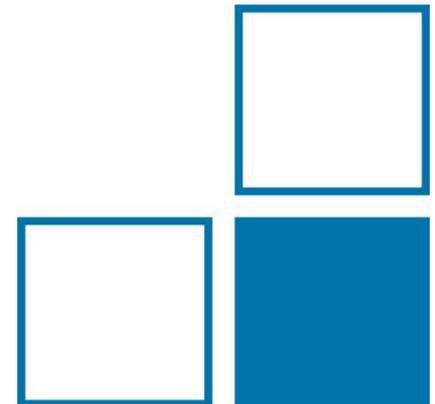


# **Aufbau einer Kalibrierdienstleistung für Antennen im Frequenzbereich $>1$ GHz**

David Ulm

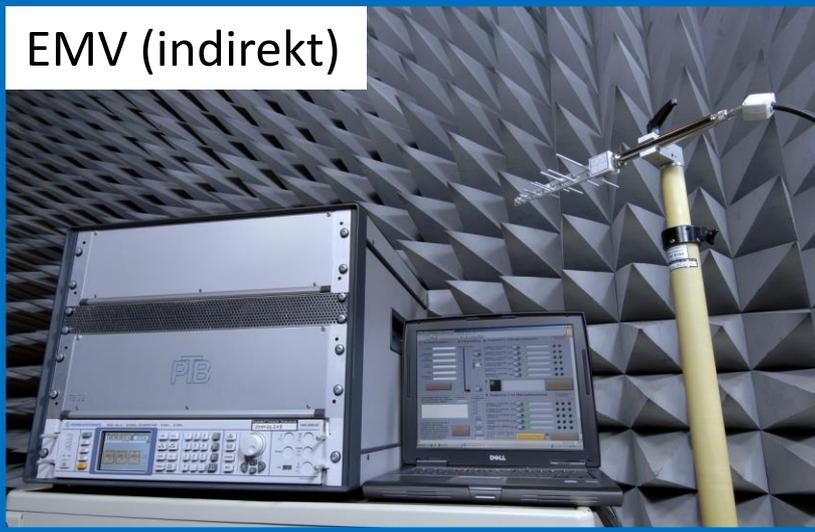
303. PTB-Seminar  
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

17. Mai 2017



1. Motivation
2. Fernfeld-Messtechnik
3. Extrapolation der Transmissionsmessung (NIST)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Berechnung der Messunsicherheit
4. Nah-Fernfeld-Transformation (TUM)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Vorstellung typischer Ergebnisse
5. Fazit

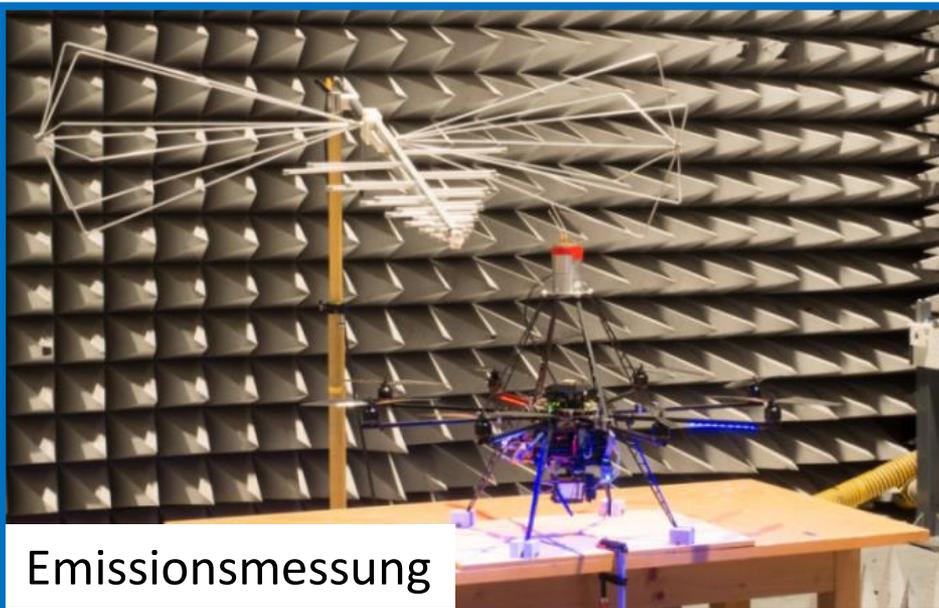
EMV (indirekt)



Felddarstellung



Emissionsmessung



On-Site-Messtechnik

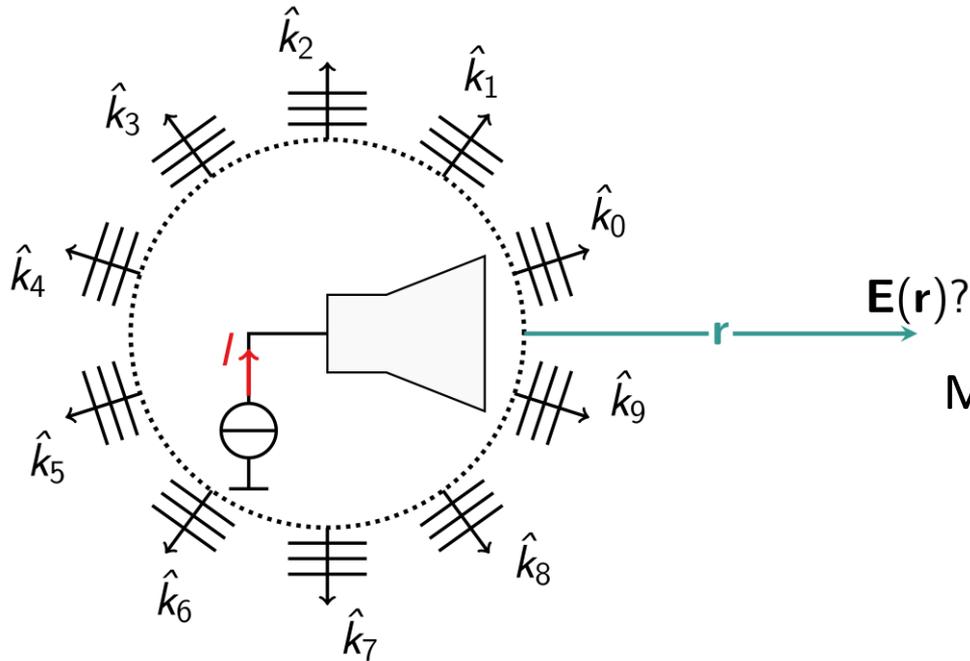


- Ziel des Vortrags:
  - Aufzeigen der Probleme von Fernfeld-Messtechnik
  - Vorstellung von zwei Nahfeld-Verfahren aus Anwendersicht



**sphärischer Antennenscanner der AG 2.21**  
**„Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik“, PTB**

# Motivation



Mit:  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ : ortsbezogene Feldstärke  
 $\tilde{\mathbf{E}}(\hat{\mathbf{k}})$ : normiertes Spektrum ebener Wellen  
 $\hat{\mathbf{k}}$ : normierter Wellenvektor

- Elektrische Feldstärke als Überlagerung mehrerer (transversal-elektrischer) ebener Wellen [1]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -I \cdot \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint\!\!\!\oint T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot \tilde{\mathbf{E}}(\hat{\mathbf{k}}) d\hat{\mathbf{k}}^2$$

- Asymptotisches Verhalten des Translationsoperators [1]:

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

1. Motivation
2. Fernfeld-Messtechnik
3. Extrapolation der Transmissionsmessung (NIST)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Berechnung der Messunsicherheit
4. Nah-Fernfeld-Transformation (TUM)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Vorstellung typischer Ergebnisse
5. Fazit

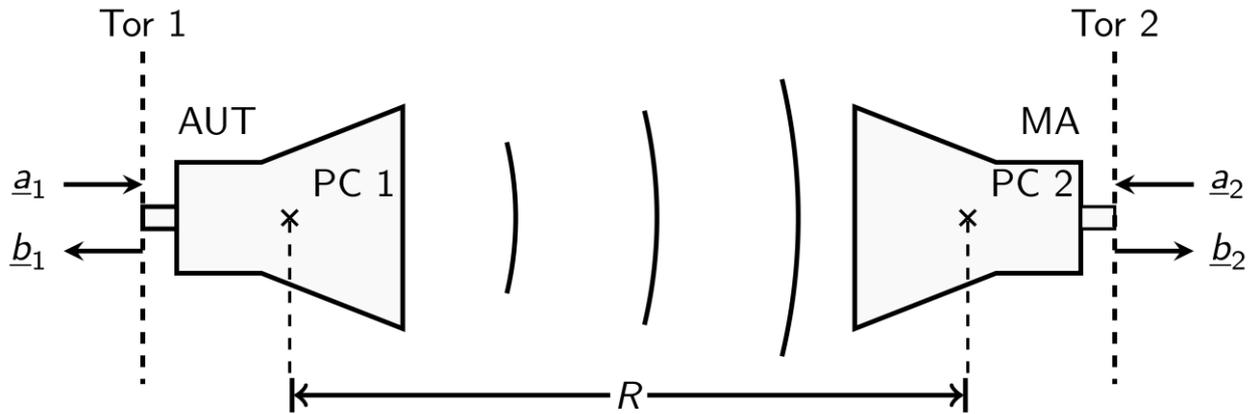


Abb.: Übertragungsstrecke zweier Antennen als Zweitor

- Kalibrierung der AUT durch Einsetzen in Übertragungsstrecke mit Messantenne (MA)
- Unter Fernfeldbedingungen gilt die Friis-Gleichung:

$$|S_{21}|^2 = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_{\text{AUT}} \cdot G_{\text{MA}}, \quad \text{mit } R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

- Messung des Richtdiagramms durch Drehung der AUT

# Einfluss durch Fernfeldverletzung

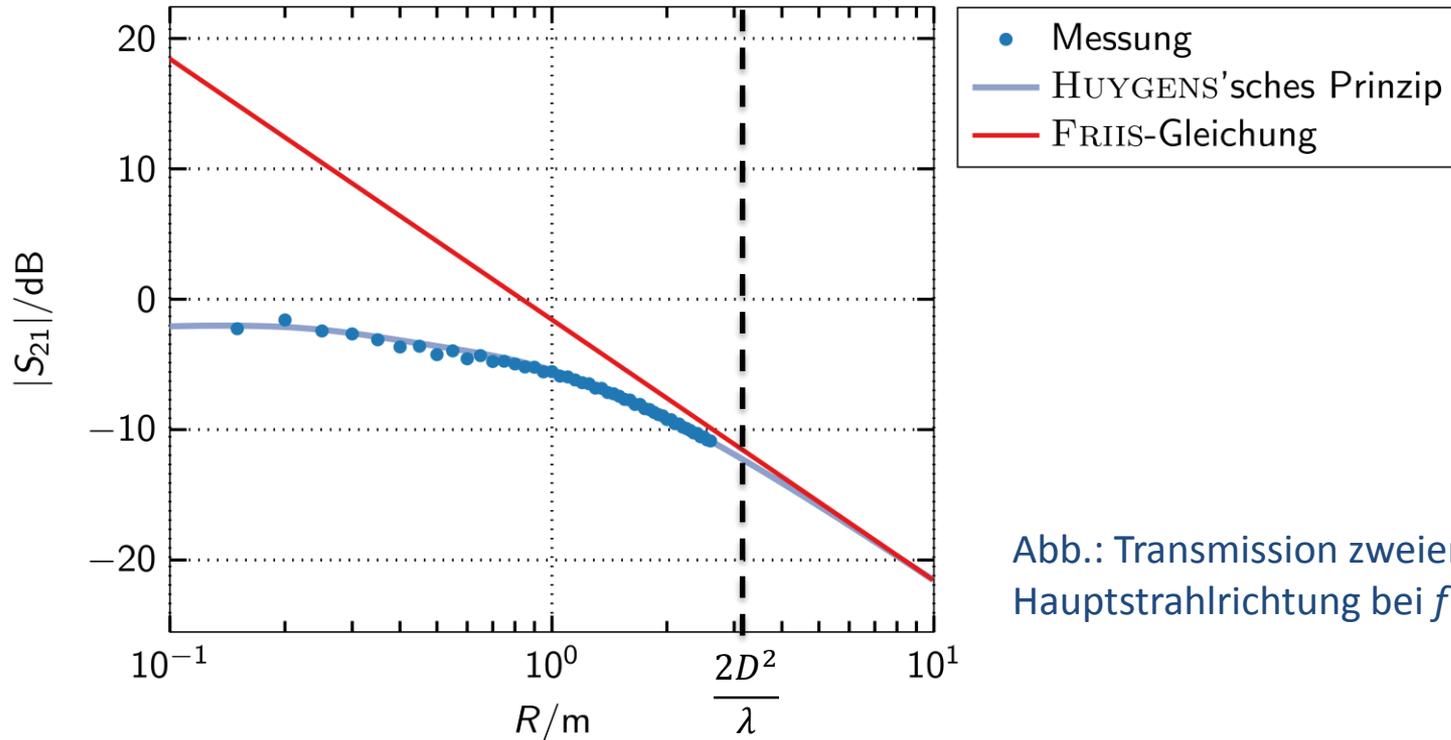


Abb.: Transmission zweier Hornantennen in Hauptstrahlrichtung bei  $f = 1,7$  GHz

- Deutliche Abweichung von Fernfeldbedingungen bei  $\frac{2D^2}{\lambda}$ !
- Erst bei etwa  $\frac{32D^2}{\lambda}$  ist Fehler durch Verletzen der Fernfeldbedingung unter 0,05 dB [2]

# Einfluss durch Fernfeldverletzung

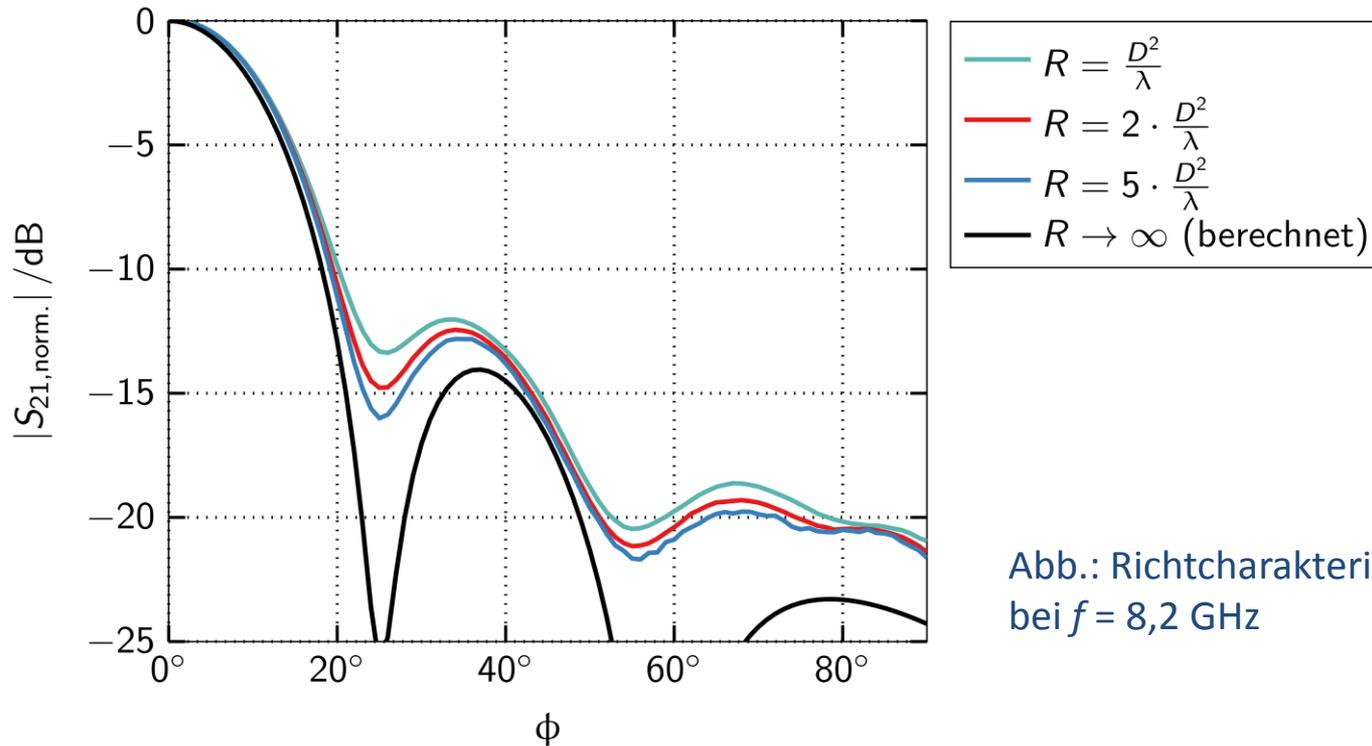


Abb.: Richtcharakteristik einer Hornantenne bei  $f = 8,2$  GHz

- Ebenfalls sehr starker Einfluss auf gemessenes Antennendiagramm

- Effekte durch Mehrwegeausbreitung bereits bei  $\frac{5D^2}{\lambda}$  erkennbar

→ Präzise Antennenmesstechnik ist kaum mit Fernfeld-Messtechnik möglich

1. Motivation
2. Fernfeld-Messtechnik
3. Extrapolation der Transmissionsmessung (NIST)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Berechnung der Messunsicherheit
4. Nah-Fernfeld-Transformation (TUM)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Vorstellung typischer Ergebnisse
5. Fazit

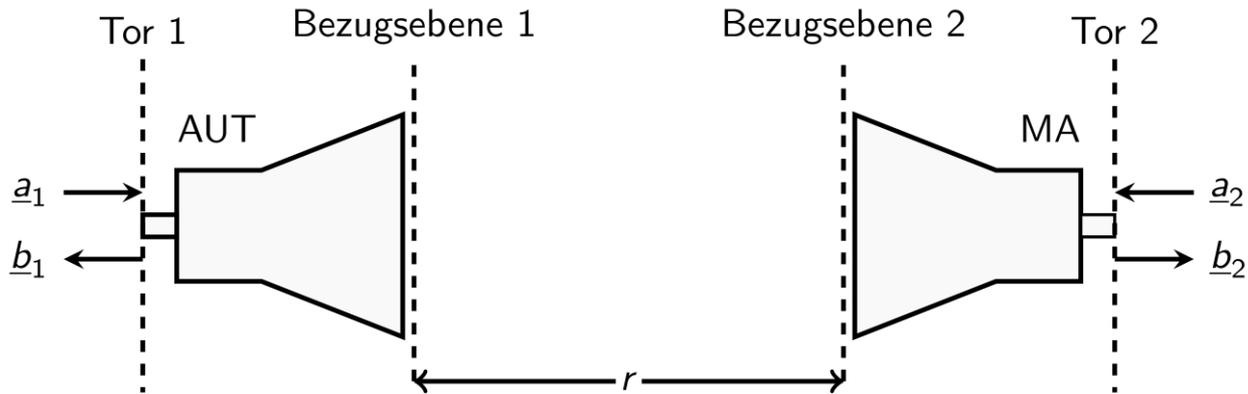


Abb.: Übertragungsstrecke zweier Antennen als Zweitor

- Gefiltertes Betragsquadrat der Transmission lässt sich in eine Reihe entwickeln [2, 3]:

$$|\bar{S}_{21}|^2(r) = \frac{1}{r^2} \cdot \left( A'_0 + \frac{A'_1}{r} + \frac{A'_2}{r^2} + \dots \right)$$

- Messung der Transmission als Funktion des Abstands und Fit der signifikanten Terme erlaubt Extrapolation:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} |S_{21}|^2 \cdot r^2 = A'_0 = \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 G_{\text{AUT}} \cdot G_{\text{MA}}$$

- Zur Erinnerung [2]:

$$\left| \bar{S}_{21} \right|^2 (r) = \frac{1}{r^2} \cdot \left( A'_0 + \frac{A'_1}{r} + \frac{A'_2}{r^2} + \dots \right)$$

- Aufstellung des linearen Gleichungssystems:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \left| \bar{S}_{21} \right|^2 (r_1) \\ \left| \bar{S}_{21} \right|^2 (r_2) \\ \vdots \\ \left| \bar{S}_{21} \right|^2 (r_N) \end{pmatrix}}_{|\bar{S}_{21}|^2} = \underbrace{\begin{pmatrix} r_1^{-2} & r_1^{-3} & \dots & r_1^{-p-2} \\ r_2^{-2} & r_2^{-3} & \dots & r_2^{-p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_N^{-2} & r_N^{-3} & \dots & r_N^{-p-2} \end{pmatrix}}_{\mathbf{C}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} A'_0 \\ A'_1 \\ \vdots \\ A'_p \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}'}$$

- Lösen erfolgt durch Aufstellen der Normalgleichung (Methode der kleinsten Fehlerquadrate):

$$\mathbf{C}^T \cdot |\bar{S}_{21}|^2 = \mathbf{C}^T \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}'$$

- Anzahl der Parameter durch Anwenden von Fisher-F-Test oder Kreuzvalidierung ermitteln → Gefahr der „Überanpassung“

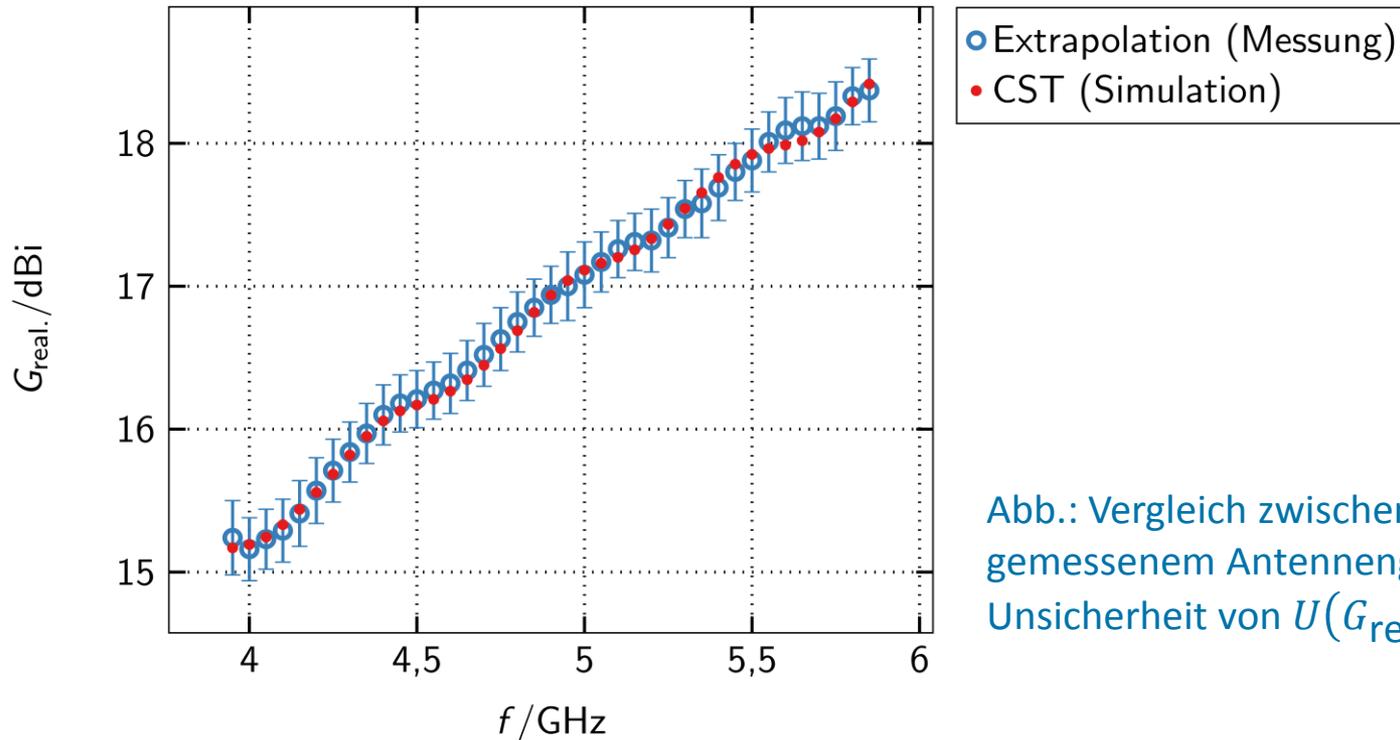


Abb.: Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Antennengewinn inkl. erweiterter Unsicherheit von  $U(G_{\text{real.}}) = 0,2$  dBi.

- Zufällige Unsicherheitsbeiträge werden mit Gauß-Markov Theorem abgeschätzt:

$$\mathbf{Cov}(\mathbf{A}') = (\mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \frac{SS_{res}}{N - p - 1}$$

- Zusammen mit systematischen Beiträgen (mechanische Ausrichtung, Verschraubungen...) erhält man Gesamt-Messunsicherheit

✓ Vorteile	✗ Nachteile
<ul style="list-style-type: none"><li>• Sehr genaue Messungen der Antenneneigenschaften entlang einzelner Achsen möglich</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Messung kann nur entlang einzelner, ausgewählter Achsen erfolgen</li><li>• Vor allem bei systematischen Fehlern (Mehrwegeausbreitung) ist Überanpassung möglich!</li><li>• Überanpassung ist im Unsicherheitsbudget nicht erfassbar</li></ul>

→ Nur in Kombination mit anderen Messverfahren (z.B. Compact Ranges) ist eine vollständige Charakterisierung der AUT möglich

1. Motivation
2. Fernfeld-Messtechnik
3. Extrapolation der Transmissionsmessung (NIST)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Berechnung der Messunsicherheit
4. Nah-Fernfeld-Transformation (TUM)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Vorstellung typischer Ergebnisse
5. Fazit

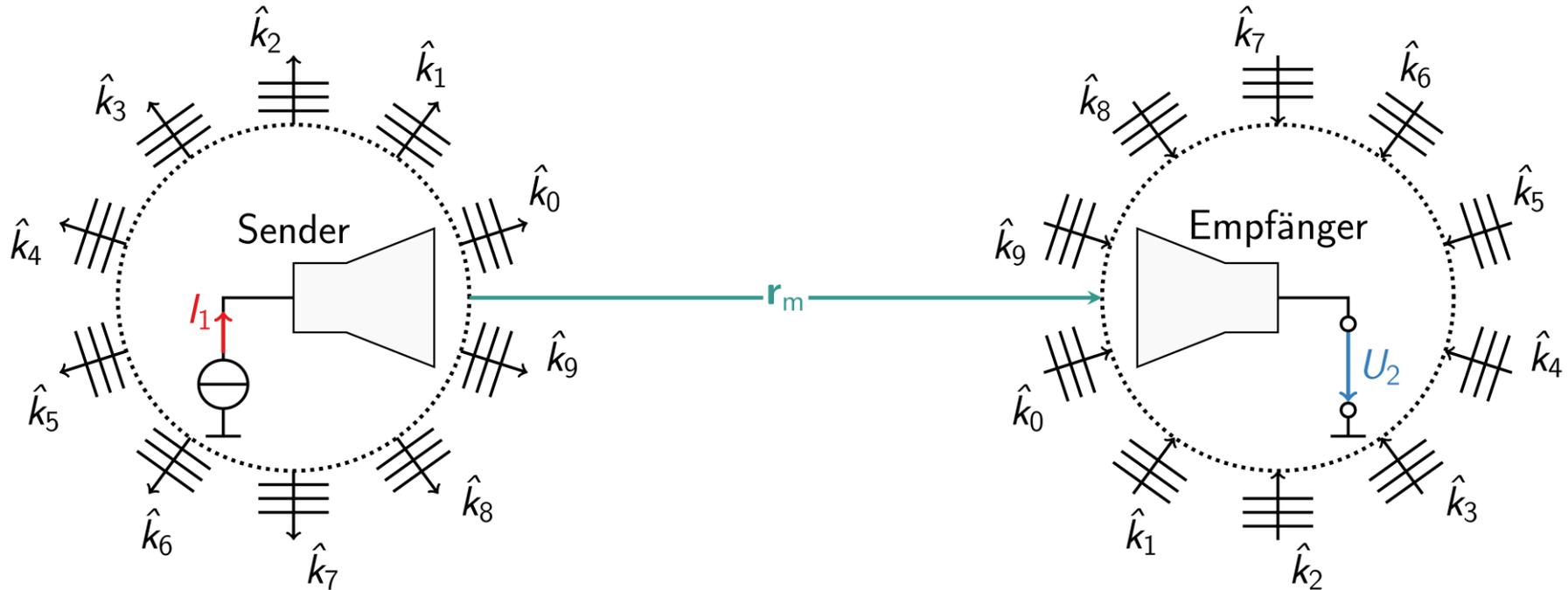


Abb.: Skizze der Nahfeld-Interaktion zwischen zwei Antennen

- Empfangsantenne gewichtet einfallende Wellen gemäß Fernfeldcharakteristik zur Leerlaufspannung  $U_2$  [4,5,6]:

$$Z_{21}(\mathbf{r}_m) = \frac{U_2}{I_1} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \iint \tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{MA}}(-\hat{k}) \cdot T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m) \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{\mathbf{AUT}}(\hat{k}) d\hat{k}^2$$

- Translationsoperator und sphärische Komponenten des Spektrums ebener Wellen lassen sich durch skalare Kugelflächenfunktionen darstellen [4, 6]:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\phi, \theta) = \begin{pmatrix} \tilde{E}_\phi \\ \tilde{E}_\theta \end{pmatrix}(\phi, \theta) = \sum_{m=0}^{L/2} \sum_{n=-m}^m \mathbf{f}_{mn} Y_{mn}(\phi, \theta)$$

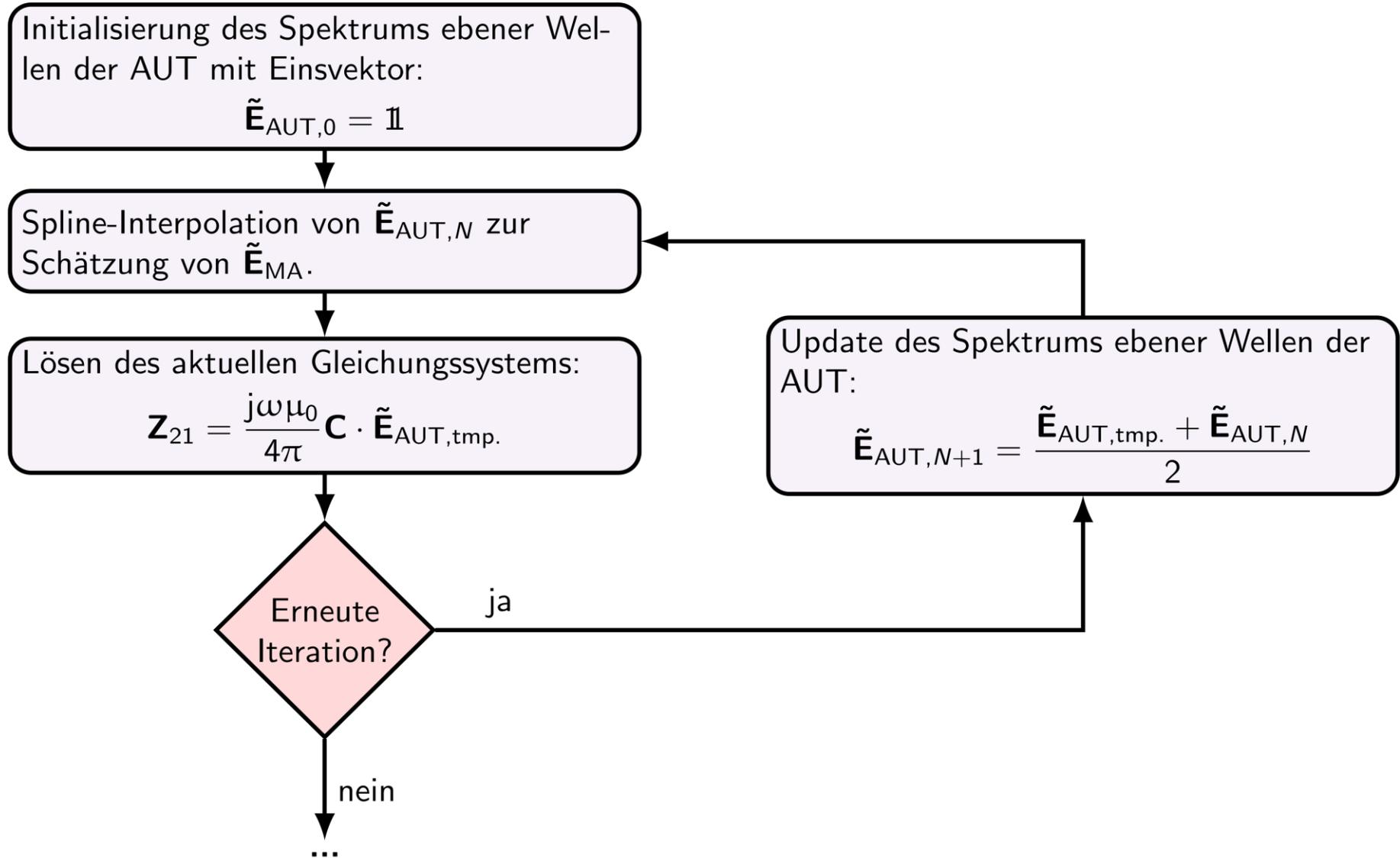
→ Exakte Integration des Kopplungsintegrals durch Gauß-Legendre-Quadratur möglich [1, 4]:

$$Z_{21}(\mathbf{r}_m) = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \sum_{\phi} \sum_{\theta} \underbrace{W_{\phi,\theta} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{MA}(-\hat{k}) \cdot T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m)}_{\text{Matrixelemente von } \mathbf{C}} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{AUT}(\hat{k})$$

- Aufstellen eines LGS ermöglicht direkte Berechnung des diskreten Spektrums ebener Wellen der AUT [4]:

$$\mathbf{Z}_{21} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \mathbf{C} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{AUT}$$

# Iterative Zwei-Antennen-Methode



- Darstellung des kartesischen Spektrums ebener Wellen durch skalare Kugelflächenfunktionen [4]:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\phi, \theta) = \begin{pmatrix} \tilde{E}_x \\ \tilde{E}_y \\ \tilde{E}_z \end{pmatrix}(\phi, \theta) = \sum_{m=0}^{\frac{L}{2}-1} \sum_{n=-m}^m \mathbf{f}_{mn} Y_{mn}(\phi, \theta)$$

- Weitergabe der Antennendaten sollte nicht als diskretes Spektrum ebener Wellen, sondern durch Entwicklungskoeffizienten  $\mathbf{f}_{mn}$  erfolgen

→ Integration der Entwicklungskoeffizienten in das lineare Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{21} &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \mathbf{C} \cdot \tilde{\mathbf{E}}_{\text{AUT}} \\ &= \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \mathbf{C} \cdot \mathbf{T}(\phi, \theta) \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{f} \end{aligned}$$

Mit:  $\mathbf{C}$ : Ursprüngliche Koppelmatrix  
 $\mathbf{T}(\phi, \theta)$ : Transformationsmatrix  
kartesisch → sphärisch  
 $\mathbf{Y}$ : Interpolationsmatrix

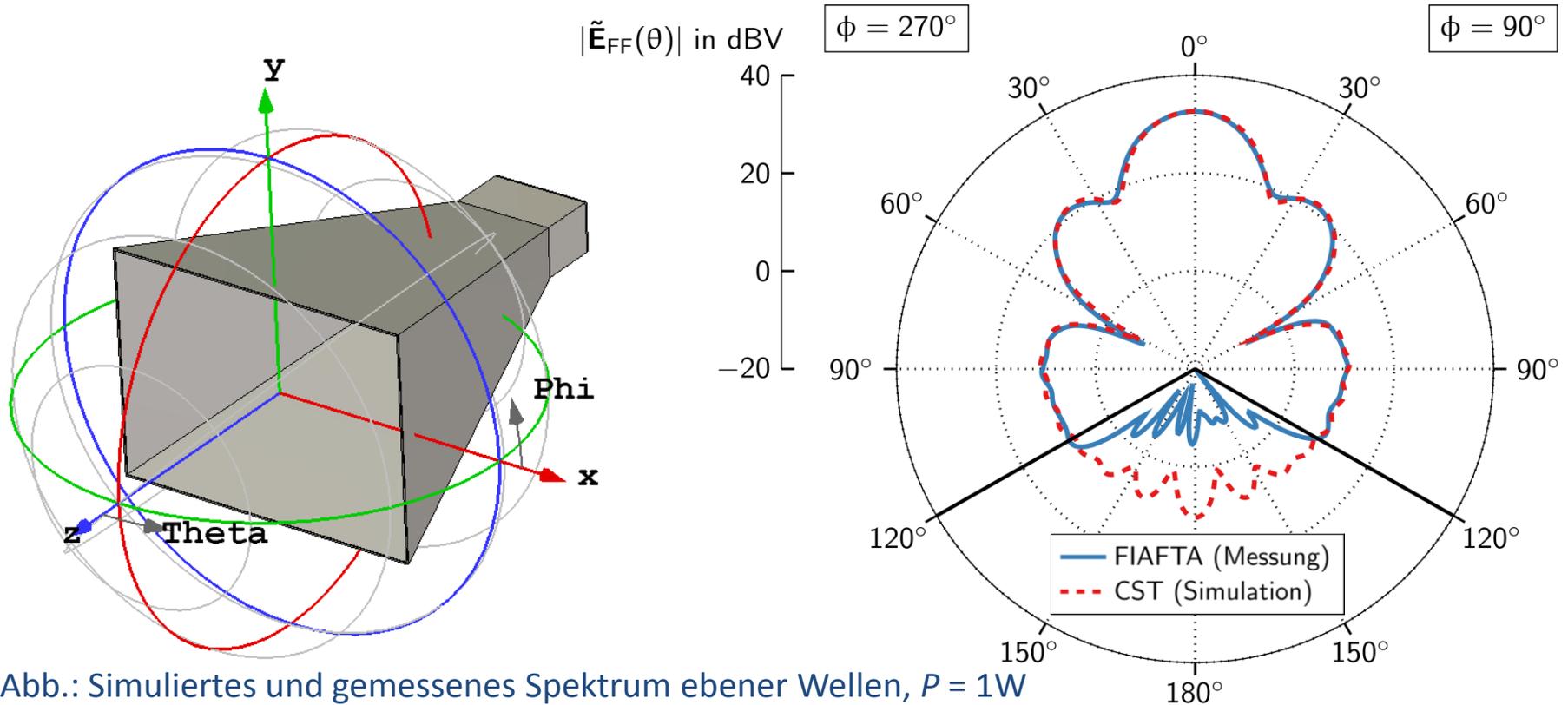


Abb.: Simuliertes und gemessenes Spektrum ebener Wellen,  $P = 1\text{W}$

- Messbedingungen: sphärischer Scan,  $|\mathbf{r}_m| = 2\text{ m}$ ,  $f = 1,7\text{ GHz}$
- Messung und Simulation stimmen im Messbereich sehr gut überein

$$|\tilde{\mathbf{E}}_{\text{FF},\text{FIAFTA}}(\theta = 0^\circ)| - |\tilde{\mathbf{E}}_{\text{FF},\text{CST}}(\theta = 0^\circ)| < 0,05\text{ dBV!}$$

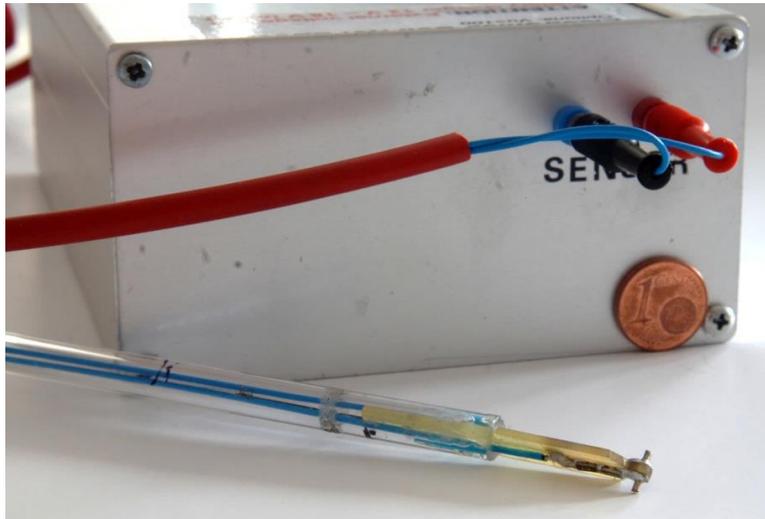


Abb.: Kleiner Transfersensor zur Messung der elektrischen Feldstärke

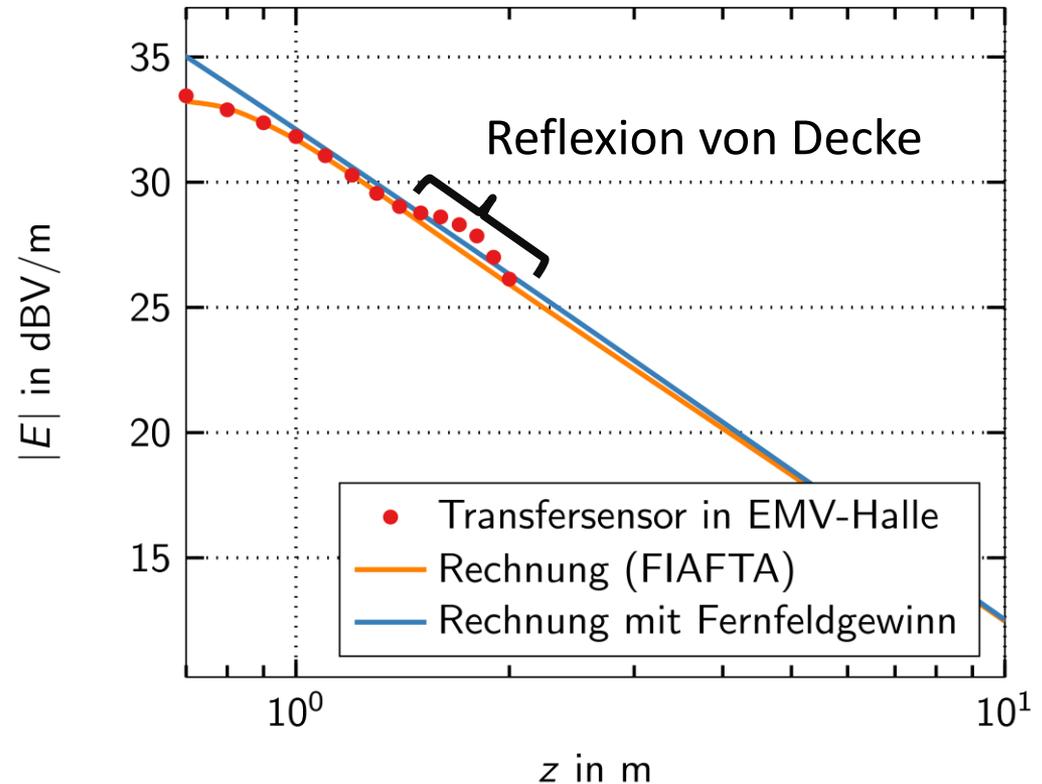


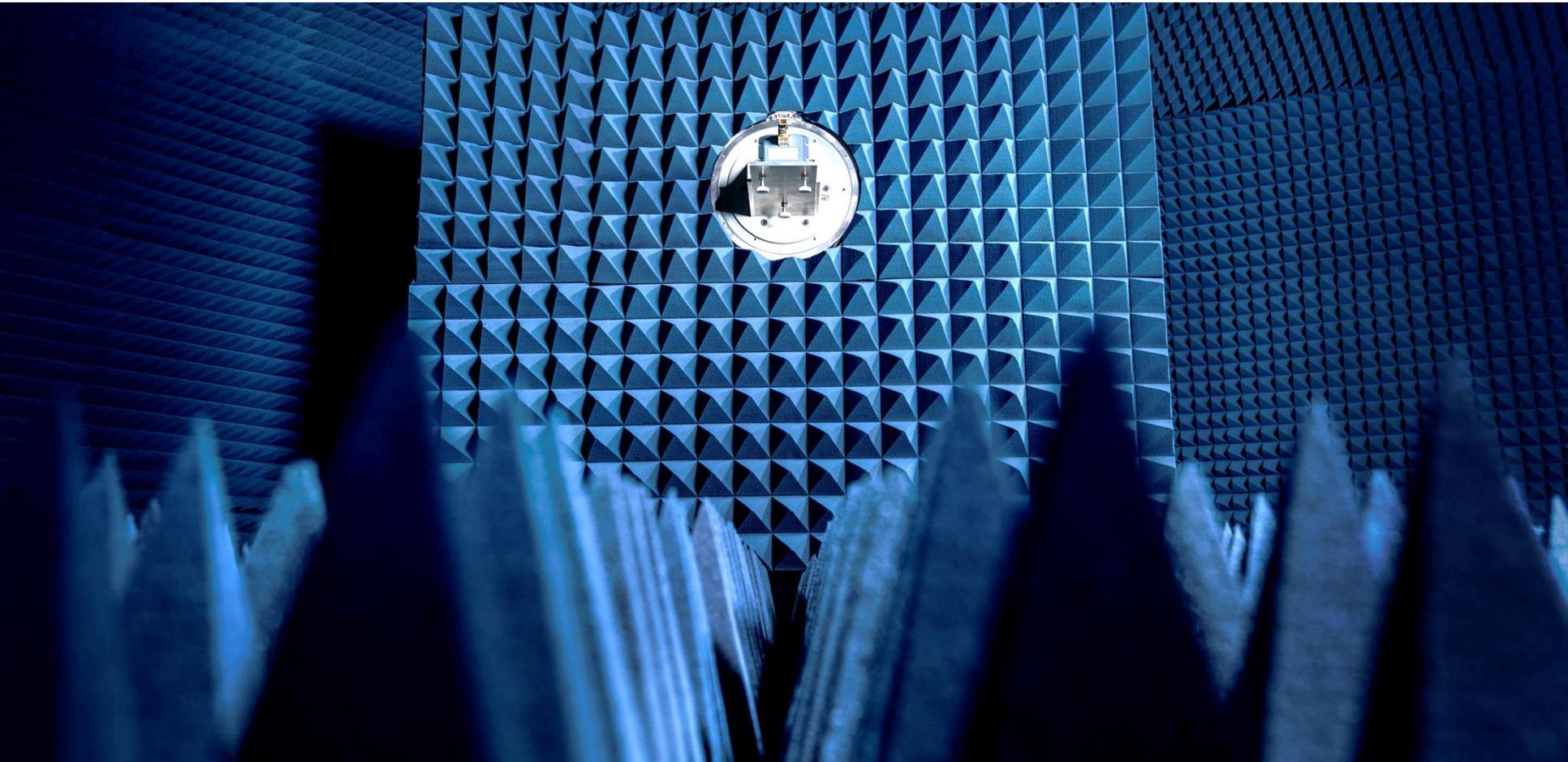
Abb.: Gemessene und berechnete elektrische Feldstärke entlang der z-Achse,  $P = 1W$ ,  $f = 1,7$  GHz

Zur Erinnerung [1]:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -I \cdot \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \iint T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) \cdot \tilde{\mathbf{E}}(\hat{\mathbf{k}}) d\hat{\mathbf{k}}^2$$

1. Motivation
2. Fernfeld-Messtechnik
3. Extrapolation der Transmissionsmessung (NIST)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Berechnung der Messunsicherheit
4. Nah-Fernfeld-Transformation (TUM)
  - Grundzüge des Verfahrens
  - Vorstellung typischer Ergebnisse
5. Fazit

- Moderne Nahfeld-Messtechnik ermöglicht präzise Kalibrierung von Antennen auf unregelmäßigen Messoberflächen
- Höhere Genauigkeit erfordert jedoch deutlich größeren Aufwand



# Fragen?



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**



Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

David Ulm

Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik

Telefon: 0531 592-2217

E-Mail: [david.ulm@ptb.de](mailto:david.ulm@ptb.de)

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)



- [1] Schmidt, C.: *Effiziente Nahfeldmesstechnik für große Antennen, beliebige Messoberflächen und echobehaftete Messumgebungen*. Verlag Dr. Hut, 2010. – ISBN 9783868535037
- [2] A. C. Newel, R. C. Baird und P. F. Wacker: *Accurate Measurement of Antenna Gain and Polarization at Reduced Distances by an Extrapolation Technique*, 1973.
- [3] D. M. Kerns: *Plane-Wave Scattering-Matrix Theory of Antennas and Antenna-Antenna Interactions*, 1981.
- [4] Eibert, Thomas F. ; Kilic, Emre ; Lopez, Carlos ; Mauermayer, Raimund A. M. ; Neitz, Ole ; Schnattinger, Georg: ELECTROMAGNETIC FIELD TRANSFORMATIONS FOR MEASUREMENTS AND SIMULATIONS (Invited Paper). In: *Progress In Electromagnetics Research* 151 (2015), 127–150.  
<http://dx.doi.org/10.2528/pier14121105>. – DOI 10.2528/pier14121105
- [5] Unger, H.G.: *Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik: Allgemeine Gesetze und Verfahren, Antennen und Funkübertragung, planare, rechteckige und zylindrische Wellenleiter*. Hüthig, 1981 (ELTEX, Studentexte Elektrotechnik). – ISBN 9783778507575
- [6] Gibson, W.C.: *The Method of Moments in Electromagnetics, Second Edition*, 2014.