

Untersuchungen zur Messunsicherheit bei der Kalibrierung von E-Feldsonden

Referent:

B.Eng. Enrico Saul, BTU Cottbus – Senftenberg, Labor für elektromagnetische Verträglichkeit, Senftenberg, Deutschland

Co-Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Sven Bönisch, BTU Cottbus – Senftenberg, Labor für elektromagnetische Verträglichkeit, Senftenberg, Deutschland

Dr.-Ing. Ralf Heinrich, Teseq GmbH, RF development, Berlin, Deutschland

Dipl.-Ing. Uwe Karsten, Teseq GmbH, Prüf- und Kalibrierlabor, Berlin, Deutschland

1 Einführung

Im Rahmen der Erweiterung der Akkreditierung eines E-Feldsondenkalibrierplatzes auf 18 GHz wurden Untersuchungen zur Bestimmung von Messunsicherheitsbeiträgen durchgeführt. Hierbei konnte teilweise auf bereits bestehende Kalibrierungen von Komponenten, wie z. B. Leistungsmesser und Antennen, zurückgegriffen werden. Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten daher die nicht direkt kalibrierbaren Eigenschaften des Messplatzes. Dazu zählen u. a. die frequenzabhängige Richtcharakteristik der Antennen, die Reflexionseigenschaften des Raumes und der Einfluss von Anschlüssen. Die Berechnung der Gesamtmessunsicherheit des Kalibrierplatzes konnte dann mit Hilfe des GUM [2] und des GUM S1 [3] erfolgen. Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Berechnungsansätze. Da die Berechnung nach GUM S1 eine Monte-Carlo-Analyse ist, wurde diese unter Verwendung numerischer Berechnungswerkzeuge in abgewandelter Form implementiert. Dazu wurde anders als in [3] beschrieben, der Prozess der Erstellung der Zufallswerte vorgezogen. Dies ermöglicht die Verwendung von einfachen Verteilungsfunktionen zur Zufallszahlenerzeugung ohne die komplexe analytische Berechnung der Verteilungsfunktion des gesamten Messplatzes.

2 Messaufbau und Verfahren

2.1 Messplatz

Der untersuchte Messplatz besteht aus zwei Signalgeneratoren, die den Frequenzbereich von 1 bis 18 GHz abdecken. Die Signale werden mit Hilfe von drei Verstärkern auf das entsprechende Leistungsniveau gebracht. Zur Abstrahlung der elektromagnetischen Felder werden für den Frequenzbereich von 1 bis 18 GHz insgesamt sieben verschiedene Standardhornantennen verwendet. Die eingespeiste Vorwärtsleistung wird mit einem Leistungsmesser unter Verwendung von Richtkopplern gemessen. Zur Regelung der Vorwärtsleistung sowie Erfassung der Sondenwerte dient ein entsprechender Steuerungsrechner. Die zu kalibrierenden Feldsonden werden für die Messung in einem festen Abstand zur Antenne positioniert und mit einem Laser ausgerichtet.

2.2 Feldsonden

Zur Charakterisierung des Messplatzes wurden vergleichende Feldstärkemessungen mit langstieligen und mechanisch kleinen Feldsonden durchgeführt, um eventuelle Einflüsse von Sondengehäusen, wie in [5] beschrieben, für diesen Messplatz experimentell zu ermitteln.

2.3 Erstellung Messunsicherheitsbudget

Zur Erstellung des Messunsicherheitsbudgets wurde zum einen das Verfahren gemäß GUM [2] und zum anderen das Verfahren gemäß GUM S1 [3] in einer abgewandelten Form verwendet. Das Verfahren gemäß GUM gilt als allgemein anerkannt. Nach der Berechnung aus den verschiedenen Eingangsgrößen wird für die resultierende Messunsicherheit nach GUM eine Gaußverteilung angenommen. Ist jedoch anzunehmen, dass die kombinierte Unsicherheit von der Gaußverteilung abweicht, empfiehlt sich die Verwendung des Verfahrens gemäß GUM S1. Eine umgekehrte Empfehlung besteht jedoch nicht, so dass das Verfahren nach GUM S1 auch für gaußverteilte Unsicherheitsbudgets eignet.

Das Verfahren nach GUM S1 beruht darauf, dass aus der jeweiligen Eingangsgröße mit ihrer zugehörigen Verteilungsfunktion die benötigten Stichproben herausgezogen und gemäß Abbildung 4b verarbeitet wird. Da es sich hierbei um ein numerisches Verfahren handelt, ist ein erheblicher Rechenaufwand erforderlich, der jedoch mit heutigen PC beherrschbar ist.

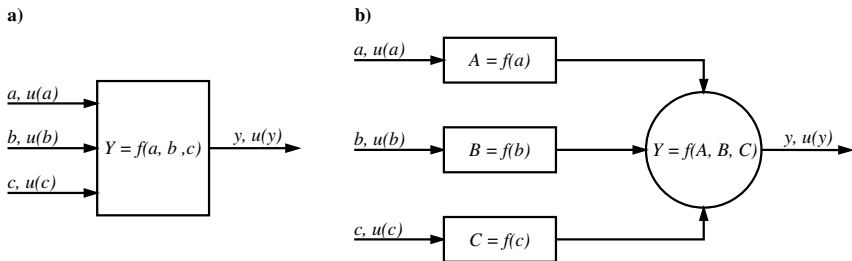


Abb. 1: Vergleich Verfahren nach GUM S1(a) und abgewandelter Form(b)

3 Experimentelle Bestimmung der Beiträge zur Messunsicherheit

3.1 Vorbemerkung

Beiträge die direkt aus Kalibrierscheinen o. ä. entnommen werden können, werden hier nicht betrachtet.

3.2 Anschlusseinflüsse

Es wurden der Vergleichsmessungen über den vollständigen Frequenzbereich (mit Antennenwechsel) durchgeführt und miteinander verglichen, bei denen die Position der Sonde nicht verändert wurden. Hierbei wurden Differenzen zwischen den Messungen von bis zu 0,3 dB im Bereich von 5 bis 6 GHz festgestellt. Die Ursachenidentifikation erfolgte schließlich bei fester Einstellung von Frequenz sowie Leistung. Nun wurde der

Leistungsmesskopf mehrfach an- und abgeschraubt. Zwischen jedem Schraubvorgang wurde der Messkopf um 90° gedreht. Der Vergleich der abgelesenen Anzeigewerte der Feldsonde zeigte nun ähnliche Abweichungen. Nach einer Reinigung des Messkopfanschlusses (Typ N) konnten Abweichungen kurzzeitig reduziert werden. Dieser Erfolg war jedoch nicht von Dauer. Es musste festgestellt werden, dass die Einflüsse der Schraubverbindung des Messkopfes im Messunsicherheitsbudget mit den festgestellten 0,3 dB berücksichtigt werden müssen. Diese Unsicherheit wird aus den gemachten Beobachtungen als Rechteckverteilt angenommen.

3.3 Einfluss Verstärker

Bei den für 3.2 manuell durchgeführten Messungen wurde beobachtet, dass bei Verwendung des TWT-Verstärkers für den Frequenzbereich von 8 bis 18 GHz die Feldsonden bei abgeschaltetem Generator aufgrund des Verstärkerrauschens eine Feldstärke von bis zu 2 V/m messen. Zur Ermittlung des frequenzabhängigen Unsicherheitsbeitrags infolge des Verstärkerrauschens wurde eine Messreihe mit einer Sollfeldstärke von 0 V/m durchgeführt und die eingespeiste Leistung gemessen. Für die Standardsollfeldstärke von 20 V/m ergab sich so eine maximale Unsicherheit von 0,15 dB. Das Rauschen verhält sich unabhängig vom Eingangspegel. Die resultierende Unsicherheit muss für jede andere Sollfeldstärke neu berechnet werden. Die Unsicherheit steigt besonders für kleine Feldstärken und große Antennengewinne an (Abb. 2).

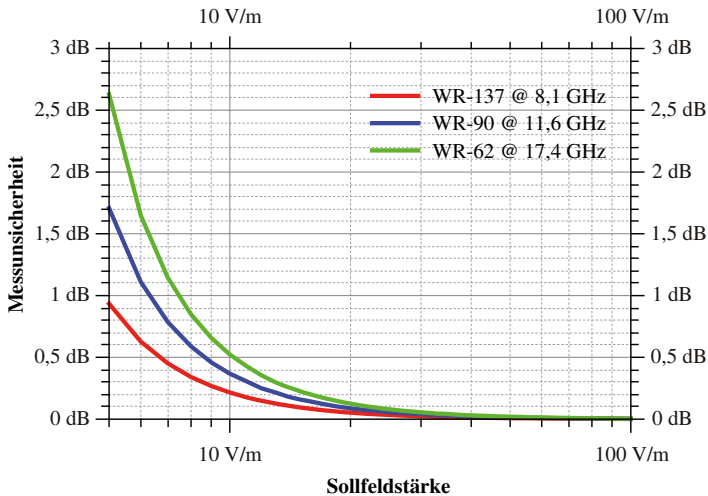


Abb. 2: Messunsicherheit durch Verstärkerrauschen in Abhängigkeit von der Sollfeldstärke und Frequenz der größten Unsicherheit

3.4 Richtcharakteristik der Antennen

Bei den Untersuchungen zur Quantifizierung der Unsicherheit der Positionierung der Feldsonde wurde festgestellt, dass die Richtcharakteristik der verwendeten Hornantennen frequenzabhängig ist. Dies bedeutet, dass sich der Punkt des maximalen Antennenfaktors abhängig von der Frequenz verschiebt. Die Messungen wurden durchgeführt, indem die mechanisch kleine E-Feldsonde vor jeweils einer Antenne in Schritten von 1 cm in horizontaler und vertikaler Richtung verschoben wurde. Diese Varianz der Richtcharakteristik wurde auf die herstellungsbedingten Unsicherheiten beim Zusammenschweißen der einzelnen Metallplatten der Antennen zurückgeführt. Aus den Untersuchungen ergaben sich Unsicherheiten von 0,1 dB für die horizontale Ausrichtung und 0,15 dB für die vertikale Ausrichtung, unter der Annahme, dass die Sonde mit einer maximalen Unsicherheit von ± 1 cm ausgerichtet wird. Diese Unsicherheit ist zum einen für die Unsicherheit der Ausrichtung der Feldsonde zu berücksichtigen sowie davon unabhängig für das frequenzabhängige „Schielen“ der Antennen.

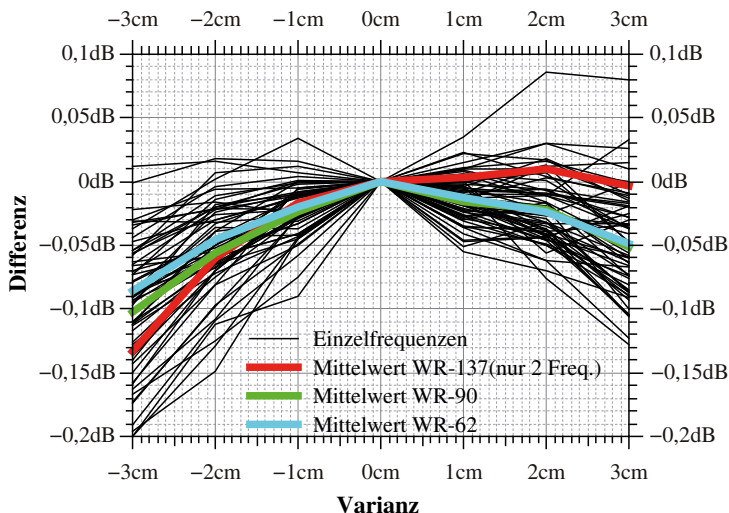


Abb. 3: Übersicht der Richtdiagramme in horizontaler Achse

3.5 Reflexionseigenschaften des Raumes

Die Reflexionseigenschaften des Messraumes wurden mit einer kleinen Feldsonde nach dem in [1] im Annex A, 5.1.3 beschriebenen Verfahren im Frequenzbereich bis 18 GHz untersucht. Als Ergebnis dieser Untersuchung konnte festgestellt werden, dass der Kalibrierplatz, nach den Kriterien aus [1], annähernd reflexionsfrei ist. Im schlechtesten Fall wurde ein SiteVSWR von 1,02 bestimmt.

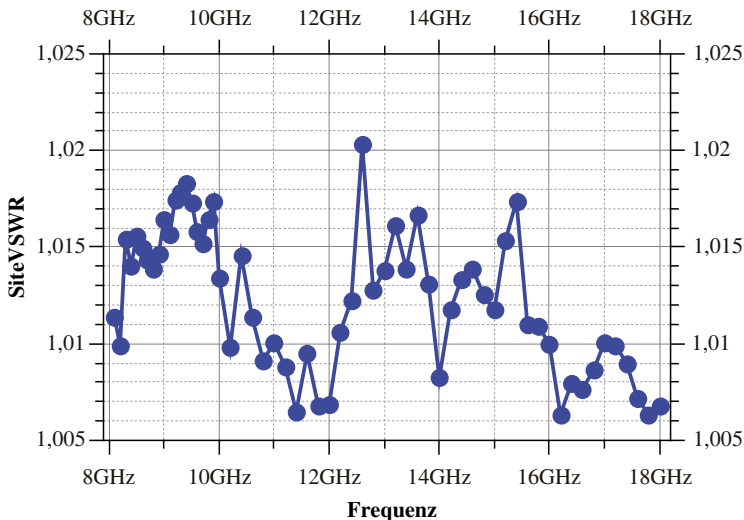


Abb. 4: SiteVSWR des Kalibrierplatzes

4 Ermittlung des Messunsicherheitsbudgets

4.1 Modellgleichung und Unsicherheitsbeiträge

Die Gleichung zur Berechnung der Feldstärke wurde aus [1] übernommen (Gl. 1). Nach Einsetzen in Gl. 2 und mit den Unsicherheitsbeiträgen aus Tabelle 1 ergänzt ergibt sich die Modellgleichung (Gl. 3).

$$E_{Ist} = \sqrt{\frac{P_{Speise} \cdot G_i \cdot Z_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}}$$

Gl. 1: Berechnung der Feldstärke

$$k_{Sonde} = \frac{E_{Ist}}{E_{Anzeige}}$$

Gl. 2: Berechnung des Kalibrierfaktors

$$k_{\text{Sonde}} = \frac{\sqrt{\frac{P_{\text{Speise}}(1+u_{P_{\text{Speise}}}) \cdot G_I(1+u_{G_I}) \cdot Z_0}{4 \cdot \pi \cdot (r(1+u_r))^2}} \cdot (1+u_{\text{Extra}})}{E_{\text{Anzeige}}(1+u_{E_{\text{Anzeige}}})}$$

Gl. 3: Modellgleichung für Kalibrierplatz

lfd. NR	Eingangsgröße	bester Schätzwert	U_dB	dB-Faktor	u_lin	Verteilung	Teiler	Standardmessunsicherheit
	X	x						u(x)
1	E(ANZ, PRÜF)	20						
2	Δanschluss	1	0.30	10	7.15 %	R	1.73	4.13E-02
3	Δrauschen_W R_137	1	0.05	20	0.61 %	R	1.73	3.52E-03
4	Δrauschen_W R_90	1	0.09	20	1.03 %	R	1.73	5.95E-03
5	Δrauschen_W R_62	1	0.13	20	1.45 %	R	1.73	8.37E-03
6	Δhorizontal	1	0.10	10	2.33 %	N	2.00	1.16E-02
7	Δvertikal	1	0.15	10	3.51 %	N	2.00	1.76E-02
8	Δpauschal	1	0.10	20	1.16 %	N	2.00	5.79E-03
9							

Tabelle 1: Auflistung der Unsicherheitsbeiträge

Zu beachten ist, dass nur ein Rauschbeitrag je Frequenzbereich zu betrachten ist. Die Reflexionseigenschaften des Raumes sind mit anderen Beiträgen zu einem Pauschalbeitrag zusammengefasst. Ferner sind in der Tabelle 1 nur die Beiträge aufgelistet, die im Rahmen dieses Beitrages ausführlicher betrachtet wurden. Für das vollständige Messunsicherheitsbudget kommen entsprechend der Modellgleichung noch weitere Beiträge hinzu, die z.B. aus Kalibrierscheinen o.ä. entnommen werden können.

Für den betrachteten Messplatz ergibt sich im schlechtesten Fall für 20 V/m und unter Berücksichtigung aller relevanten Messunsicherheitsbeiträge eine Messunsicherheit nach GUM von $U = 0,80$ dB.

4.2 Vergleich der Messunsicherheit nach GUM und GUM S1

Zur Umsetzung der Monte-Carlo-Analyse nach GUM S1 [3] wurde ein entsprechendes Berechnungsrahmenprogramm in GNU Octave [6] implementiert und frei nutzbar gemacht [7]. Es besteht aus drei Scriptdateien, die Programmablauf, Unsicherheitsbeiträge und die Modellfunktion, Funktionen zur Erzeugung der Zufallsvektoren entsprechend ihrer Verteilungsfunktionen und die Berechnung des Shortest-Coverage-Intervall enthalten. Da eine automatische Anpassung der Zufallszahlenanzahl nach Bedarf noch nicht implementiert wurde, fand die Simulation mit $26 \cdot 10^6$ Stichproben in zwei Durchgängen statt. So wurde sichergestellt, dass die Unterschiede in der Standardabweichung <100 ppm zwischen den einzelnen Durchgängen sind. Nach Berechnung des Shortest-Coverage-Intervall wurde für 20 V/m eine Messunsicherheit von +0,74 dB und -0,77 dB berechnet (siehe Abb. 5).

Die gute Übereinstimmung zwischen der Messunsicherheit nach GUM und GUM S1 zeigt, dass im vorliegenden Fall im Wesentlichen von einer Normalverteilung

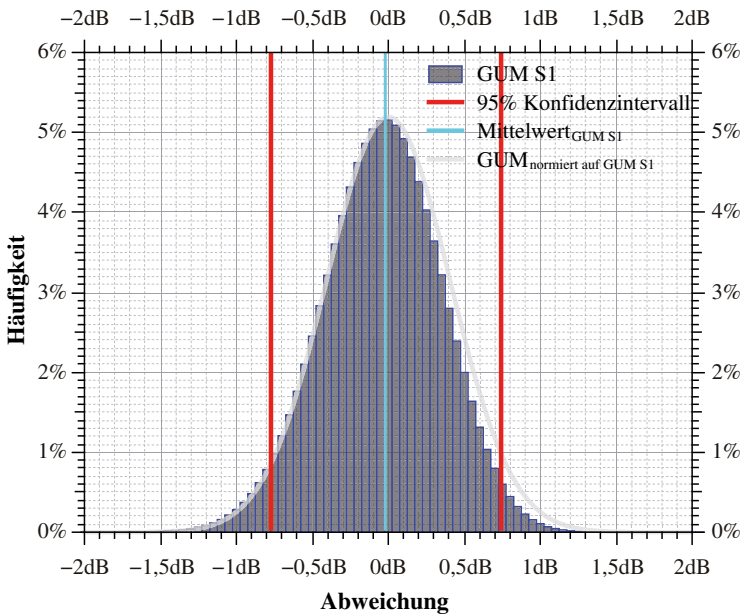


Abb. 5: Vergleich Verteilungsfunktion der Messunsicherheit nach GUM und GUM S1

ausgegangen werden kann, da sowohl die hier nicht betrachteten kalibrierbaren Messunsicherheitsbeiträge, als auch die hier untersuchten Beiträge vergleichsweise klein sind und daher nicht zu einer unsymmetrischen Verteilungsfunktion führen, die die Anwendung von GUM S1 nahelegen würden.

5 Zusammenfassung

Schwerpunkt des Beitrages war die Untersuchung von nicht direkt kalibrierbaren Messunsicherheitsbeiträgen, die experimentell ermittelt wurden. Damit konnte ein Messunsicherheitsbudget nach GUM und GUM S1 erstellt werden. Für den ungünstigsten Fall bei 20 V/m Kalibrierfeldstärke und unterer Berücksichtigung aller relevanten Messunsicherheitsbeiträge ergab sich eine Messunsicherheit von $U=0,8$ dB, mit der Messplatz akkreditiert wurde [9].

Mit dem Vergleich zwischen den Messunsicherheiten nach GUM und GUM S1 konnte gezeigt werden, dass für vergleichsweise kleine Messunsicherheitsbeiträge das Verfahren nach GUM ausreichend ist.

Referenzen

- [1] IEEE Standards Association: IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz, IEEE Std 1309™-2013
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008
- [3] Joint Committee for Guides in Metrology: Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ - Propagation of distributions using a Monte Carlo method, JCGM 101:2008
- [4] Joint Committee for Guides in Metrology: International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 200:2008
- [5] R. Pape, U. Karsten, F.-M. Lindner, F. Rittmann, J. v. Freeden, T. Kleine-Ostmann, and T. Schrader, Results of an Intercomparison for Electric Field Strength Measurements within the German Calibration Service (DKD), Kleinheubacher Tagung 2015, Miltenberg, Sept. 2015
- [6] John W. Eaton, David Bateman, and Søren Hauberg. GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations, CreateSpace Independent Publishing Platform. ISBN 1441413006, URL <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter/>, 2009
- [7] E. Saul, https://github.com/octave-de/macgyver_utils
- [8] Gerd Wübbeler, Monte-Carlo-Verfahren nach GUM Supplement 1, 260. PTB-Seminar, URL https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_8/8.4_mathe_matische_modellierung/260_PTB_SEMINAR/VORTRAEGE/4-1_Wuebbeler_GUM_S1.pdf, März 2011
- [9] Deutsche Akkreditierungsstelle, Anlage zur Akkreditierungsurkunde D-K-15033-01-00 nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005, URL <http://www.dakks.de/as/ast/d/D-K-15033-01-00.pdf>, August 2015