Betrachtungen zur Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Antennen für EMV-Messungen

Berthold Klos
Rohde & Schwarz
Abt. 8GE3
Mühldorfstraße 15
81614 München

Tel.: 089-4129-13375
Email: Berthold.Klos@rsd.rohde-schwarz.com

Einleitung

Bei der Feldstärkemessung von Störausstrahlungen und bei der Verifizierung der dafür benötigten Messplätze werden Antennen verschiedenster Bauformen eingesetzt. Diese müssen kalibriert sein, d.h. der Antennenfaktor (Wandlungsmaß zwischen Feldstärke am Ort der Antenne und Eingangsspannung eines Empfängers) wird individuell bestimmt. Dazu werden verschiedene internationale Normen herangezogen, die unterschiedliche Methoden dazu beschreiben. Zur Bestimmung des Antennenfaktors werden mehrere Übertragungsmessungen zwischen mehreren Antennen gleichen oder ähnlichen Typs in mehr oder weniger definierter Umgebung ausgewertet.

Da eine Antenne mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung steht, treten verschiedene Einflußgrößen auf, welche die Genauigkeit der Kalibrierung beeinflussen. Zur Abschätzung der Größe der dadurch bedingten Messunsicherheit werden sowohl Rechnersimulationen als auch ausgedehnte Messreihen herangezogen.

Grundlagen

Grundlage aller Ermittlungen des Antennenfaktors ist eine Messung des Gewinns mittels der Beziehung für den Übertragungsfaktor zwischen zwei Antennen im freien Raum

$$P_E = P_S G_S G_E \left(\frac{l}{4pD} \right)^2 \qquad (1)$$

P_E: Empfängerleistung an 50 Ω
P_S: Senderleistung, bezogen auf 50 Ω
G_S: Gewinn Sendeantenne
G_E: Gewinn Empfangsantenne
λ: Freiraum-Wellenlänge
D: Abstand Phasenzentren Sende - Empfangsantenne

Setzt man

$$\frac{P_E}{P_S} = \left| S_{21} \right|^2 = T^2 \qquad (2)$$

S_{21}: Übertragungsfaktor, Messung mit NWA
T: Transmissionsfaktor

so ergeben sich daraus drei Methoden zur Messung des Gewinns.

- Zwei gleiche Antennen: $G_S = G_E$

$$\overline{G} = \sqrt{G_S G_E} = \left(\frac{4pD}{l}\right) T \qquad (3)$$

$\overline{G}$: gemittelter Gewinn

- Vergleich mit Referenzantenne G_{ref}

$$G = G_{\mathrm{Re}\,f} \frac{T_{AUT}^2}{T_{\mathrm{Re}\,f}^2} \qquad (4)$$

G_{Ref}: Gewinn Referenzantenne
T_{Ref}: Transmissionsfaktor Referenzantenne-Hilfsantenne
T_{AUT}: Transmissionsfaktor “Antenna under Test”-Hilfsantenne

- Drei Übertragungsmessungen zwischen drei Antennen im zyklischen Wechsel erlauben die Ermittlung des individuellen Gewinns der drei Antennen, z.B.

$$G_1 = \left(\frac{4pD}{l}\right) \frac{T_{23}}{T_{13} T_{31}} \qquad (5)$$

G_1: Gewinn Antenne 1
T_{12}: Transmissionsfaktor Antenne1-Antenne2
T_{23}: Transmissionsfaktor Antenne2-Antenne3
T_{31}: Transmissionsfaktor Antenne3-Antenne1
1. Index: Sendeantenne
2. Index: Empfangsantenne

Abweichend von der ITG-Empfehlung 2.1/01(1986) "Begriffe aus dem Gebiet der Antennen" gilt der so ermittelte Gewinn nur für eine bestimmte Richtung und nicht im Maximum des Strahlungsdiagramms. Ferner sind die Anpassverluste enthalten (im deutschen Sprachgebrauch oft als “praktischer Gewinn” bezeichnet).

Mittels der Beziehung

$$AF = \frac{9{,}73}{l\sqrt{G}} \qquad \text{AF: Antennenfaktor} \qquad (6)$$

wird daraus der Antennenfaktor berechnet. Der Antennenfaktor ist dabei das Verhältnis zwischen elektrischer Feldstärke am Ort einer Empfangsantenne und Spannung an einem Bezugswiderstand (z.B. 50 Ω Messempfängereingang, unter Berücksichtigung evtl. zwischengeschalteter Komponenten, wie Kabel, Dämpfungsglieder, Verstärker).

Voraussetzungen bei diesen Betrachtungen sind:

- Freiraum ; keine Beeinflussung durch Reflexionen (z.B. Boden, Bewuchs, Bebauungen), keine Rückwirkungen mit Messequipment (z.B. Kabel)
- Fernfeld; keine Verkopplung der Antennen untereinander, ebene Wellenfronten
- gleiche Polarisation der Sende- und Empfangsantenne

Unvermeidbare Abweichungen von diesen Bedingen führen zu erhöhten Messunsicherheiten und haben zu verschiedenen Messverfahren geführt.

Messverfahren

Messung unter nahezu idealen Freiraumbedingungen (CISPR 16-1)

- geringe Reflexionen aus der Umgebung
- geringe Verkopplung mit Boden und der Antennen untereinander

Messung über ideal leitender Ebene mit festen Höhen oder Variation der Höhe einer Antenne (CISPR 16-1/ANSI C63.5)

- Überlagerung des direkten und des an der leitenden Ebene reflektierten Strahls mit Korrektur C_{max} (Überhöhungsfaktor).

$$C_{\max} = Max\left\{\left(\frac{D}{d_1}\right)^2\left[1+\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 - 2\left(\frac{d_1}{d_2}\right)\cos\left(\frac{2p \cdot f \cdot [d_2 - d_1]}{300}\right)\right]\right\} \qquad \begin{array}{l} d_1 = \sqrt{D^2 + (h_2 - h_1)^2} \\ d_2 = \sqrt{D^2 + (h_2 + h_1)^2} \end{array} \qquad (7)$$

C_{max}:	Überhöhungsfaktor bei horizontaler Polarisation	Das Maximum wird
D:	Abstand Phasenzentren, bei gleicher Höhe	zwischen $h_2 = {}_{h2,min}$ und
f:	Frequenz in MHz	$h_2 = h_{2,mas}$ gesucht
h_1:	feste Höhe Antenne 1	
h_2:	variable Höhe Antenne 2	

$$G = \frac{\left(\frac{4pD}{l}\right)}{\sqrt{C_{\max}}} \cdot \frac{T_{23}}{T_{12}T_{31}} \qquad (8)$$

Bei den beiden vorgenannten Verfahren soll der Freiraum-Antennenfaktor ermittelt werden, während dies z.B. im folgenden Verfahren nicht der Fall ist.

Messung über ideal leitender Ebene mit definiertem Abstand und fester Höhe (ARP 958)

- Bodeneinfluß und Verkopplungen sind enthalten.

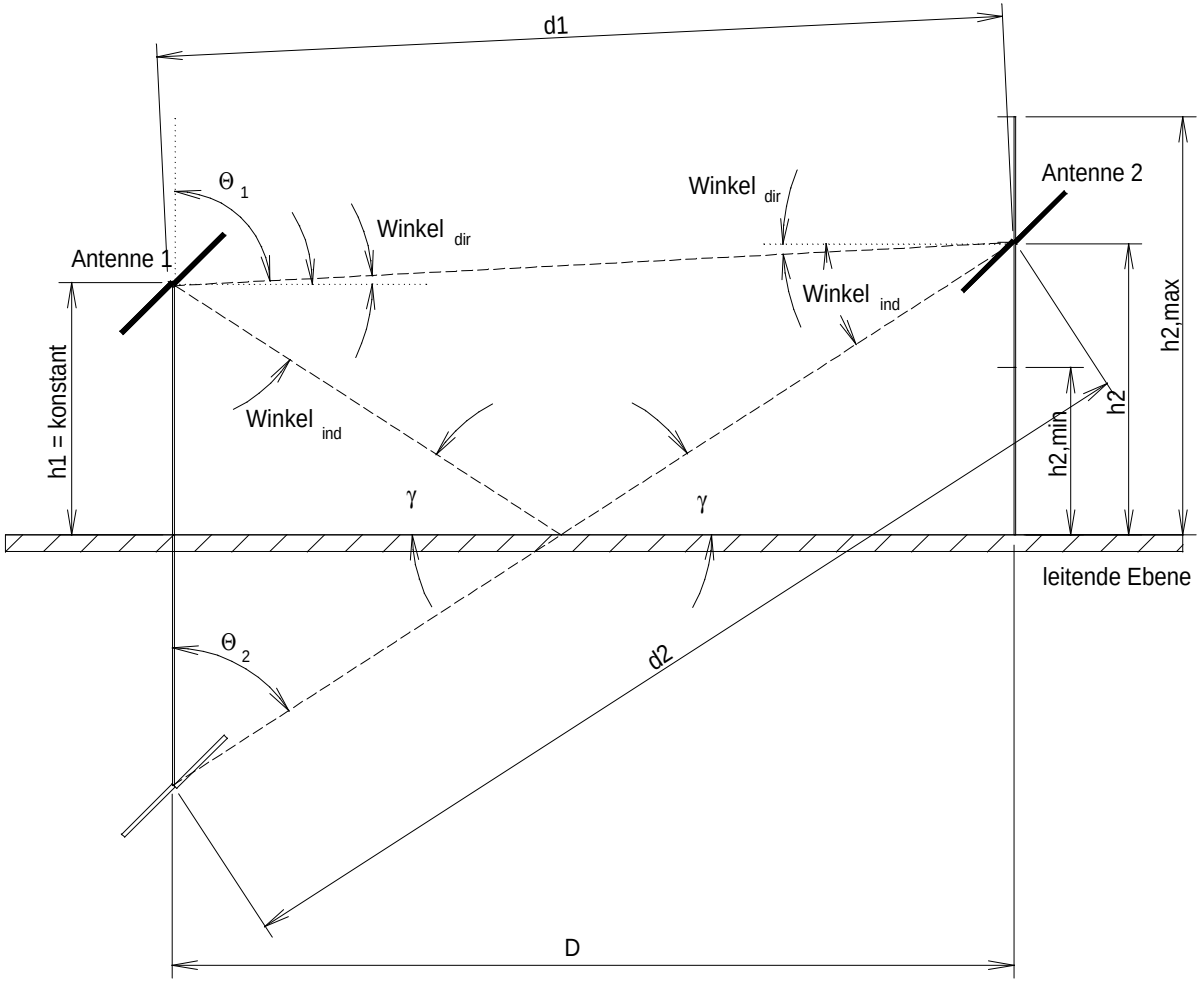

Abb. 1: Prinzipskitze für Messaufbau

Messunsicherheit

Die Angabe der Messunsicherheit erfolgt im allgemeinen als kombinierte und erweiterte Messunsicherheit. Für eine Ausgangsgröße $y = f(x_1, x_2, ...)$ als Funktion mehrerer Eingangsgrößen mit den Standardmessunsicherheiten u_i ergibt sich die kombinierte Messunsicherheit zu

$$u(y) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u_i^2} \qquad (9)$$

Bei der Ermittling der Messunsicherheit der Eingangsgrößen x_i bzw. der Einflußgrößen ist auf die Verteilung der Messergebnisse zu achten.

Verteilung	Normalverteilung	Rechteckverteilung	
Erwartungswert	μ	$\bar{x} = \frac{(a_+ + a_-)}{2}$	(10)
Standartabweichung	σ	$u = \sqrt{\left(\frac{(a_+ - a_-)}{2}\right)^2 \frac{1}{3}} = \frac{\Delta a}{\sqrt{3}}$ a_+: oberer Grenzwert a_-: unterer Grenzwert des Messwertes	

Die Angabe der erweiterten Messunsicherheit U erfolgt in der Regel mit einem Erweiterungsfaktor von k=2, was einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von ca. 95% entspricht.

$$U = 2u \qquad (11)$$

Die wesentlichsten Einflußgrößen sind:

- Nicht unendlich ausgedehnte, ideal leitende Ebene mit Unebenheiten
- Messunsicherheiten der Messgeräte (Linearität, S21, S11, Frequenz, Dynamik, Einstellzeit)
- Kabel, Temperaturdrift, mehrmaliges Lösen der Verbindungen bei Antennenwechsel
- Verkopplung mit Boden (Spiegelbild), daraus Einfluß auf Impedanz und Diagramm
- Verkopplung der Antennen untereinander
- Reflexionen von Bebauungen und Bewuchs aus der Umgebung
- Reflexionen von Masten und Halterungen
- Geometrischer Ort der Antennen (Abstand, Höhe, Lage relativ zueinander beim Verfahren der bewegten Antenne, Ausrichtung zueinander)
- Nicht berücksichtigen des Diagramms beim Überhöhungsfaktor
- Kein ortsfestes Phasenzentrum bei LPDA
- Externer Balun bei abstimmbaren Dipolen, Symmetrierung
- Polarisationsanpassung

Beispiel 1: Bikonische Antenne 30 MHz bis 300 MHz

Für die Ermittlung des Antennenfaktors einer Bikonischen Antenne wurde die Drei-Antennen-Methode über leitender Ebene mit Variation der Höhe nach ANSI C63.5 gewählt.

Die Parameter für den Messaufbau sind:

Polarisation:	horizontal
Abstand:	10 m
Feste Höhe h_1:	2 m
Variable Höhe h_2:	1m bis 4 m

Anwendung der Definitionsgleichung für die Messunsicherheit für den Gewinn Gl. 8 und Antennenfaktor Gl. 6 liefert die Standardmessunsicherheit

$$G = \frac{\left(\frac{4pD}{l}\right)}{\sqrt{C_{\max}}} \cdot \frac{T_{23}}{T_{12}T_{31}} \qquad AF = \frac{9{,}73}{l\sqrt{G}}$$

$$u_G = \sqrt{u_{L0}{}^2 + \left(\frac{1}{2}u_C\right)^2 + 3 \cdot u_T{}^2} \qquad u_{AF} = \sqrt{u_f^2 + \left(\frac{1}{2}u_G\right)^2}$$

Folgende Einzelbeiträge und Einflußgrößen werden berücksichtigt:

Übertragungsmessung u_T

- Meßgeräteunsicherheit Netzwerkanalysator NWA incl. Temperaturdrift
- Wiederholbarkeit
- Kabel
- Verkopplungen mit Boden, höhenabhängig
- Verkopplung mit zweiter Antenne

Freiraumdämpfung u_{L0}

- Positionierunsicherheit in Höhe, Ausrichtung Hauptstrahlrichtung
- Positionierunsicherheit Abstand

Überhöhungsfaktor u_C

- Nichtberücksichtigung der Eigendiagramme
- Realer Boden

Bei der Bestimmung des Antennenfaktors tritt eine zusätzliche Frequenzeinstell-unsicherheit u_f auf.

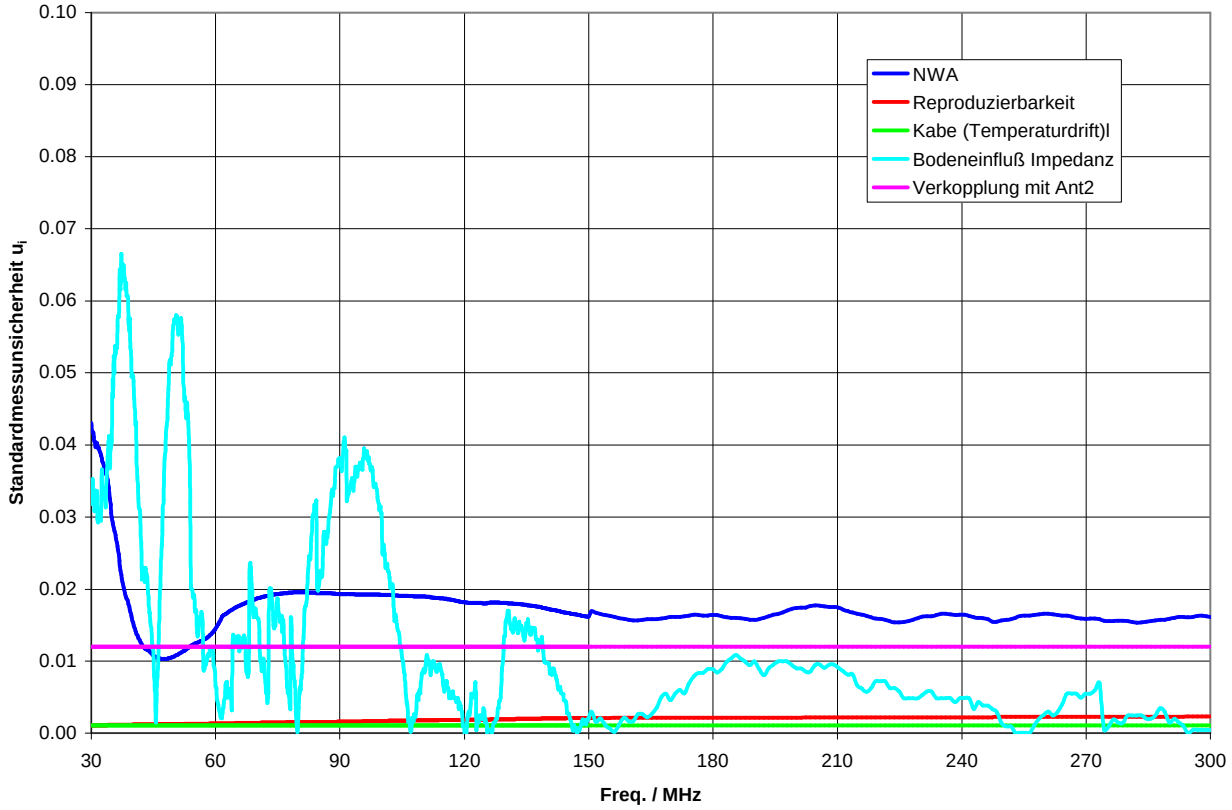

Abb. 2: Standardmessunsicherheit der Einzelbeiträge Transmissionsmessung

NWA:
Nach Vorgabe Messgerätehersteller unter Beachtung der gemessenen Reflektionsfaktoren und der vorhandenen Kabeldämpfungen; Normalverteilt

Reproduzierbarkeit:
Aus verschiedenen Veröffentlichungen und eigenen Messreihen; Rechteckverteilt

Kabel:
Temperaturdrift nach Herstellerangaben, ?? = $\pm$ 2° C; Dauer Messzyklus ca. 1 h; Rechteckverteilt

Bodeneinfluß durch Verkopplung:
Durch Wahl der Polarisation durch Höhenabhängigkeit der Impedanz bestimmt, Messung VSWR als Funktion der Höhe, minimale und maximale Abweichung zu Freiraum-VSWR, daraus über gerechneten Vergleich des S_{21} mit verschiedenen Reflexionsfaktoren maximale Abweichung; Rechteckverteilt

Verkopplung mit zweiter Antenne:
Aus Literatur und Vergleich mit eigenen Simulationen; Rechteckverteilt

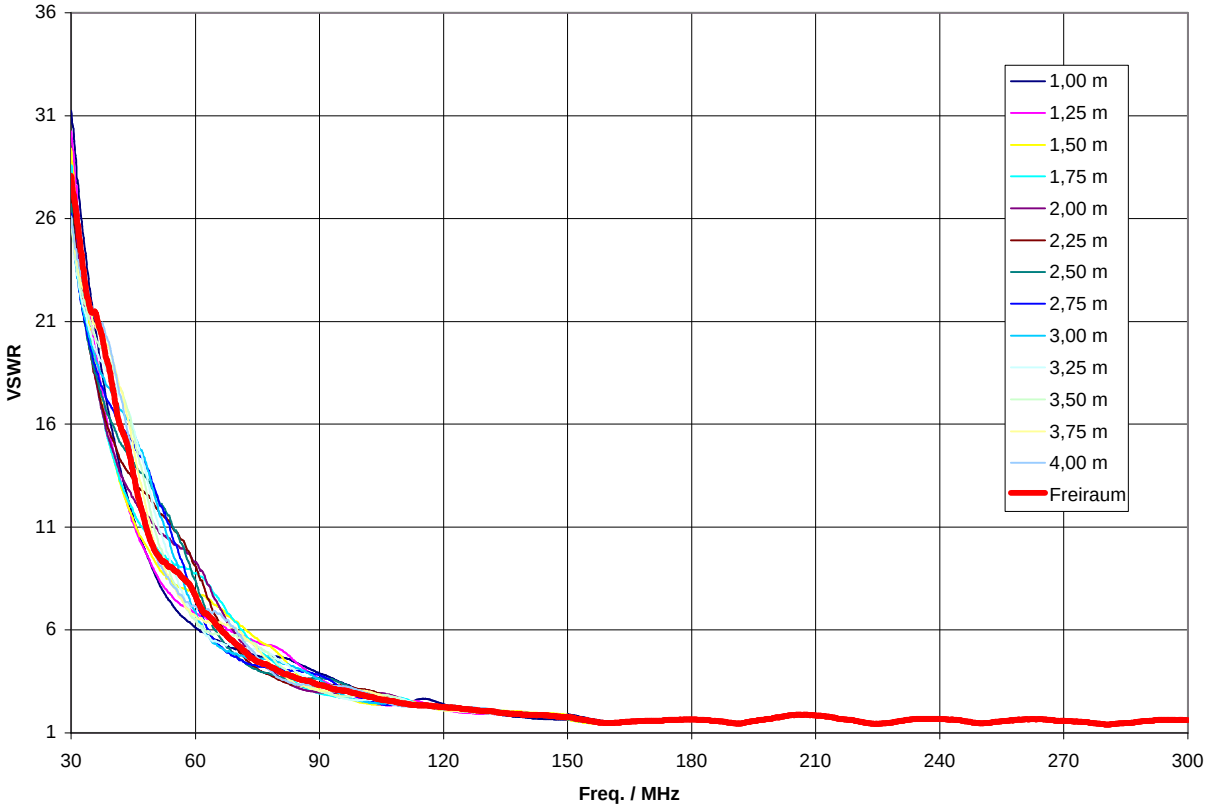

Abb.3: Höhenabhängigkeit VSWR bei horizontaler Polarisation und VSWR bei vertikaler Polarisation in großer Höhe

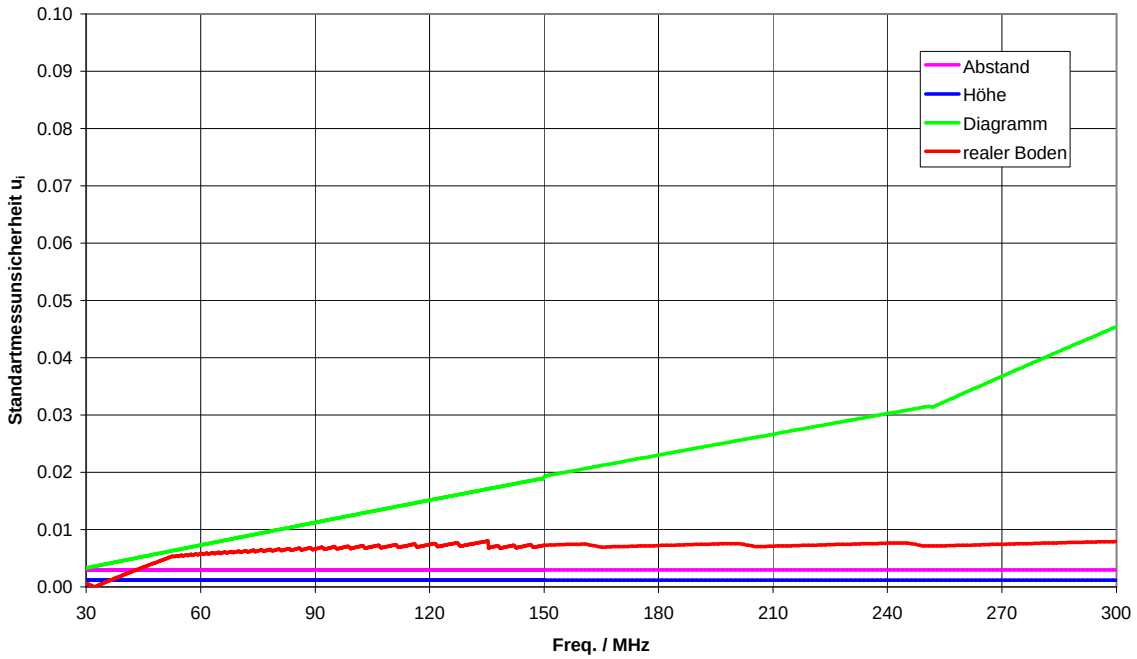

Abb.4: Standardmessunsicherheit der Einzelbeiträge Freiraumdämpfung und Überhöhungsfaktor

Abstand:
Aus Messunsicherheit des Abstandes von ?D = ± 0,05 m; Rechteckverteilt

Höhe und Ausrichtung:
Aus Messunsicherheit der Höhe von ?h = ± 0,02 m und ungenauer Ausrichtung mit gemessenen Diagrammwerten im Winkelbereich von ± 0,5 °; Rechteckverteilt

Einfluß Diagramm:
Aus gemessener Unrundheit; Rechteckverteilung

Realer Boden:
Modifizierte Gl. für C_{max} (? > < -1), aus Vergleich mit C_{max} nach Gl. 7,maximale Abweichung; Rechteckverteilt

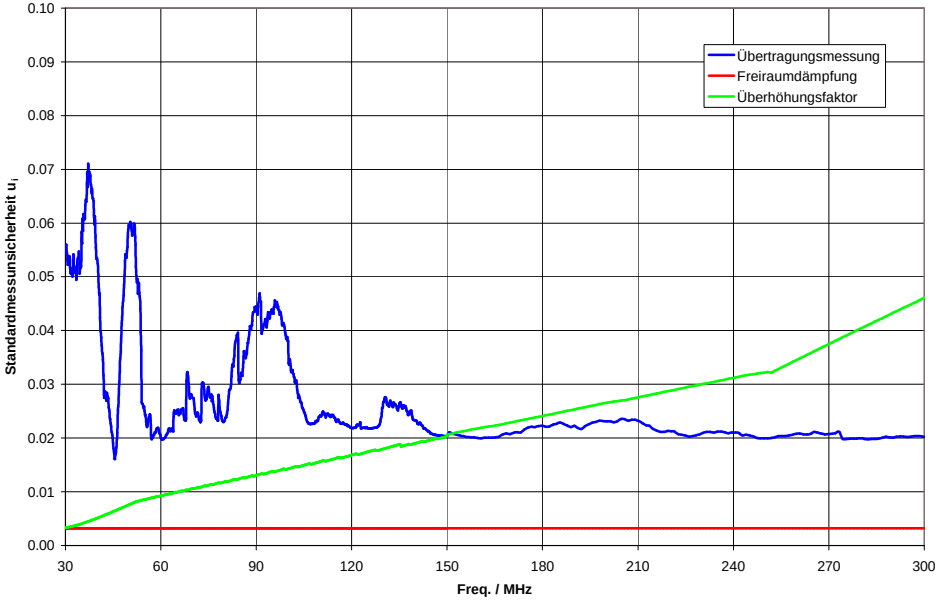

Abb. 5: Standartmessunsicherheit von Übertragungsmesung, Freiraumdämpfung und Überhöhungsfaktor

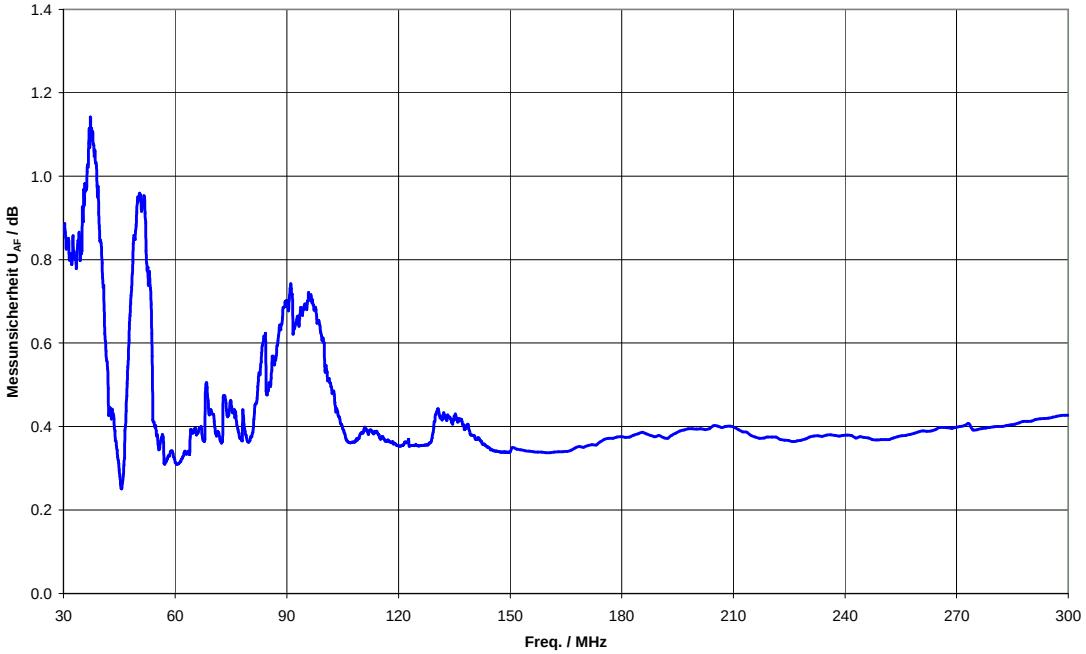

Abb. 6: Kombinierte und erweiterte Messunsicherheit des Antennenfaktors, k=2

Beispiel 2: LPDA 200 MHz bis 2000 MHz

Für die Ermittlung des Antennenfaktors einer LPDA wurde die Drei-Antennen-Methode in relaiv großer Höhe mit fester Höheneinstellung nach CISPR 16-1 gewählt.

Die Parameter für den Messaufbau sind:

Polarisation:	vertikal
Abstand D_0:	3,5 m
Feste Höhe h:	5,5 m

Bezug des Antennenfaktors auf das Phasenzentrum

Anwendung der Definitionsgleichung für die Messunsicherheit für den Gewinn Gl. 5 und Antennenfaktor Gl. 6 liefert die Standardmessunsicherheit

$$G = \left(\frac{4pD(f)}{l} \right) \frac{T_{23}}{T_{13}T_{31}}$$

$$AF = \frac{9{,}73}{l\sqrt{G}}$$

$$D(f) = D_0 - 1{,}31m + \frac{250}{f_{MHz}}$$

$$u_G = \sqrt{u_{L0}{}^2 + 3 \cdot u_T{}^2}$$

$$u_{AF} = \sqrt{u_f^2 + \left(\frac{1}{2} u_G \right)^2}$$

Folgende Einzelbeiträge und Einflußgrößen werden berücksichtigt:

Übertragungsmessung u_T

- Meßgeräteunsicherheit Netzwerkanalysator NWA incl. Temperaturdrift
- Wiederholbarkeit
- Kabel
- Bodenreflexionen
- Verkopplung mit zweiter Antenne

Freiraumdämpfung u_{L0}

- Positionierunsicherheit in Höhe, Ausrichtung Hauptstrahlrichtung
- Positionierunsicherheit Abstand
- Unsicherheit des Ortes des Phasenzentrums

Bei der Bestimmung des Antennenfaktors tritt eine zusätzliche Frequenzeinstell-unsicherheit u_f auf.

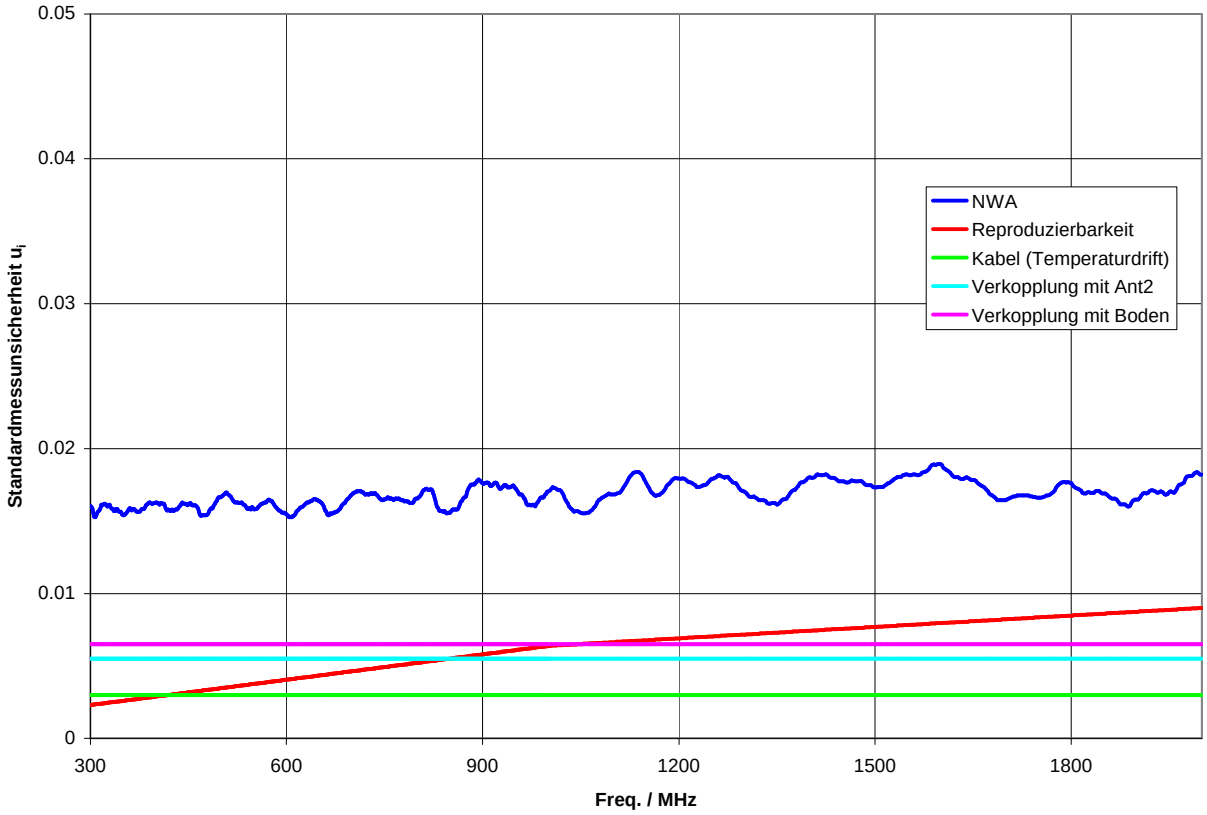

Abb. 7: Standardmessunsicherheit der Einzelbeiträge Transmissionsmessung

NWA:
Nach Vorgabe Messgerätehersteller unter Beachtung der gemessenen Reflektionsfaktoren und der vorhandenen Kabeldämpfungen; Normalverteilt

Reproduzierbarkeit:
Aus verschiedenen Veröffentlichungen und eigenen Messreihen; Rechteckverteilt

Kabel:
Temperaturdrift nach Herstellerangaben, ?? = $\pm$ 2° C; Dauer Messzyklus ca. 1 h; Rechteckverteilt

Bodeneinfluß durch Verkopplung, Verkopplung mit zweiter Antenne:
Durch Wahl der Polarisation, Abstand und Höhe nur gringer Einfluß, aus Literatur und Vergleich mit eigenen Simulationen; Rechteckverteilt

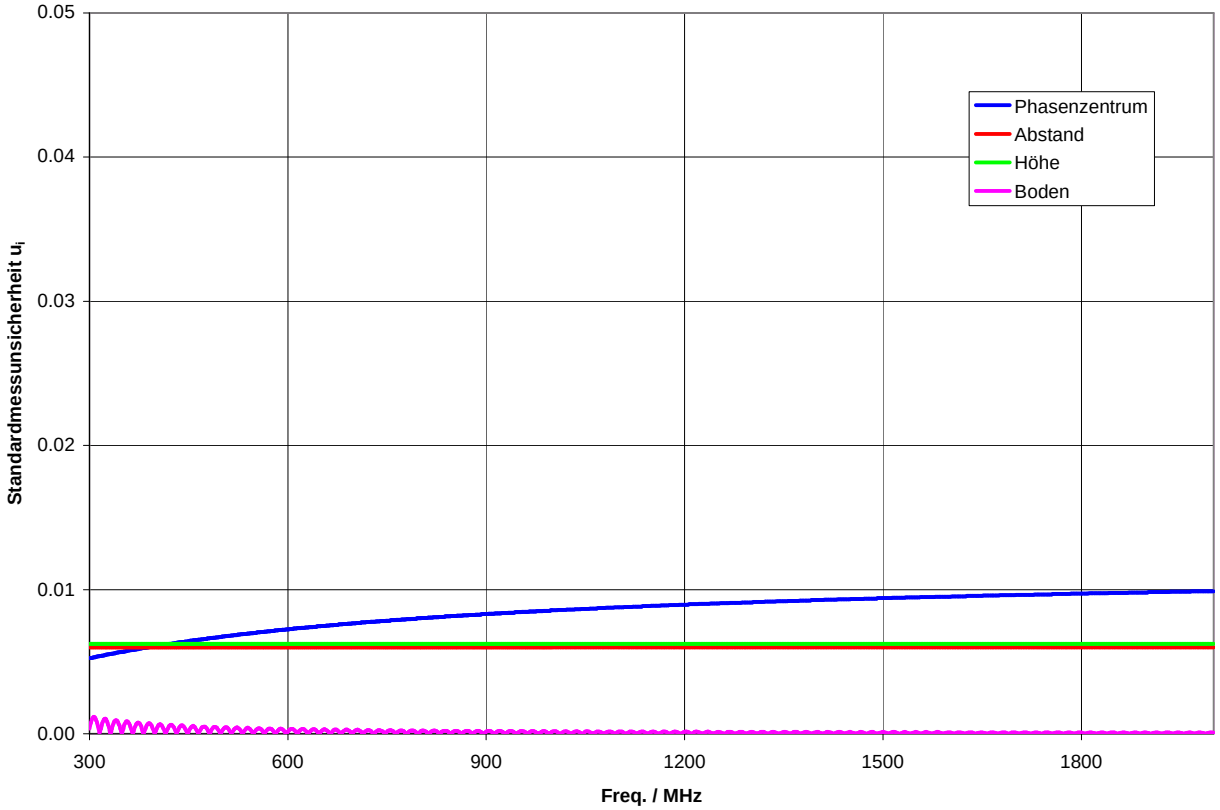

Abb. 8: Standardmessunsicherheit der Einzelbeiträge Freiraumdämpfung

Unsicherheit des Phasenzentrums:
Aus Unsicherheit von $\pm$ 0,02 m; Rechteckverteilt

Abstand:
Aus Messunsicherheit des Abstandes von ?D = $\pm$ 0,03 m; Rechteckverteilt

Höhe und Ausrichtung:
Aus Messunsicherheit der Höhe von ?h = $\pm$ 0,02 m und ungenauer Ausrichtung mit gemessenen Diagrammwerten im Winkelbereich von $\pm$ 1,5 °; Rechteckverteilt

Realer Boden:
Modifizierte Gl. für C_{max} (Überhöhungsfaktor für vertikale Polarisation mit ? für vertikale Polarisation) und Annahme von Vertikaldiagrammen mit cos-förmigem Verlaufau, maximale Abweichung; Rechteckverteilt

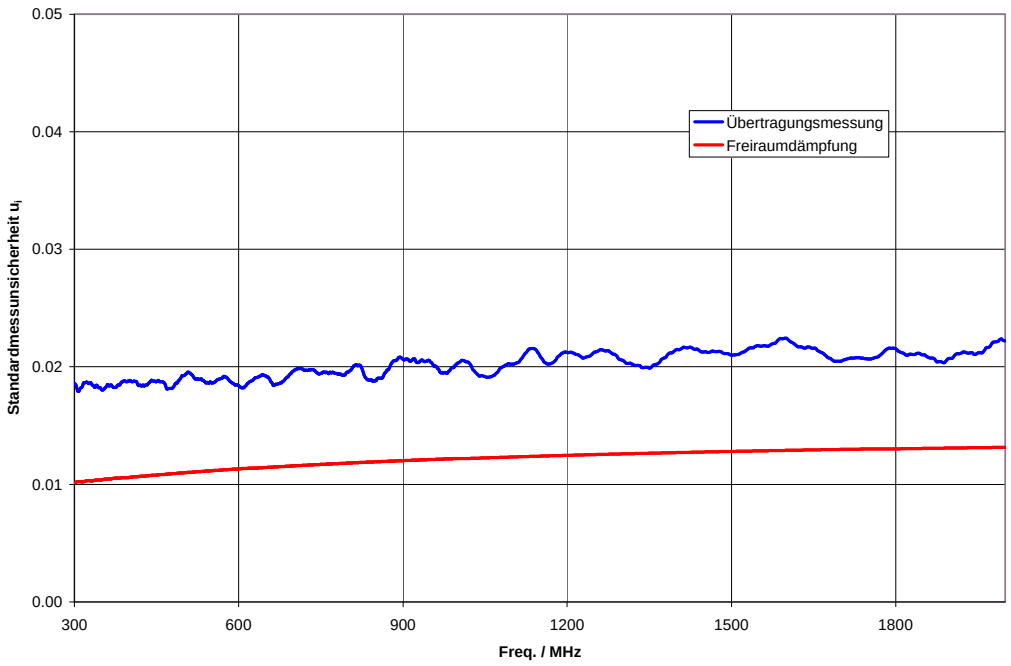

Abb. 9: Standartmessunsicherheit von Übertragungsmesung und Freiraumdämpfung

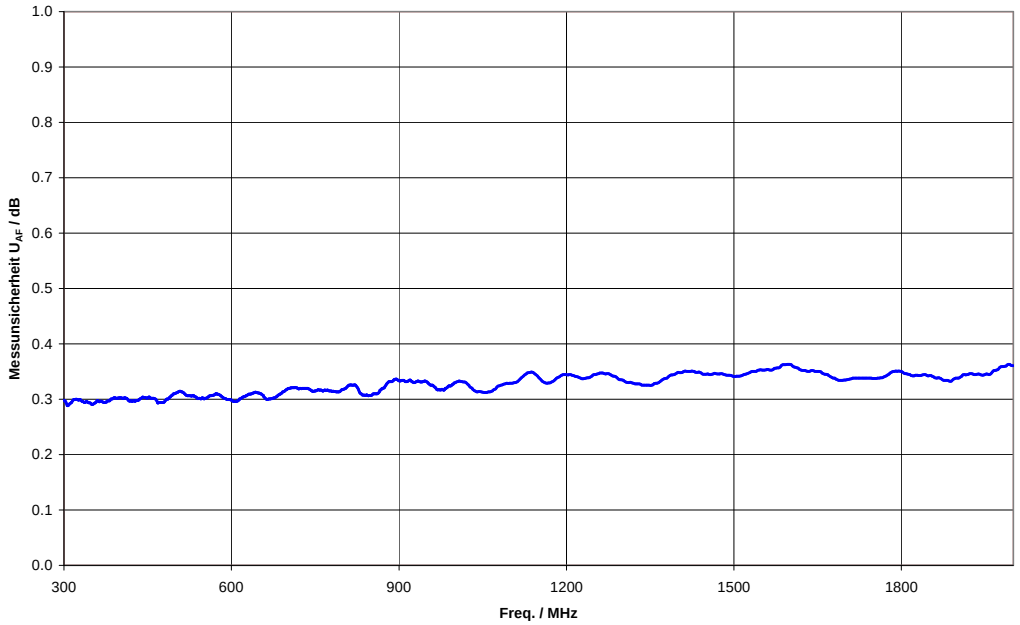

Abb. 10: Kombinierte und erweiterte Messunsicherheit des Antennenfaktors, k=2