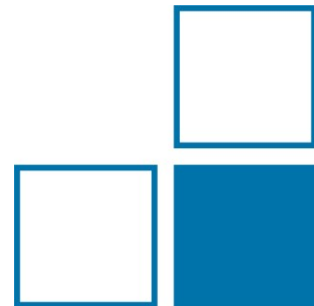
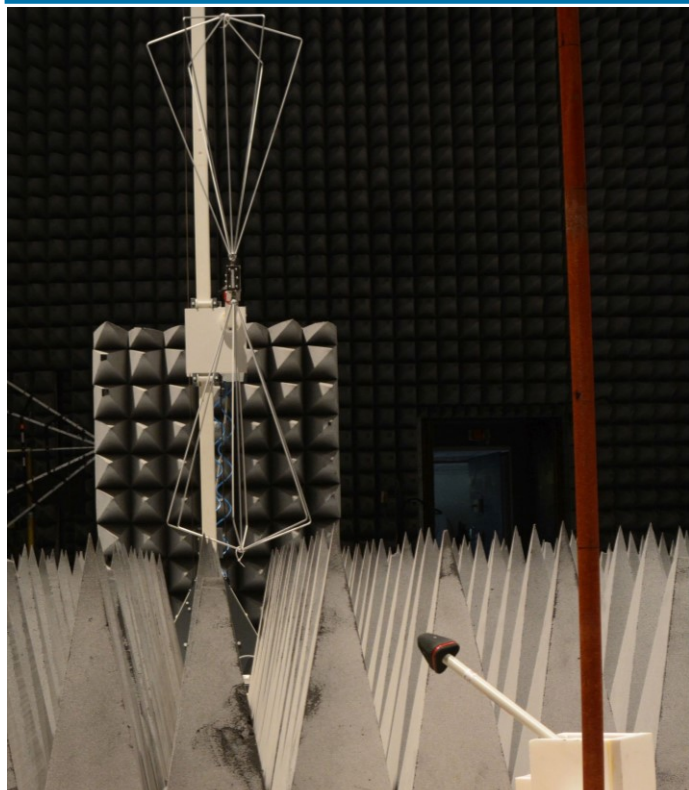


Messunsicherheitsanalyse bei der Kalibrierung von Feldsonden vor Antennen

Vorstellung einiger Teilaspekte

David Ulm, Kai Baaske und Thomas Kleine-Ostmann
FB2.2, Physikalisch-Technische Bundesanstalt





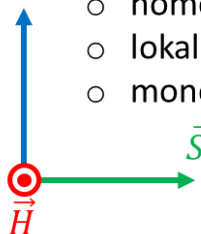
Messung der Gleichförmigkeit des E-Feldes
in einer EMV-Kammer mit E-Feldsonde



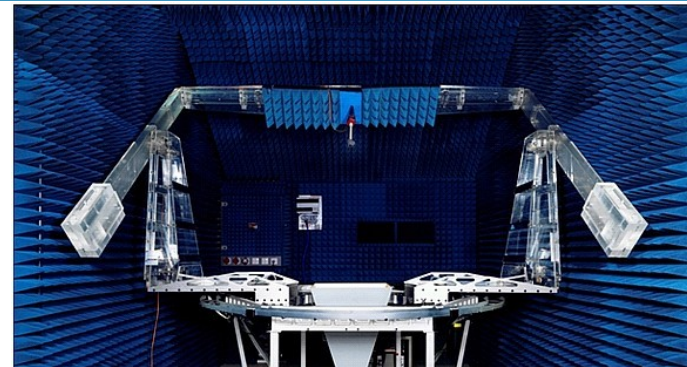
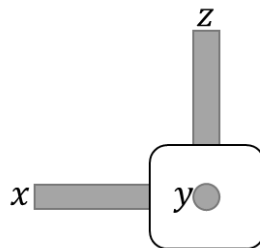
Schematische Darstellung der unterschiedlichen Feldsonden-Bauformen

- Kalibrierte Feldsonden werden unter Anderem im Bereich des Personenschutzes oder in der EMV (Störfestigkeit) benötigt
- Hierbei unterscheidet man Stielsonden mit direkt verbundenem Anzeigegerät/Auswerteeinheit und kleine, isotrope Feldsonden

Anregung mit:

- linear polarisierter,
 - homogener,
 - lokal ebener,
 - monofrequenter TEM-Welle.
- 

E-Feldsonde



Kalibrierung einer Feldsonde soll Anwender die Bestimmung der Effektivwert-Feldstärke in unbekannten Feldstrukturen erlauben [1]:

$$E_{RMS} = \sqrt{(CF_x \cdot E_{indic,x})^2 + (CF_y \cdot E_{indic,y})^2 + (CF_z \cdot E_{indic,z})^2}$$

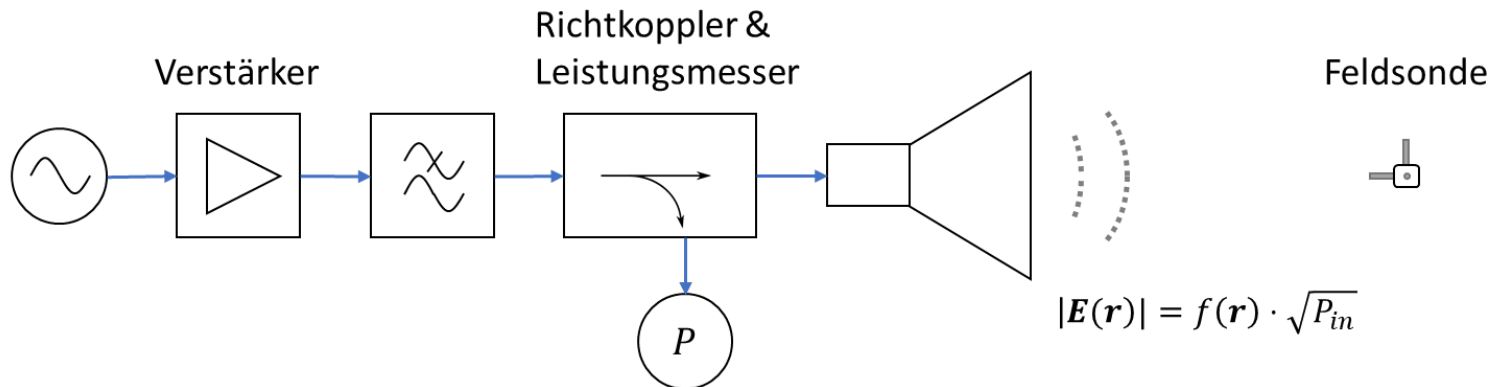
Der Frequenzgang-Korrekturfaktor CF der Einzelantennen berechnet sich hierbei als Verhältnis von angelegter E_{true} und angezeigter Feldstärke (der parallelen Achse) $E_{indic,\parallel}$:

$$CF_{\parallel} = \frac{E_{true}}{E_{indic,\parallel}}$$

Signalgenerator

Tiefpass

Antenne



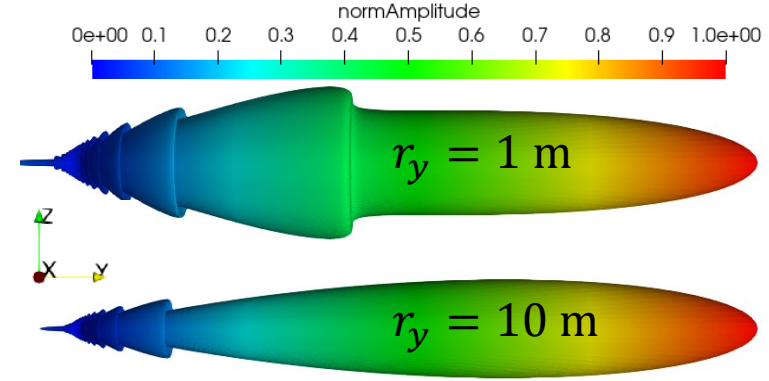
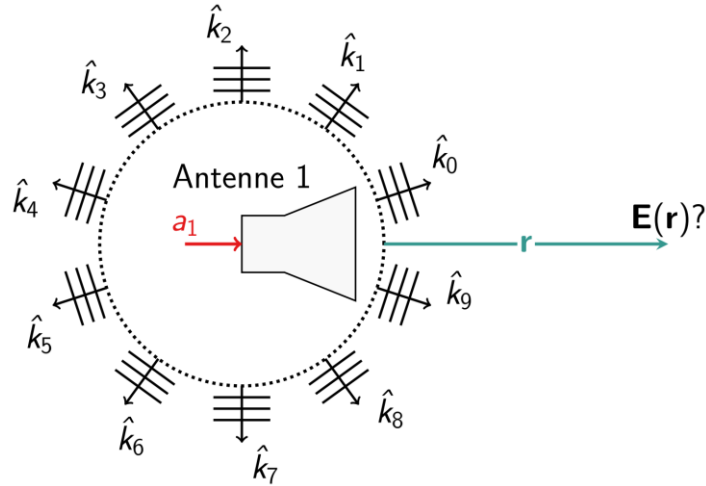
Die vereinfachte Modellgleichung zur Berechnung des Kalibrierfaktors lautet:

Antennenkalibrierung Inhomogenität

Stehwellen zusätzliche Inhomogenität in „PS“

$$CF_{\parallel} = \frac{E_{true}}{E_{indic,\parallel}} = \frac{E \cdot k_{swr} \cdot k_{inhom} \cdot k_{PS} \cdot \dots}{E_{indic,\parallel} \dots}$$

Berechnung der elektrischen Feldstärke



Form des Translationsoperators $T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r})$ für verschiedene Abstände bei konstantem L und \mathbf{k}

Elektrische Feldstärke als Überlagerung mehrerer (transversal-elektrischer) ebener Wellen [2]:

$$\frac{\mathbf{E}(\mathbf{r})}{a_1} = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot \underbrace{(I - \hat{k}\hat{k}) \cdot \tilde{\mathbf{E}}_1(\hat{k})}_{\text{ebene Wellen}} d\hat{k}, \text{ mit } |a_1| = \sqrt{P_{in}}$$

Asymptotisches Verhalten des Translationsoperators:

$$\lim_{|\mathbf{r}| \rightarrow \infty} T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot \frac{|\mathbf{r}|}{\exp(-jk|\mathbf{r}|)} = \delta(\hat{k} - \hat{r})$$

- Die Bestimmung der Amplitude und Phasenlage der ebenen Wellen kann mit Hilfe einer NFFF-Transformation erfolgen (Nachteil: Messaufwand) [3]
- Im Fernfeld lässt sich der Betrag der elektrischen Feldstärke mit Hilfe des Gewinns \tilde{G}_1 der Antenne berechnen:

$$|E_1| = \sqrt{\frac{\tilde{G}_1 \cdot Z_F}{4\pi r^2}} \cdot \sqrt{P_{in}} \quad \rightarrow \quad \sqrt{\tilde{G}_1} = \sqrt{\frac{4\pi r^2}{Z_F}} \cdot \frac{|E_1|}{\sqrt{P_{in}}}$$

- Die Kalibrierung des Antennengewinns kann hier mit Hilfe der Friis-Gleichung erfolgen:

$$|s_{21}| = \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right) \cdot \sqrt{G_2} \cdot \sqrt{\tilde{G}_1} = \frac{\lambda}{\sqrt{4\pi Z_F}} \cdot \sqrt{G_2} \cdot \frac{|E_1|}{\sqrt{P_{in}}}$$

→ Wenn der Betrag des Transmissionsfaktors proportional zu $\frac{|E_1|}{\sqrt{P_{in}}}$ ist, darf die Friis-Gleichung auch im Nahfeld zur Kalibrierung des „Nahfeld-Gewinns“ \tilde{G}_1 eingesetzt werden!

Direktes Messverfahren

Unter welcher Voraussetzung gilt $|s_{21}| \sim \frac{|E_1(\mathbf{r})|}{\sqrt{P_{in}}}$?

$$\frac{E_1(\mathbf{r})}{\sqrt{P_{in}}} \sim \oint T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot (I - \hat{k}\hat{k}) \cdot \tilde{E}_1(\hat{k}) d\hat{k}$$

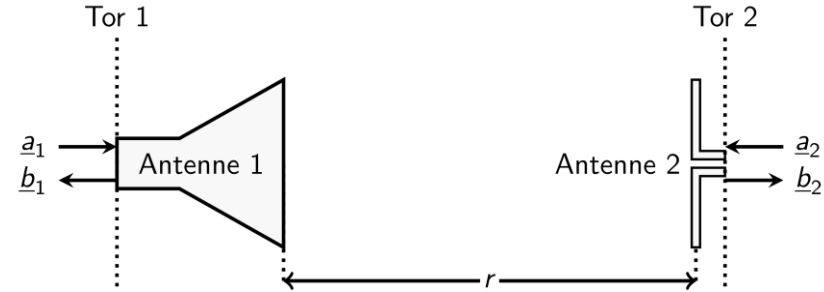
$$s_{21} \sim \oint \tilde{E}_2(-\hat{k}) \cdot T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m) \cdot (I - \hat{k}\hat{k}) \cdot \tilde{E}_1(\hat{k}) d\hat{k}$$

Exakt nur für isotrope Antennen, aber bei dipolartiger Antennencharakteristik gilt:

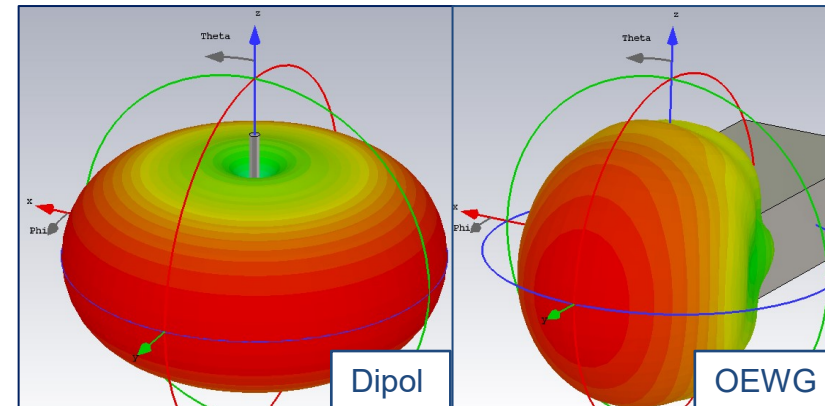
$$\tilde{E}_2(-\hat{k}) \sim \mathbf{e}_\theta \cdot \sin(k_\theta) \Rightarrow |s_{21}| \sim \frac{|E_{1z}(\mathbf{r})|}{\sqrt{P_{in}}}$$

Geeignete (reale) Antennentypen sind z.B.:

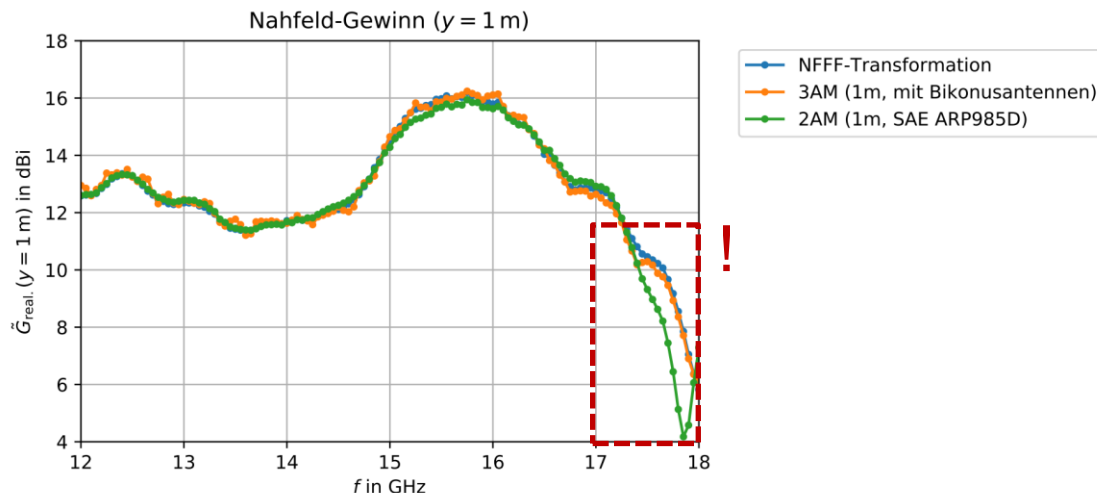
Dipol, Bikonus-Antenne, Open-Ended Waveguide



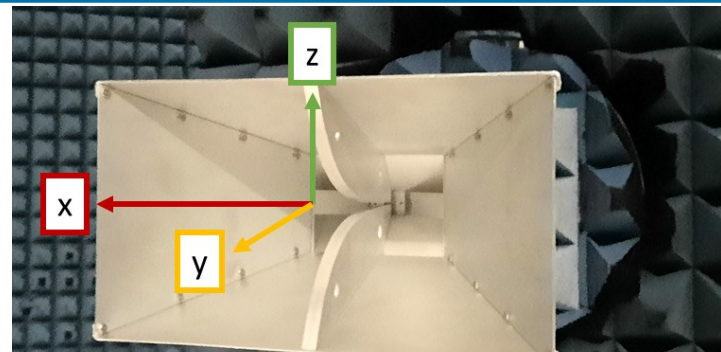
Aufbau zur direkten Messung des NF-Gewinns \tilde{G}_1



Warnendes Beispiel

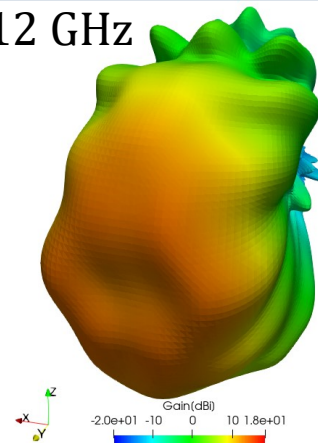


- NFFF-Transformation & direkte Messung mit jeweils 2 weiteren Bikonus-Antenne liefern gute Übereinstimmung
- Kalibrierung mit Zwei-Antennen-Methode gemäß SAE ARP985D weicht aufgrund von Nebenkeulen hier um bis zu $\Delta \tilde{G}_{\max} = 3,7$ dB von NFFF-Trafo ab (siehe auch [4])

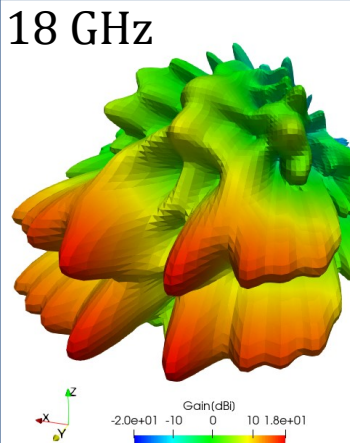


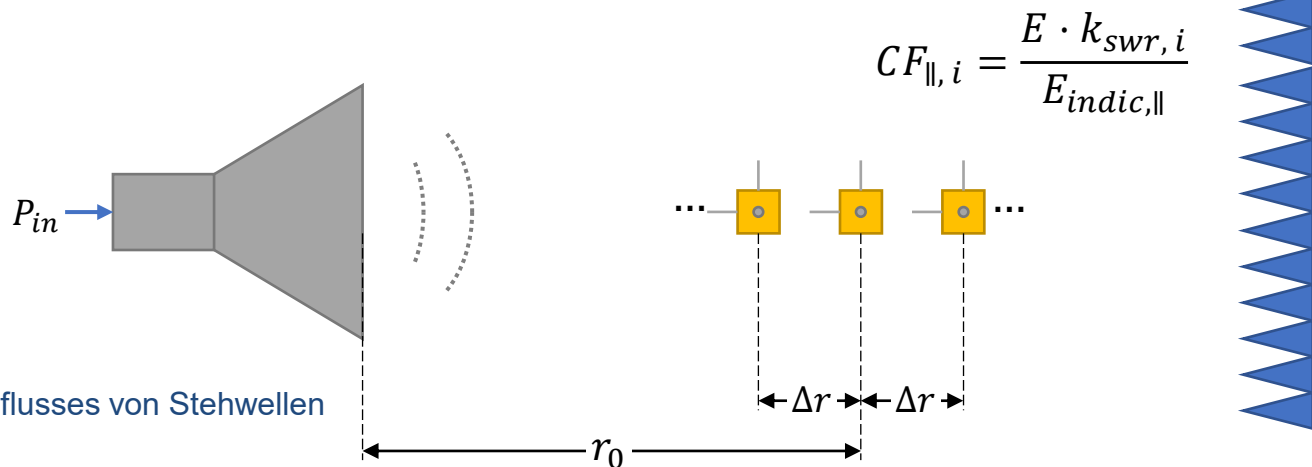
Schwarzbek BBHA9120D und transformierte (gemessene) Fernfelder

12 GHz



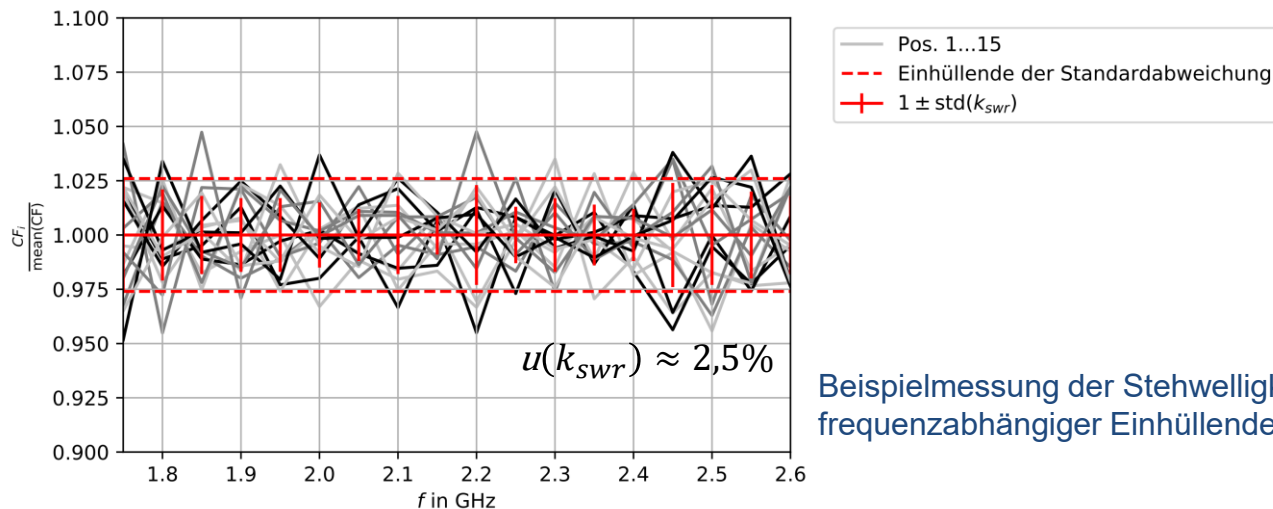
18 GHz





Messaufbau zur Bestimmung des Einflusses von Stehwellen nach DIN EN 61000-4-3 [5]

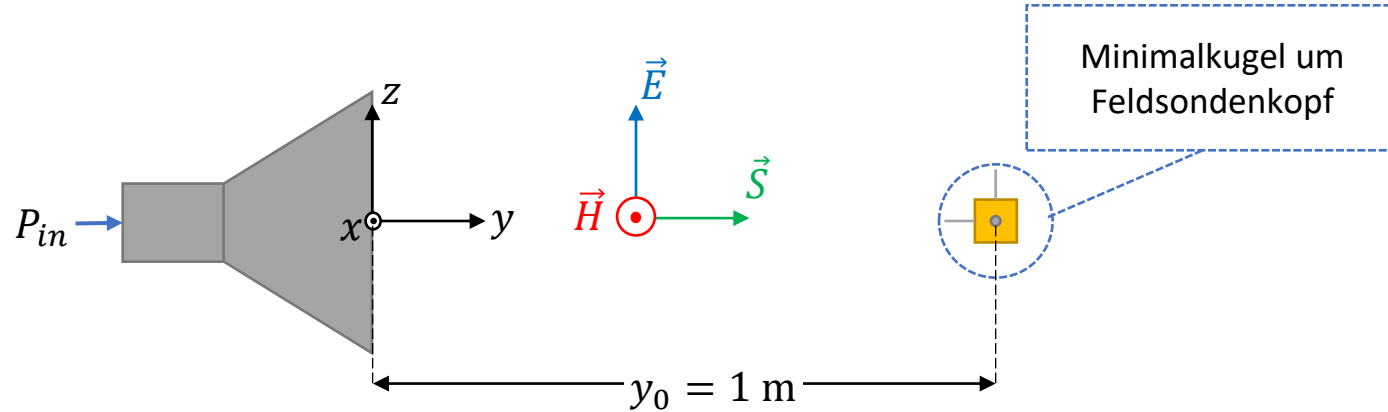
- Kalibrierte Antenne erlaubt Prognose der elektrischen Feldstärke im Freiraum
→ Bestimmung des Einflusses von Stehwelligkeit durch Positionsvariierung einer Feldsonde (oder einer Bikonus-Antenne) entlang der Hauptachse
- Die Messpositionen muss hierbei so gewählt sein, dass der Einfluss der signifikanten Reflexionspfade detektiert werden kann
- Schwierigkeiten: Positioniergenauigkeit & Messaufwand



Beispielmessung der Stehwelligkeit für $0,9 \text{ m} \leq r \leq 1,2$ und $\Delta r = 2 \text{ cm}$ mit frequenzabhängiger Einhüllenden (Raster nach DIN EN 61000-4-3)

- Direkte Messung der Amplitude des Reflexionssignals ist bei hohen Frequenzen schwierig.
- Aber: Bei einer hinreichend großen Anzahl von Messpunkten ist eine Typ-A Messunsicherheitsbestimmung möglich:

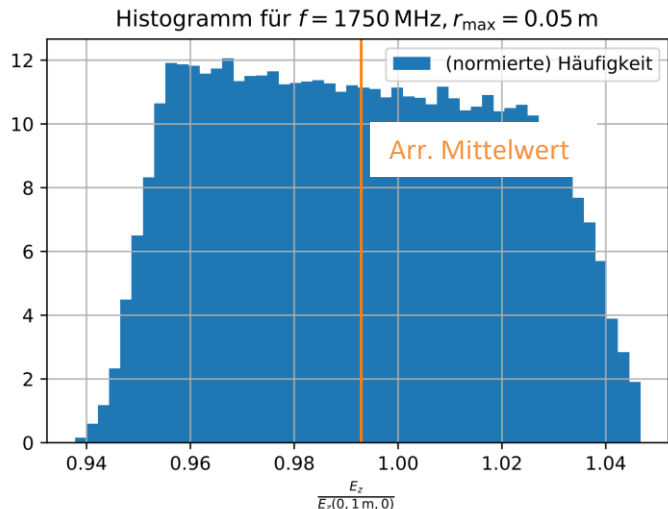
$$CF_{\parallel, i} = \frac{E \cdot k_{swr, i}}{E_{indic, \parallel}} \Rightarrow u(k_{swr}) = \frac{\text{std}(CF_{\parallel, i})}{\text{mean}(CF_{\parallel, i})}$$



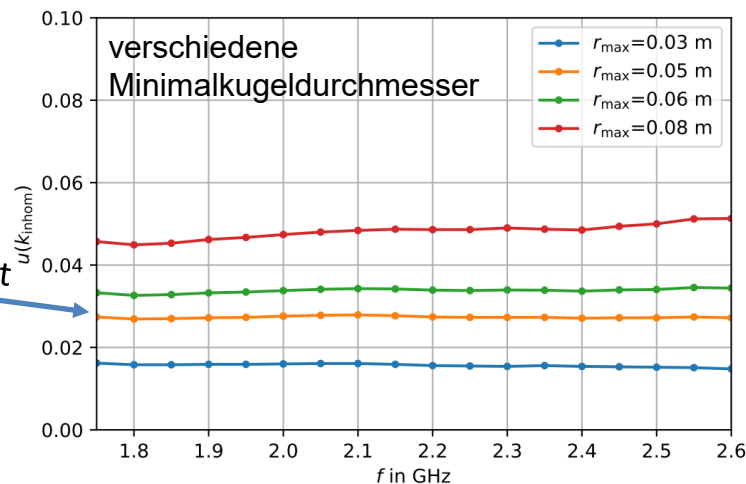
Skizze zur Definition der Minimalkugel um Feldsondenkopf

- Feldsonde gewichtet Felder innerhalb des Sondenkopfes zum Anzeigewert
- Die Standardmessunsicherheit des Inhomogenitätsfaktors k_{inhom} lässt sich aus der Variation der Feldstärke innerhalb einer Minimalkugel, welche den Sondenkopf umschließt, ermitteln
- Dieses Schätzverfahren ist auch zur Beurteilung der Sensitivität gegenüber Positionierungsfehler geeignet

Beispiel (pyramidale Hornantenne)



Berechnung der
Standardunsicherheit



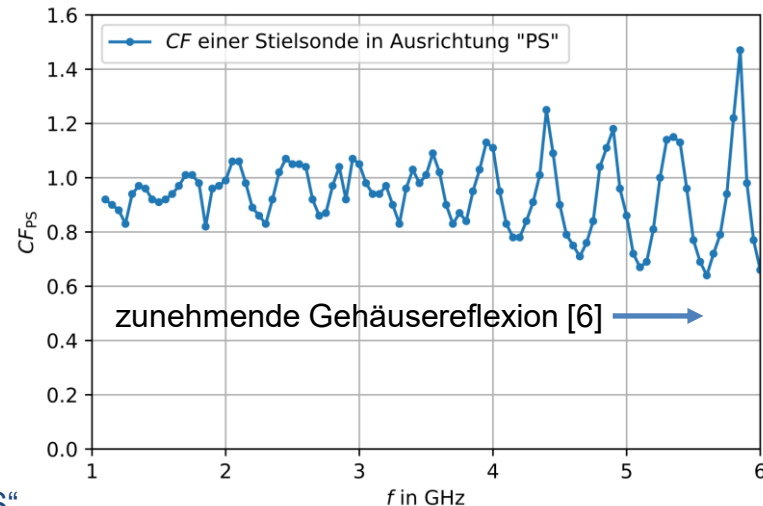
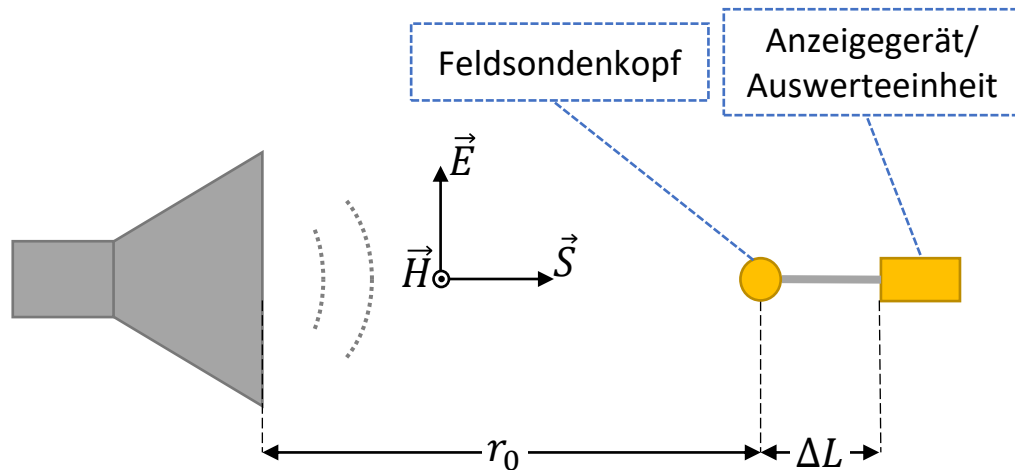
Exemplarische Auswertung für verschiedene Sondengrößen einer pyramidalen Hornantenne für $x_0 = 0$ m, $y_0 = 1$ m, $z_0 = 0$ m

Die Standardunsicherheit des Inhomogenitätsfaktors berechnet sich bei Kenntnis des Radius des Sondenkopfes r_{\max} durch:

$$u(k_{inhom}) = \sqrt{\text{std}\left(\frac{E_z(x, y, z)}{E_z(x_0, y_0, z_0)}\right)^2 + \text{mean}\left(\frac{E_z(x, y, z)}{E_z(x_0, y_0, z_0)} - 1\right)^2},$$

$$\left\{x, y, z \mid \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \leq r_{\max}\right\}$$

Inhomogenität in Ausrichtung „PS“



Skizze zur Motivation der zusätzlichen Inhomogenität bei Ausrichtung in „PS“

- Bei einigen Sonden ist der Feldsondenkopf über einen Stiel direkt mit einem Anzeigegerät verbunden
- Stielsonden werden unter Anderem in der Ausrichtung „PS“ (Stiel parallel zum Poynting-Vektor \vec{S}) kalibriert, um die Anisotropie der Feldsonde in unbekannten Feldstrukturen beurteilen zu können
- Die Behandlung der Feldinhomogenität gemäß vorherigem Abschnitt würde unrealistisch (und unbrauchbar) große Messunsicherheiten liefern

Inhomogenität in Ausrichtung „PS“

- Bei Anregung mit homogener ebener Welle ergibt sich der ideale Fernfeld-Kalibrierfaktor:

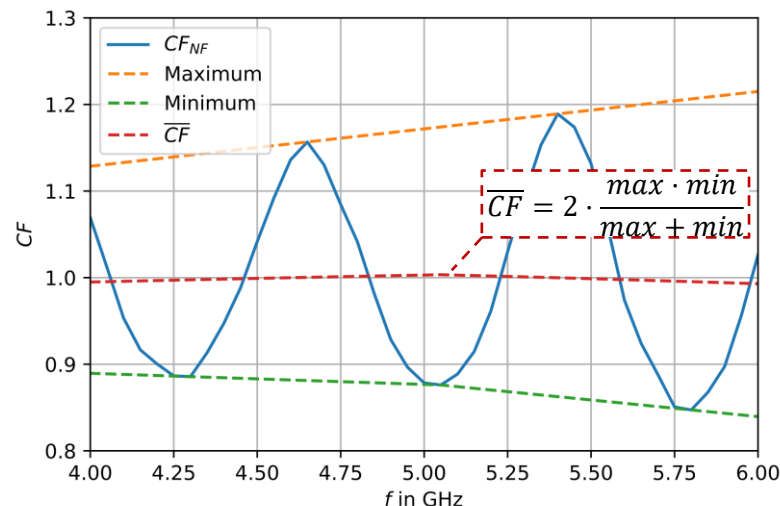
$$CF_{FF} = \frac{E_0}{E_{indic}} = \frac{E_0}{E_0 \cdot (k + k \cdot \Gamma)} = \frac{1}{k \cdot (1 + \Gamma)} = \frac{\overline{CF}}{1 + \Gamma}, \Gamma \in \mathbb{R}$$

- Im realen Messaufbauten ist die Distanz zwischen Feldsonde und Antenne für Fernfeldbedingungen zu gering, sodass die Amplitude der Gehäusereflexion zu gering ist:

$$CF_{NF} \approx \frac{\frac{E_0}{r_0}}{\left(k \cdot \frac{E_0}{r_0} + k \cdot \Gamma \cdot \frac{E_0}{r_0 + \Delta L}\right)} = \frac{\overline{CF}}{1 + \Gamma \cdot \frac{r_0}{r_0 + \Delta L}}$$

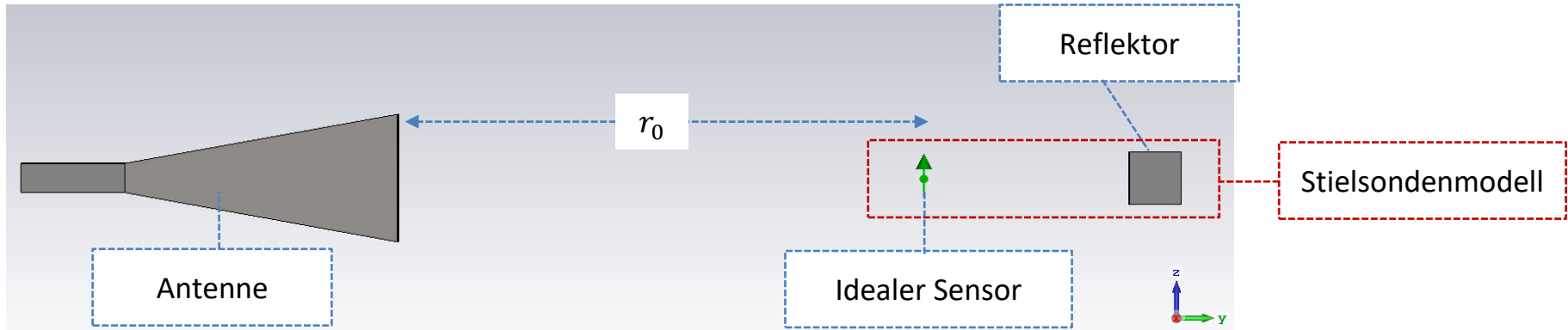
- Das Verhältnis beider Werte liefert den zusätzlichen Inhomogenitätsfaktor für die Ausrichtung „PS“:

$$k_{PS} = \frac{CF_{FF}}{CF_{NF}} \approx \frac{1 + \Gamma \cdot \frac{r_0}{r_0 + \Delta L}}{1 + \Gamma}$$



Simulierter Verlauf von CF_{NF} sowie hieraus geschätzter mittlerer Feldsonden-Kalibrierfaktor \overline{CF}

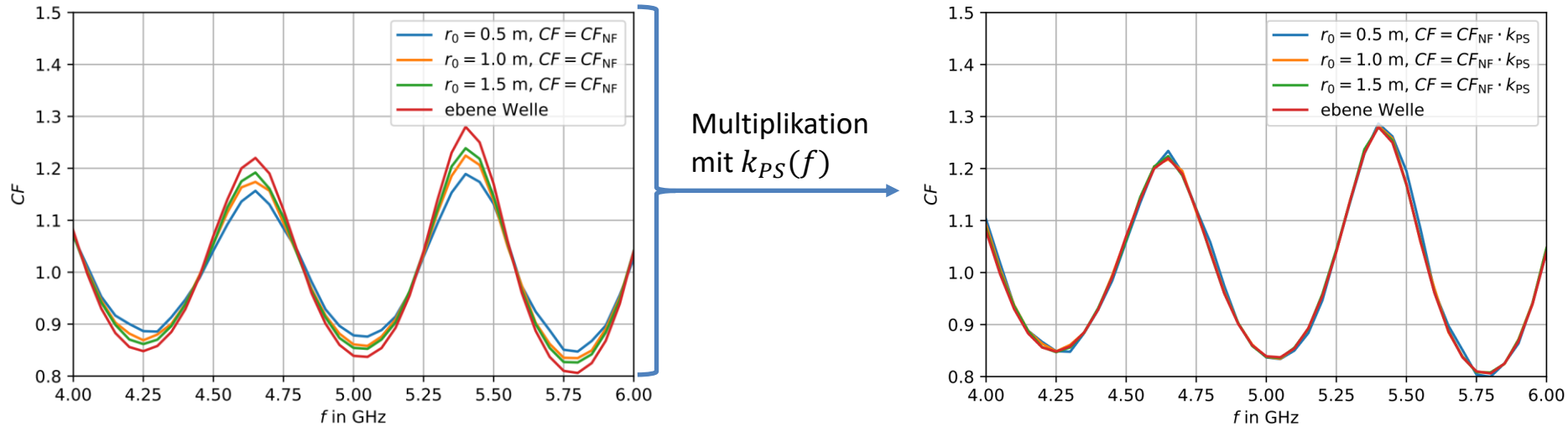
- Mit: \overline{CF} : Mittlerer Feldsonden-Kalibrierfaktor (ohne Anzeigegerät)
 Γ : Faktor zur Modellierung der Reflexion
 ΔL : Abstand zwischen Sondenkopf und Anzeigegerät
 r_0 : Abstand zwischen Antenne und Sondenkopf



Simulationsmodell zur Validierung des Verfahrens zur Bestimmung des Faktors k_{PS}

- Die Validierung des vorgestellten Ansatz erfolgt durch mittels EM-Simulation indem ein vereinfachtes Stielsondenmodell (bestehend aus PEC-Würfel und idealem Sensor) durch eine ideale ebene Welle sowie durch einen Hornstrahler in verschiedenen Distanzen r_0 angeregt wird.
- Vergleich zwischen korrigierten Kalibrierfaktoren und idealen Kalibrierfaktoren gibt Aufschluss über Leistungsfähigkeit des Verfahrens
- Simulation mittels CST MWS (MoM) und einer Stiellänge von $\Delta L = 20 \text{ cm}$

Simulations- und Korrekturergebnisse

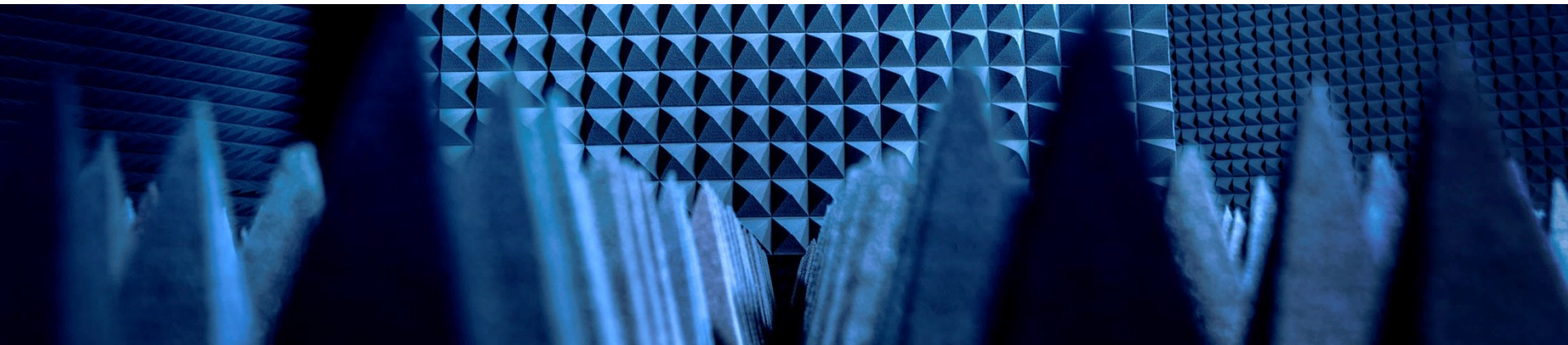


Simulierte Kalibrierfaktoren der Feldsonde vor und nach Anwendung des Korrekturverfahrens

- Verfahren erlaubt Schätzung des Einflusses der Abweichung von einer homogenen ebenen TEM-Welle
- Da Korrektur nicht exakt ist und hierfür bisher keine Unsicherheit ermittelt werden kann, wird die Schätzung des systematischen Fehlers lediglich zur Bestimmung der Standardunsicherheit genutzt:

$$u(k_{PS}) = |k_{PS} - 1|$$

- Verschiedene Messverfahren zur Schätzung der Messunsicherheit bei der Feldsonden-Kalibrierung vorgestellt
- Beurteilung der erreichbaren Messunsicherheit eines Feldsonde-Kalibriermessplatzes setzt eine qualitativ hochwertige Antennenkalibrierung voraus
- Beschreibungen der Messverfahren werden in den Normentwurf für eine neue Kalibriernorm IEC 61000-4-26 des DKE/GAK 767.4.3 „Feldsondenkalibrierung“ aufgenommen
- Ebenfalls aufgenommen werden Verfahren zur Kalibrierung des „Nahfeld-Antennengewinns“, da die bestehenden Antennenkalibriernormen nicht für die Messung dieser Größe geeignet sind



Fragen?



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

David Ulm

Telefon: 0531 592-2214

E-Mail: david.ulm@ptb.de

www.ptb.de

Stand: 04/21

- [1] "IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz," in *IEEE Std 1309-2013 (Revision of IEEE Std 1309-2005)* , vol., no., pp.1-111, 22 Nov. 2013, doi: 10.1109/IEEESTD.2013.6673999.
- [2] Schmidt, C.: *Effiziente Nahfeldmesstechnik für große Antennen, beliebige Messoberflächen und echobehaftete Messumgebungen*. Verlag Dr. Hut, 2010. – ISBN 9783868535037
- [3] D. Ulm, T. Kleine-Ostmann and T. Schrader, "Antenna calibration based on near-field to far-field transformation algorithms," *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Krakow, Poland, 2019, pp. 1-4.
- [4] Rodriguez, V. et al.: *A Calibration Method Using Interpolation to Reduce Measurement Errors in Electromagnetic Compatibility Measurements*. AMTA 2015
- [5] DIN EN 61000-4-3:2006 + A1:2008 + A2:2010: *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-3: Prüf- und Messverfahren – Prüfung der Störfestigkeit gegen hochfrequente elektromagnetische Felder*
- [6] R. Pape, T. Kleine-Ostmann und T. Schrader: *Erweiterte Bestimmung des 3D-Empfindlichkeitsdiagramms von Feldsonden*, 291. PTB Seminar, April 2015.