordinatensystem in Ausbreitungsrichtung des Wellenleiters orientiert. Die y -Achse weist vom Boden zum Septum und die x -Achse bildet mit den beiden anderen ein Rechtssystem. Die Sondenhalterung wird in einer großen Styropor Platte eingesteckt, die wiederum in der zu validierenden gleichförmigen Ebene im Wellenleiter steht. Abb. 2 (links) zeigt den Messaufbau mit Trägerplatte, Sondenhalterung und Sonde.

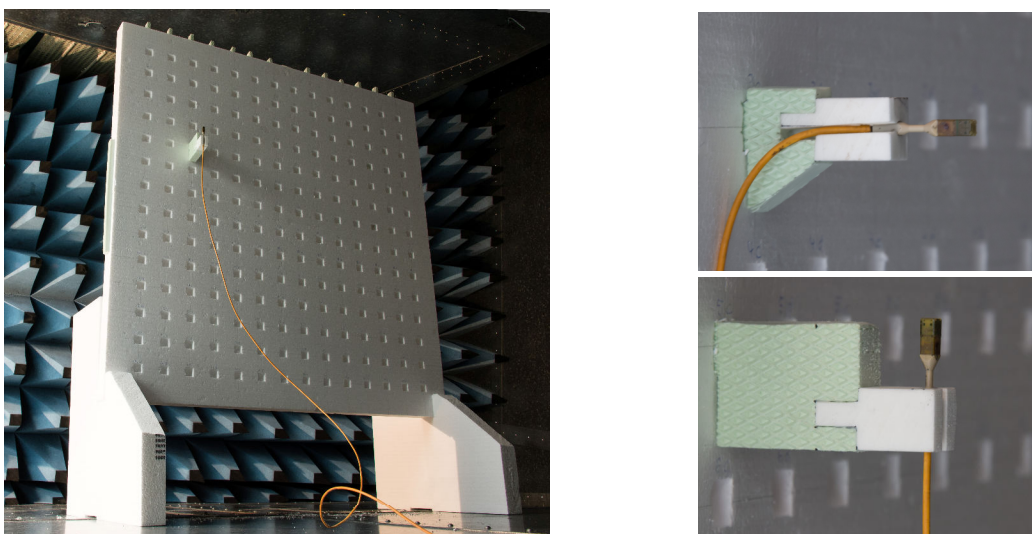


Abbildung 2: Trägerplatte im Prüfvolume der gtem1750 (links) und Sondenhalterung mit optischer Sonde in x/y -Richtung (rechts oben) sowie z -Richtung (rechts unten).

2.2 Simulationsmodell

Zusätzlich zu den Messungen in den realen Zellen wurden Simulationsmodelle in CST durchgerechnet. Das bereits von Thye [3] erstellte Modell der GTEM-Zelle im linken Teil von Abb. 3 wurde mit Feldsonden versehen und im Zeitbereich durchgerechnet, während das Modell der Crawford-Zelle im rechten Teil von Abb. 3 im Frequenzbereich durchgerechnet wurde. In der gleichförmigen Ebene der jeweiligen Zelle werden insgesamt bis zu 289 Feldsonden platziert. Das Modell der GTEM-Zelle hat aus Symmetriegründen ein gekipptes Koordinatensystem, dessen z-Achse in der Mitte des Septums liegt. Die Zeitsignale der Feldsonden werden nach der Simulation in das im Standard beschriebene Koordinatensystem abgebildet und in den Frequenzbereich transformiert.

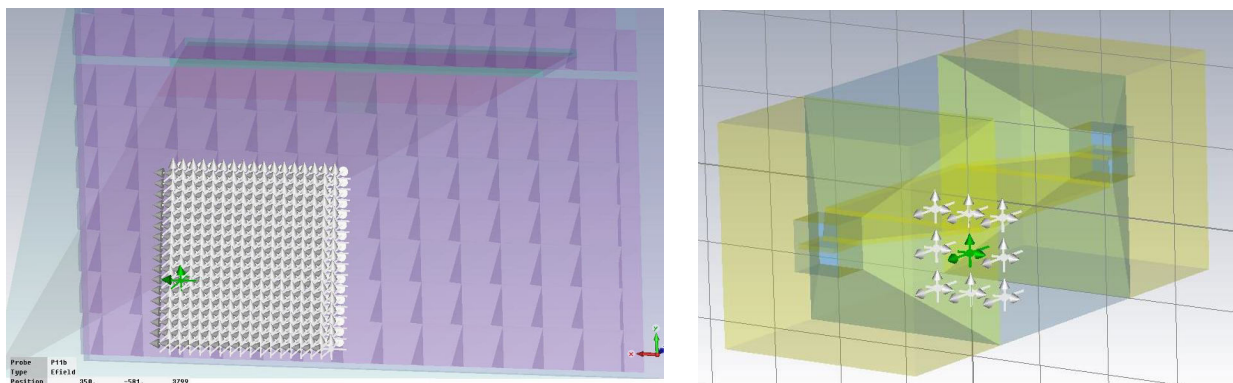


Abbildung 3: Simulationsmodell der gtem1250 (links) und der Crawford-Zelle (rechts) mit Feldsonden.

3. Untersuchung der Feldhomogenität

Der im Standard beschriebene statistische Ansatz für den Nachweis der Feldhomogenität erfolgt unter Annahme von normalverteilten Messwerten für die primäre Feldkomponente. Unter dieser Voraussetzung liegen 75 % der gemessenen Werte in einem Band von 6 dB, sofern die Standardabweichung der Stichprobe kleiner als 2,61 dB ist.

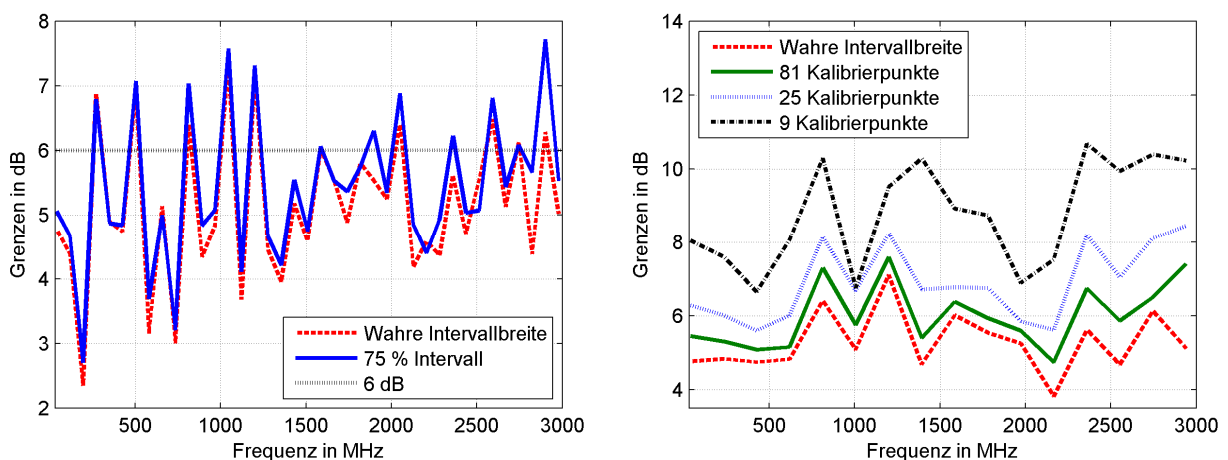


Abbildung 4: Intervallgrenzen (links) und Einfluss der Anzahl der Prüfpunkte (rechts) für die Simulationsergebnisse der gtem1250.

In Abb. 4 (links) ist die Differenz der aus allen 289 Feldsonden berechneten wahren Quantile $Q_{87,5\%}$ und $Q_{12,5\%}$ im Vergleich mit der vom Standard ausgewerteten 1,15 Sigma-Umgebung dargestellt. Die Annahme der Normalverteilung führt hier im gesamten Frequenzbereich zu einer guten Annäherung an die wahren Werte. Allerdings werden vom Standard in einer gleichförmigen Ebene mit dem hier gewählten Querschnitt von 0,8 m x 0,8 m nur neun Kalibrierpunkte vorgeschrieben. Von diesen neun Punkten wiederum liegen acht auf dem Rand der gleichförmigen Ebene und nur einer in der Mitte. Während am Rand der gleichförmigen Ebene die größten Inhomogenitäten auftreten [4,5], wird der Prüfling später etwa an der Stelle des mittleren Punktes stehen. Dieses regelmäßige schwach besetzte Gitter führt im Vergleich zu einem Gitter mit zufällig gewählten Messpunkten immer zu einer schlechteren Einschätzung der Feldhomogenität. Im rechten Teil von Abb. 4 ist die Breite der 1,15 Sigma-Umgebung für verschiedene Anzahlen von Gitterpunkten über der Frequenz dargestellt. Dabei wurden die Gitterpunkte jeweils in einem regelmäßigen Raster aus der Gesamtheit herausgegriffen. Im Vergleich mit dem wahren Wert, wird die starke Unterschätzung der Feldhomogenität durch die geringe Anzahl und die Platzierung der Kalibrierpunkte deutlich. Der Nachweis der Feldhomogenität nach der DIN EN 61000-4-20 muss also als Worst-Case-Abschätzung verstanden werden. Die sich ergebende Standardabweichung der primären Komponente der elektrischen Feldstärke muss kleiner als 2,61 dB sein. Ist sie das nicht, kann der Wert theoretisch durch die Wahl einer größeren Anzahl von Kalibrierpunkten reduziert und damit optimiert werden. Dieses Vorgehen wird vom Standard nicht verboten und ist auch nicht von Nachteil, da mit einer größeren Anzahl von Kalibrierpunkten die Feldhomogenität letztlich genauer und damit besser nachgewiesen wird.

4. Untersuchung des TEM-Modes

Aus den Messungen und Simulationen sind für jede Frequenz Werte der primären und sekundären elektrischen Feldstärke in den Kalibrierpunkten bekannt. Wie im Standard wird als Güteziffer das Verhältnis aus sekundärer zu primärer Feldstärke ausgewertet. Diese Güteziffer wird für eine endliche Anzahl von Frequenzen als Histogramm dargestellt und qualitativ untersucht. Die Normalverteilung nach Gleichung (1) kann das immer positive Verhältnis zweier Beträge grundsätzlich nicht abbilden. Da sie jedoch von der zweiten Edition des Standards herangezogen wird, dient sie als Vergleich für neue Ansätze. Neben der Normalverteilung werden die Rayleigh-Verteilung nach Gleichung (3) und die Gamma-Verteilung nach Gleichung (2) auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht [2]. Die Parameter der Verteilungsfunktionen müssen für alle drei Verteilungsdichtefunktionen aus den Messwerten geschätzt werden.

$$f_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

$$f_G(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (2)$$

$$f_R(x) = \frac{x}{s} \cdot e^{-\frac{x^2}{2s^2}} \quad (3)$$

Dabei kommt der Gamma-Funktion eine Sonderrolle zu, da ihre Parameter α und β nur unzureichend aus der Stichprobe geschätzt werden können. Im Fall der hier untersuchten Messwerte musste die Gamma-Verteilung numerisch mit Hilfe von Matlab angepasst werden. Die Parameter σ und μ der Normalverteilung sind Mittelwert und Standardabweichung der gewählten Güteziffer, während der Parameter s der Rayleigh-Verteilung mit Hilfe von Gleichung (4) geschätzt werden kann.

$$s \approx \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{E_{\text{sek}}}{E_{\text{prim}}} \right)^2} \quad (4)$$

In Anlehnung an die Edition 1 des Standards wird nun gefordert, dass statistisch gesehen 75 % der Ausprägungen der Güteziffer kleiner als 0,5 sind – die sekundäre elektrische Feldkomponente in diesen Punkten also 6 dB kleiner als die primäre ist. Dementsprechend wird das Kriterium aus der zweiten Edition des Standards mit den 75 % Quantilen der Gamma- und Rayleigh-Verteilung verglichen. Während sich das Quantil der Rayleigh-Verteilung mit Gleichung (5) in geschlossener Form berechnen lässt, muss das Quantil der Gamma-Verteilung wiederum numerisch bestimmt werden.

$$Q_{75\%} = \sqrt{-2s^2 \cdot \ln(1-0,75)} \quad (5)$$

Abb. 5 zeigt zur Veranschaulichung zwei Histogramme der in der gtem1750 gemessenen Güteziffern zusammen mit den drei auf einheitliche Höhe normierten Verteilungsdichtefunktionen und den sich ergebenden Quantilen.

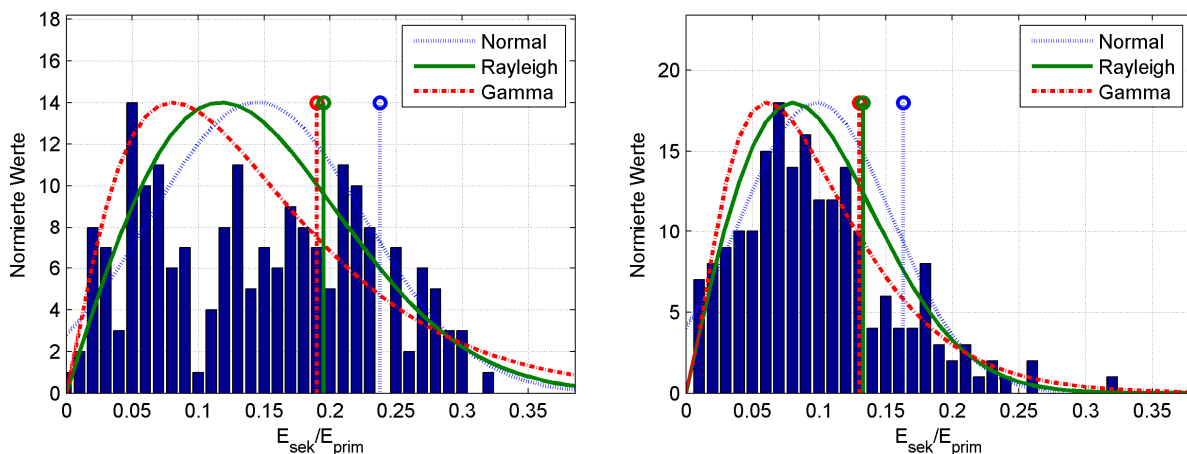


Abbildung 5: Histogramme der Güteziffer des TEM-Modes für zwei Frequenzen in der gtem1750.

Diese Histogramme sind repräsentativ für die im Rahmen dieser Arbeit erfassten Messwerte. Je nach Modenverteilung ergeben sich unterschiedliche Formen des Histogramms. Es lassen sich aber drei Grundaussagen treffen:

- I. Es sind die „guten“ Werte nahe bei Null, die die Normalverteilung aufweiten und zu einer schlechteren Bewertung führen.
- II. Die Gamma-Verteilung liefert die beste Annäherung an die Form des Histogramms für kleine Werte von $E_{\text{sek}}/E_{\text{prim}}$.
- III. Die 75 % Quantile der Gamma- und Rayleigh-Verteilung liegen dicht beieinander.

In Abb. 6 sind die bereits in Abb. 5 eingezeichneten Quantile zusammen mit dem für eine derart große Stichprobe direkt aus den Messdaten zu berechnenden wahren 75 %

Quantil über der Frequenz dargestellt. Die für die beiden Frequenzen in Abb. 5 geschilderte Überschätzung durch das in der Edition 2 des Standards beschriebene Verfahren mit der Normalverteilung ist in breiten Frequenzbereichen erkennbar. Die Rayleigh- und Gamma-Verteilung hingegen nähern den wahren Wert gut an. Darüber hinaus zeigt der rechte Teil von Abb. 6, dass auch die Schätzung des Rayleigh-Quantils aus nur neun der insgesamt 196 Messpunkte das wahre Quantil der 196 Messpunkte hinreichend gut abbildet.

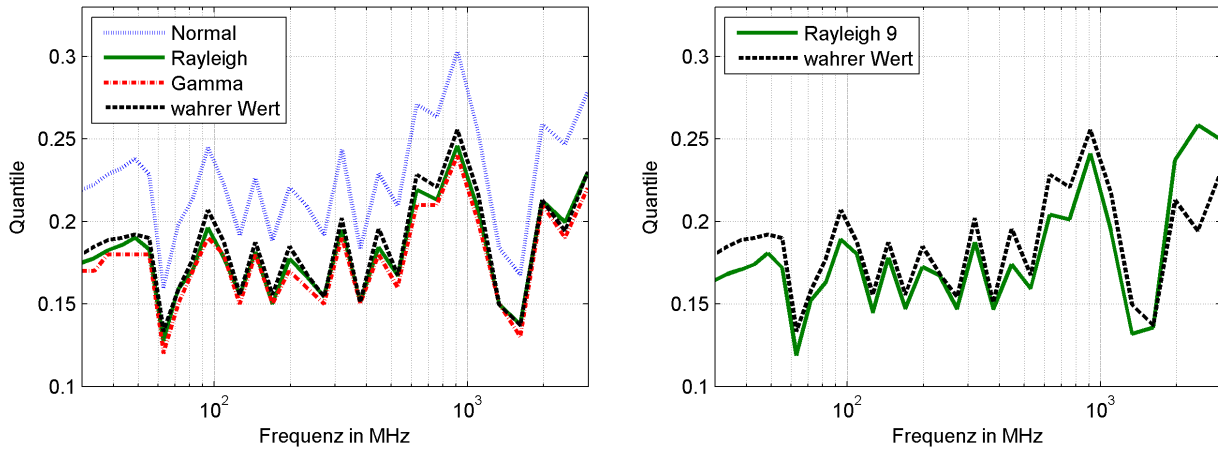


Abbildung 6: Quantile für die Messdaten aus der gtem1750 mit allen (links) und lediglich 9 (rechts) Punkten.

Für die großen Mengen von Messdaten erfolgt die Bewertung der qualitativen Abbildung des Histogramms durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion automatisiert. Dafür werden in einem zweiten Schritt für jede Frequenz die Parameter der Verteilungsdichtefunktionen aus den Messwerten geschätzt. Mit diesen Parametern wird numerisch ein äquivalent verteilter Datensatz erstellt und mit den Messwerten in einen Pearson-Korrelationskoeffizienten verrechnet. Dieser Korrelationskoeffizient gibt damit an, wie gut das Histogramm für die jeweilige Frequenz mit dem qualitativen Verlauf der entsprechenden Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung übereinstimmt.

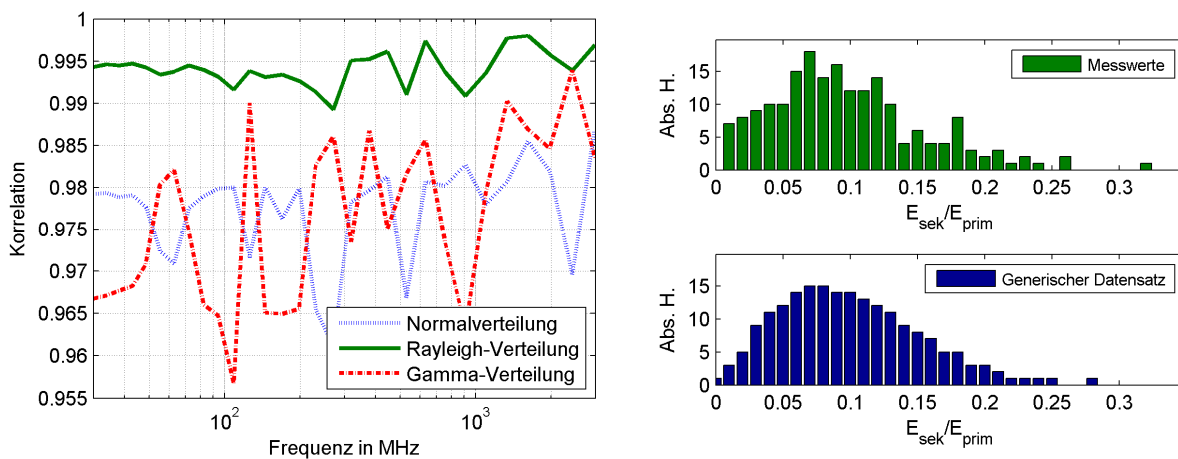


Abbildung 7: Qualitative Bewertung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (links) durch Korrelation mit numerisch erstellten Datensätzen (rechts).

Abb. 7 zeigt im linken Teil die berechneten Pearson-Korrelationskoeffizienten über der Frequenz und im rechten Teil die Histogramme der Messwerte und einer Rayleigh-

Verteilung mit nach Gleichung (5) aus den Messwerten bestimmten Parameter s und ebenfalls 196 Beobachtungen. Der Verlauf der Korrelationskoeffizienten über der Frequenz zeigt, dass die Rayleigh-Verteilung im gesamten untersuchten Frequenzbereich die beste Abbildung der Messwerte erlaubt. Mit ihrer besseren qualitativen Annäherung und der einfacheren Anpassung an die Messwerte ist die Rayleigh-Verteilung gerade dann die geeignetste Verteilungsfunktion, wenn nur eine kleine Stichprobe zur Verfügung steht.

5. Zusammenfassung

TEM-Wellenleiter können als alternative Testmethode benutzt werden, wenn die Feldverteilung im Prüfvolumen als hinreichend homogen und der TEM-Mode als dominant bestätigt wurden. Die in der ersten Edition der DIN EN 61000-4-20 aufgestellten Bedingungen wurden vom statistischen Ansatz der zweiten Edition nur teilweise korrekt wiedergegeben. Insbesondere für den Nachweis des TEM-Modus war die Annahme von Normalverteilung insofern ungünstig, als dass besonders gute Messwerte zum Nichtbestehen führen konnten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden umfangreiche Simulationen und Messungen mit verschiedenen TEM-Wellenleitern durchgeführt. Die so entstandenen Datensätze wurden einer statistischen Analyse unterzogen.

Die Untersuchung der Feldhomogenität zeigt, dass die Annahme von Normalverteilung und die Auswertung gemäß DIN EN 61000-4-20 eine sinnvolle Gütezahl für die Feldhomogenität ergeben. Es wird aber auch gezeigt, dass durch die Wahl einer größeren Anzahl von Kalibrierpunkten die Gütezahl gemäß Standard verbessert werden kann. Dieses Vorgehen strebt für eine große Anzahl von Kalibrierpunkten gegen den wahren Wert der Feldhomogenität und ist damit letztlich nur eine genauere Messung.

Bei dem Nachweis des TEM-Modus mit der Gütezahl gemäß DIN EN 61000-4-20 kommt es durch die Symmetrie der Normalverteilung zu fehlerhaften Annahmen und zu einer Überschätzung des tatsächlich gesuchten Grenzwertes. Mit der Rayleigh-Verteilung wird eine Verteilungsdichtefunktion vorgeschlagen, die die Verteilung der Messwerte besser abbildet. Die mit dieser Verteilung schon aus einer kleinen Anzahl von Kalibrierpunkten berechenbare Gütezahl liefert einen guten Schätzwert für den wahren Wert des gesuchten 75 % Quantils.

6. Literatur

- [1] DIN EN 61000-4-20, „Messung der Störaussendung und Störfestigkeit in transversal-elektromagnetischen (TEM)-Wellenleitern“, DIN, zweite Edition, 2011
- [2] A. Papoulis, S. U. Pillai, „Probability, Random Variables and Stochastic Processes“, 4. Auflage, McGraw Hill, 2002
- [3] H. Thye, „Zur transienten Wellenausbreitung in GTEM-Zellen“, Sierke Verlag, 2012
- [4] K. Haake, J. L. t. Haseborg, „Precise investigation of field homogeneity inside a GTEM cell“, EMC Europe, 2008, S. 559 – 562
- [5] D. Pouché, G. Mönich, „Figures of Merit for Field Homogeneity in TEM Waveguides“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007, Vol. 49, NO. 4, S. 792 – 804