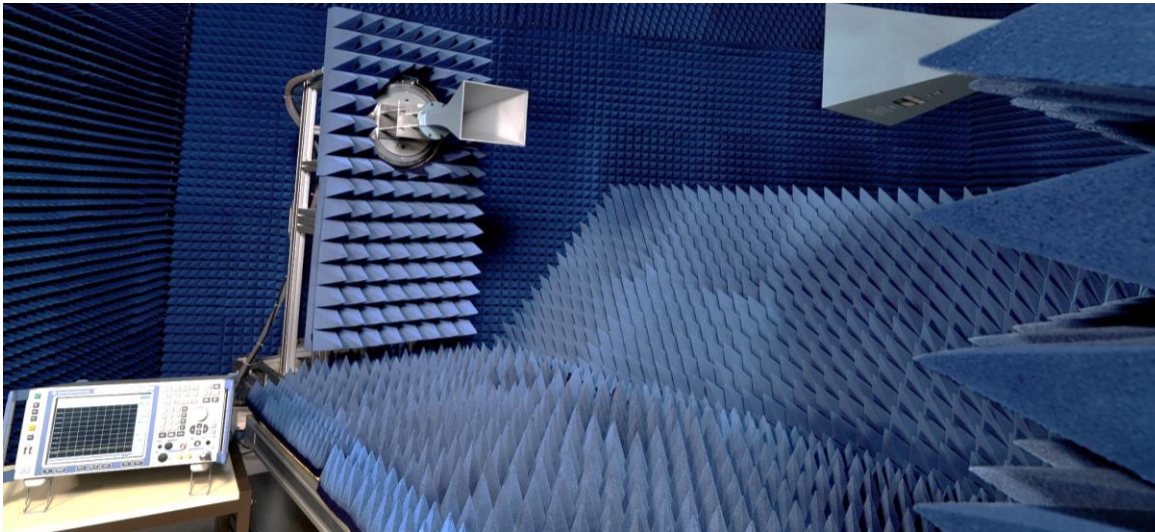
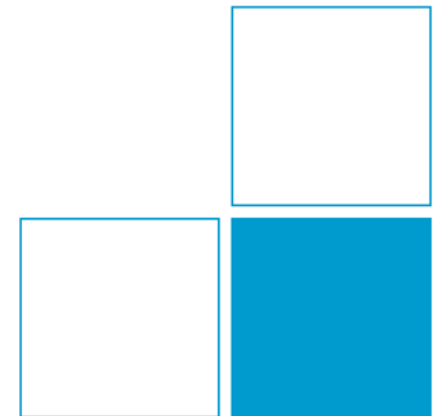


Etablierte und neue Messverfahren für die Antennenkalibrierung

David Ulm, Thomas Kleine-Ostmann, Thorsten Schrader
Fachbereich Hochfrequenz und Felder



314. PTB-Seminar: Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren
im Nieder- und Hochfrequenzbereich, 15. Mai 2019



Gliederung



- Antennenkenngößen
- Messeinrichtungen zur Antennencharakterisierung
- Nah-Fernfeld-Transformation
- Zusammenfassung und Ausblick

Antennen: wichtigste Antennengrößen

frequenz- und richtungsabhängige Abstrahlung

Richtdiagramm:
richtungsabhängige Leistungsdichte

$$\text{Gewinn} = \frac{\text{max. Leistungsdichte}}{\text{Leistungsdichte Isotropstrahler}}$$

$$\text{Direktivität} = \frac{\text{max. Leistungsdichte}}{\text{Leistungsdichte verlustloser Isotropstrahler}}$$

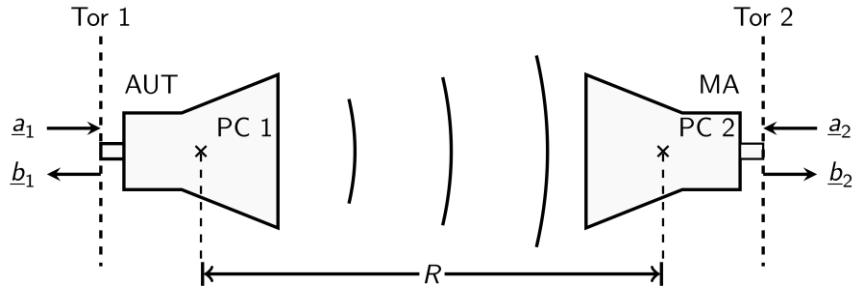
$$\text{Antennenfaktor} = \frac{\text{elektrische Feldstärke}}{\text{Fußpunktspannung}}$$

Kenntnis von Abstrahlung und Empfang
zunehmend relevant für komplexe Systeme → Metrologie

Ausweitung des Frequenzbereiches
und der Integration → neue Messverfahren

→ **Aufbau der
Antennenmesstechnik
an der PTB**

Antennenstrecke als Zweitor



Anwendung der Friis-Gleichung im Fernfeld:

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

Zwei-Antennen-Methoden:

- Messung zwei gleicher unbekannter Antennen
- Messung einer unbekannten Antenne mit einer bekannten Antenne

Drei-Antennen-Methode:

- Messung der Kombinationen von drei unbekannten Antennen

→ Auflösung des Gleichungssystems

Gliederung

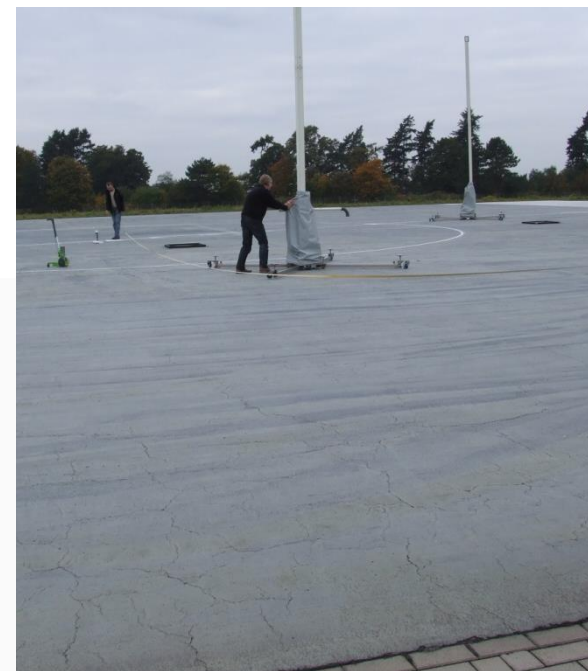
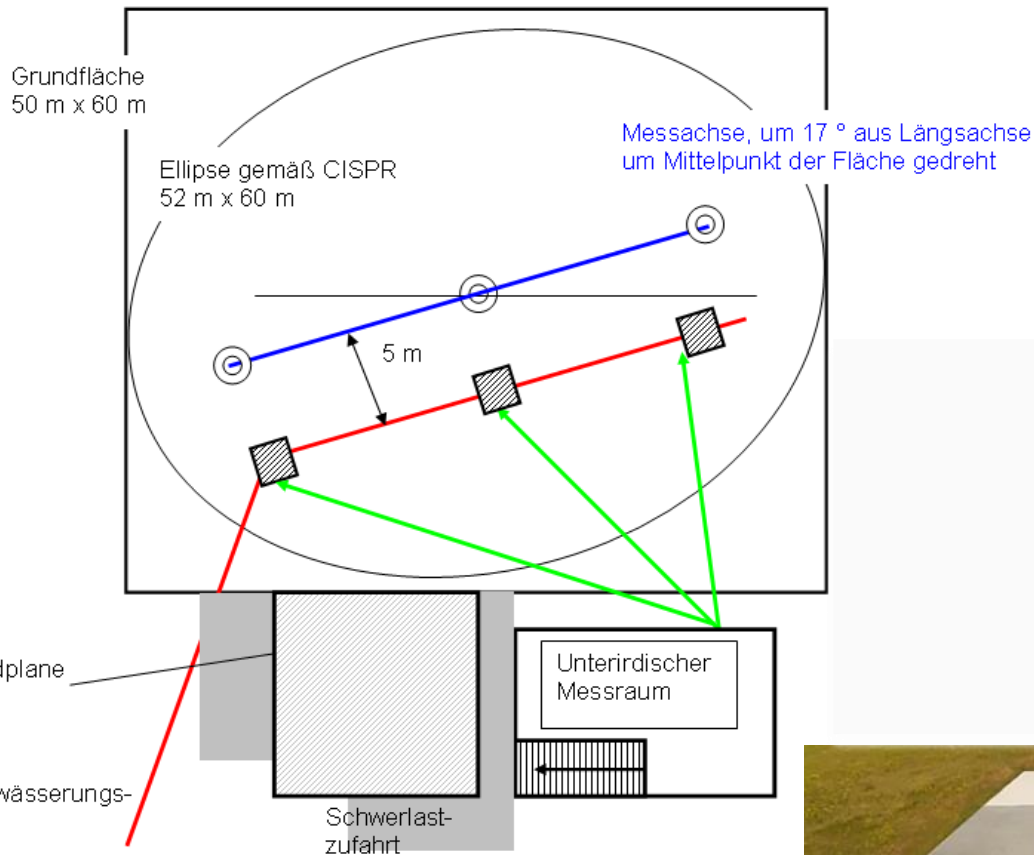
- Antennenkenngößen



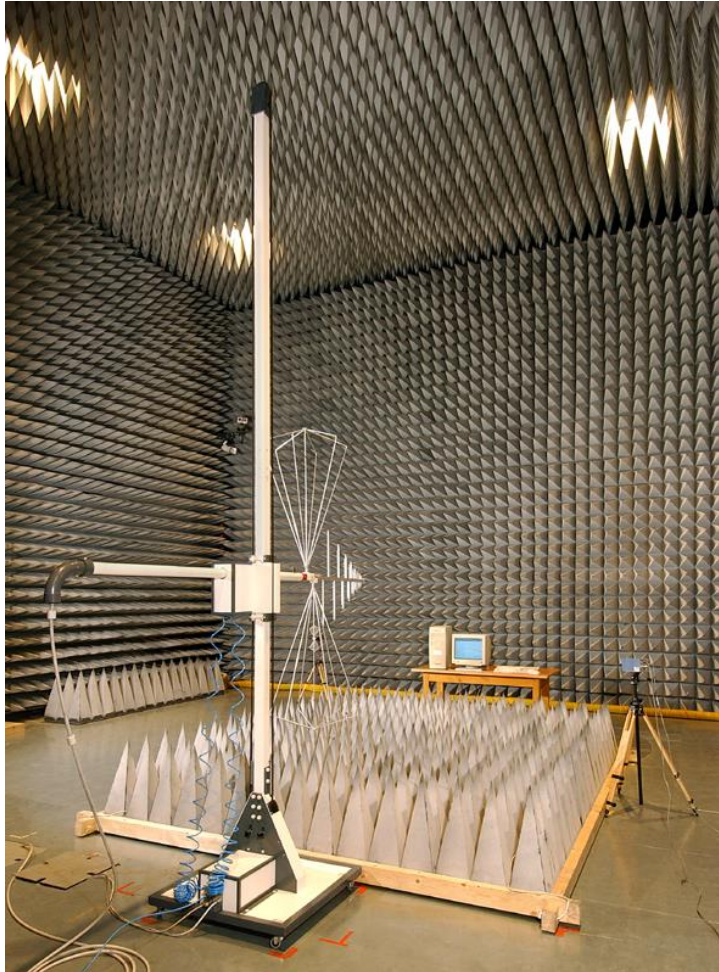
- Messeinrichtungen zur Antennencharakterisierung
- Nah-Fernfeld-Transformation
- Zusammenfassung und Ausblick

Antennenfreifeld der PTB

30 MHz bis 3 GHz



Absorberhallen



semi-anechoic chamber (SAC)



Messwarte

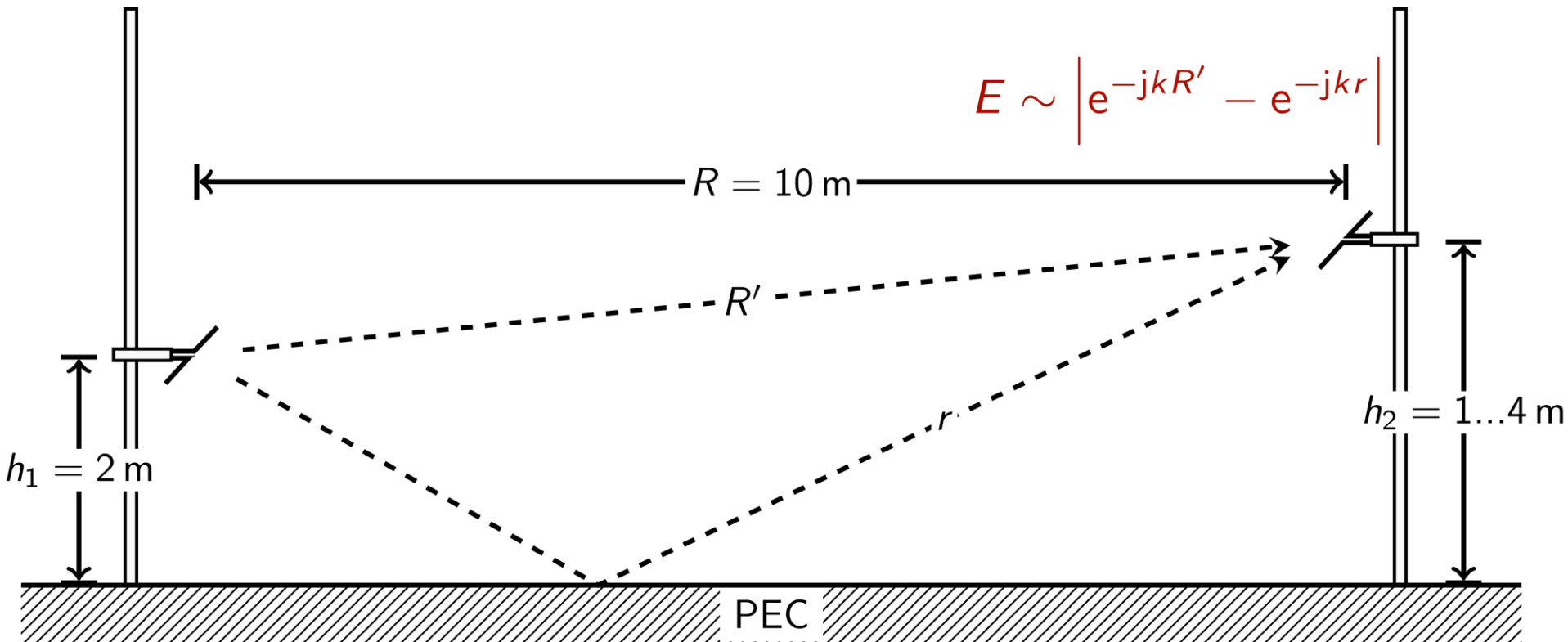
full anechoic chamber (FAR)

Standard Site Method, SSM

CISPR 16-1-6: 2014

ANSI C63.5: 2017

Ziel: Freiraum-Antennenfaktor



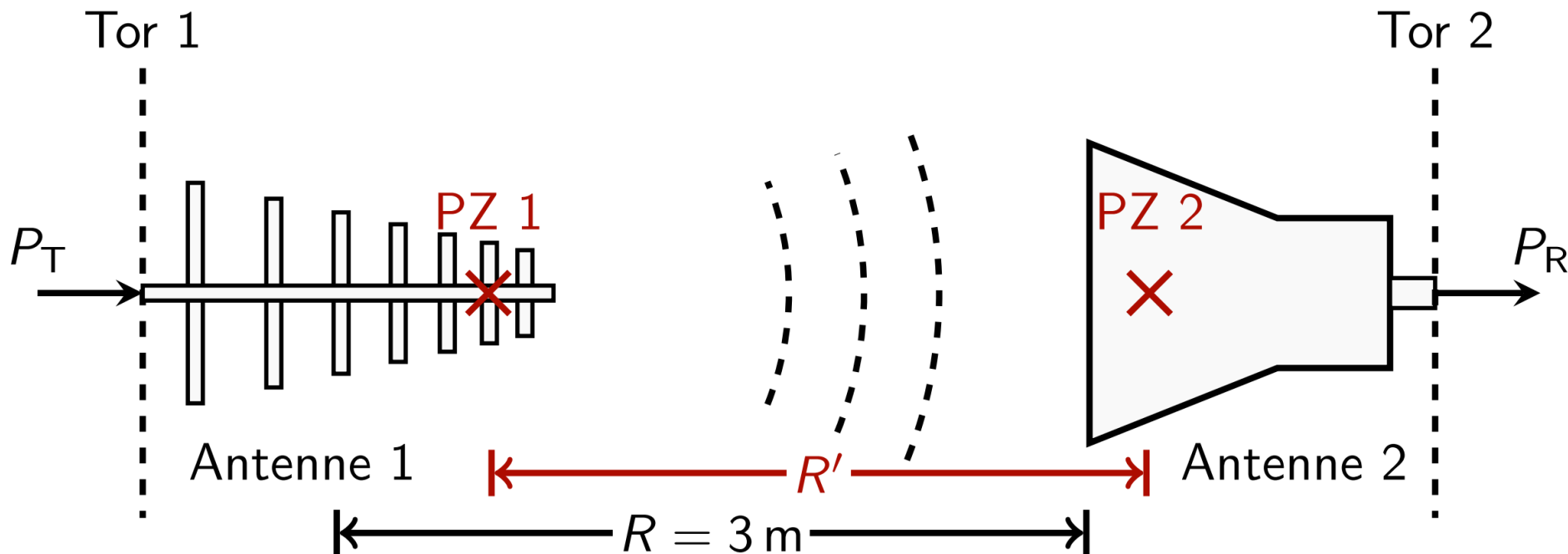
- übliches Vorgehen zur Kalibrierung dipolartiger Antennen unterhalb 1000 MHz
- Höhe Empfangsantenne in 5 cm Schrittweite zwischen 1 m und 4 m variiert
- Kalibrierergebnis basiert auf minimaler Übertragungsdämpfung

Drei-Antennen-Methode, TAM

CISPR 16-1-6: 2014

ANSI C63.5: 2017

Ziel: Freiraum-Antennenfaktor



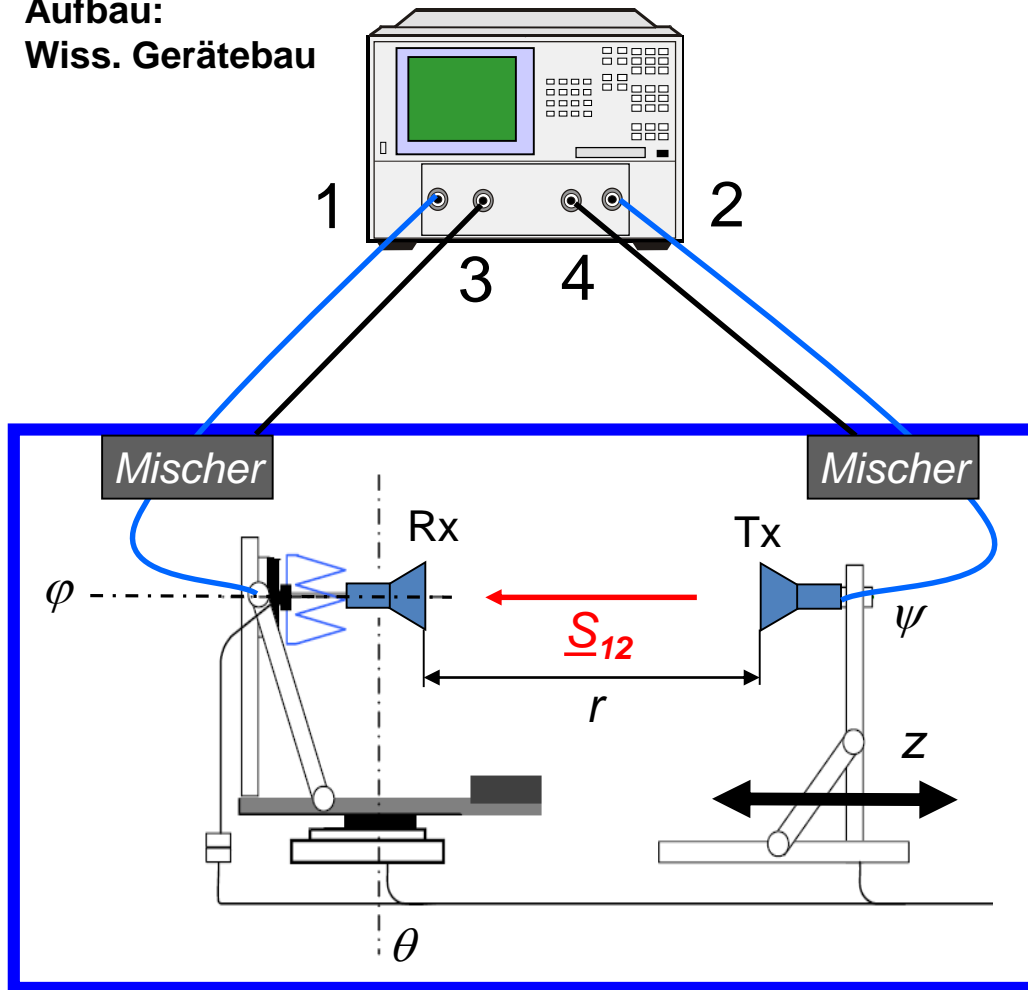
- Abstand zwischen willkürlichen Referenzpunkten $R = 3 \text{ m}$
- Bestimmung der Antennenfaktoren erfolgt mit Hilfe der Friis-Gleichung

$$\sqrt{\frac{P_R}{P_T}} = \frac{\eta}{Z_0 \lambda R'} \cdot \frac{1}{AF_1} \frac{1}{AF_2}$$

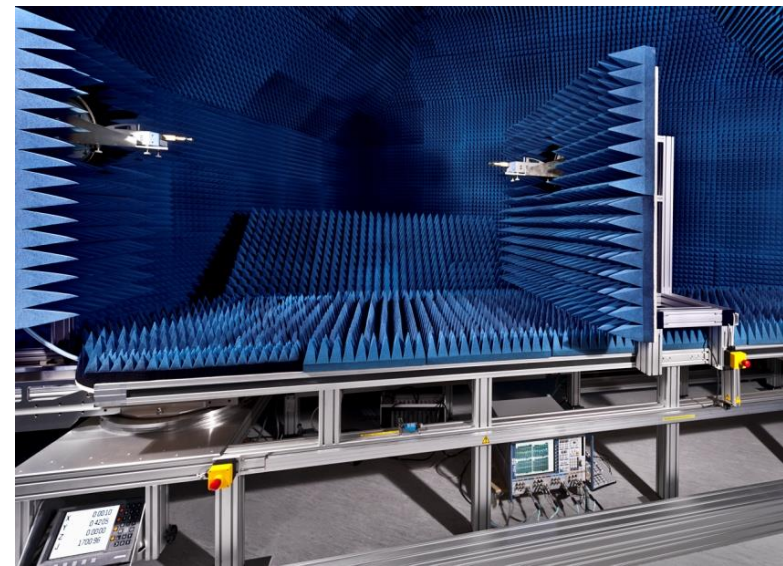
- Berücksichtigung des Abstands der Phasenzentren (PZ) ist optional

Antennenscanner

Aufbau:
Wiss. Gerätebau



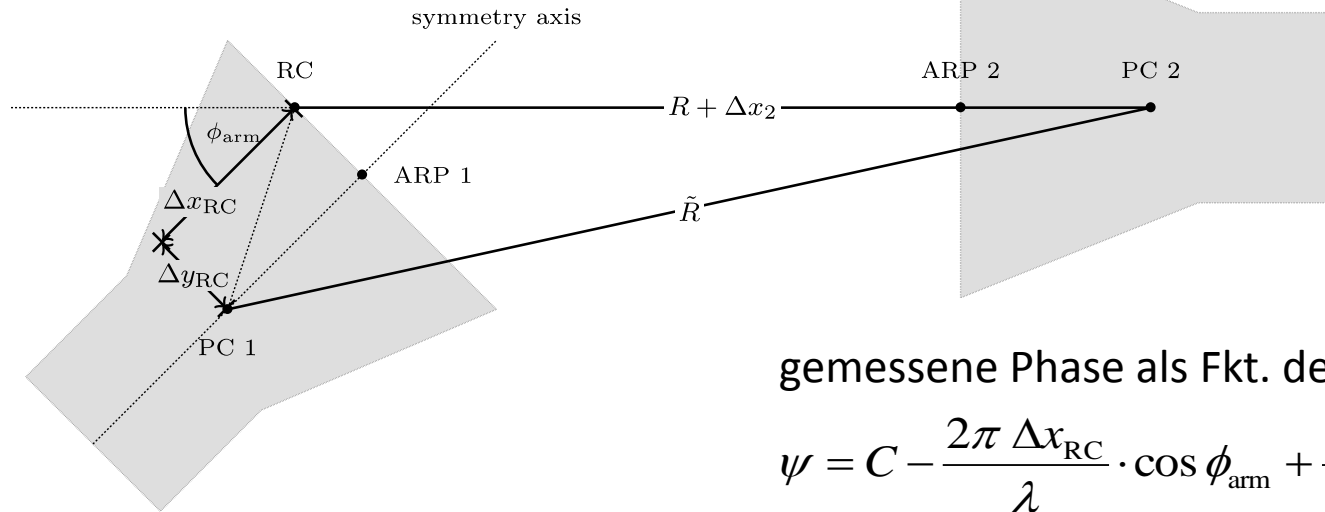
Absorberhalle



- Untersuchungen zur Messunsicherheit bei der Antennenkalibrierung
- Kalibrierdienstleistung/Rückführung bis in den THz-Frequenzbereich
- zusätzliche Messmöglichkeiten:
 - Beugung/Streuung
 - Emissionsmessungen
 - Radarrückstreuquerschnitt

M. Salhi et al., *Microwave Journal* 58, 124-134 (2015).

Phasenzentrum



gemessene Phase als Fkt. des Drehwinkels:

$$\begin{aligned}\psi &= C - \frac{2\pi \Delta x_{RC}}{\lambda} \cdot \cos \phi_{arm} + \frac{2\pi \Delta y_{RC}}{\lambda} \cdot \sin \phi_{arm} \\ &= C - m_1 \cdot \cos \phi_{arm} + m_2 \cdot \sin \phi_{arm},\end{aligned}$$

Addieren und Subtrahieren der Phasen bei $\pm \phi_{arm}$:

$$\begin{aligned}\psi(\phi_{arm} \geq 0) + \psi(\phi_{arm} \leq 0) &= 2C - 2m_1 \cdot \cos \phi_{arm} \\ &= \text{unwrap}(\angle S_{21}(\phi_{arm} \geq 0) + \angle S_{21}(\phi_{arm} \leq 0))\end{aligned}$$

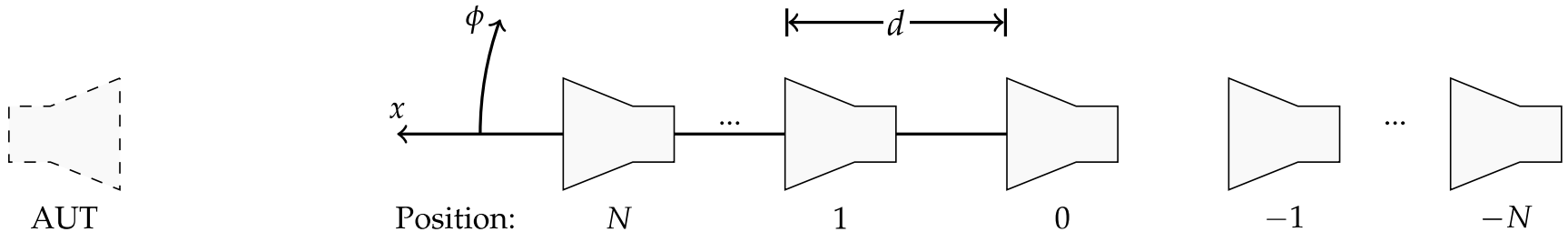
und

$$\begin{aligned}\psi(\phi_{arm} \geq 0) - \psi(\phi_{arm} \leq 0) &= 2m_2 \cdot \sin \phi_{arm} \\ &= \text{unwrap}(\angle S_{21}(\phi_{arm} \geq 0) - \angle S_{21}(\phi_{arm} \leq 0)).\end{aligned}$$

Bestimmung Δx_{RC} und Δy_{RC} mit Theil-Sen-Schätzer

T. Kleine-Ostmann, D. Ulm, T. Schrader, Phase Center Estimation And Correction Of Multi-path Effects For The Calibration Of Mm-wave Antennas, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), Copenhagen, Denmark, Sept. 2016.

Ausblenden von Mehrwegeausbreitung



Messung an einem „virtuellen Endfire Array“, Gruppenfaktor aus Dolph-Tschebycheff-Algorithmus:

$$F_G(\phi) = \sum_{n=-N}^N a_n \cdot e^{jn \cdot (kd \cos \phi - \beta)}$$

Korrektur der Transmissionsmessung:

$$S_{21,\text{corr}}(\phi_{\text{arm}}) = \frac{1}{F_G(0)} \cdot \sum_{n=-N}^N a_n \cdot S_{21,n}(\phi_{\text{arm}}) \cdot e^{-jn\beta}$$

Extrapolationsmethode

A. C. Newell et al., IEEE Trans Ant&Prop 21 (4), 418-431,1973.

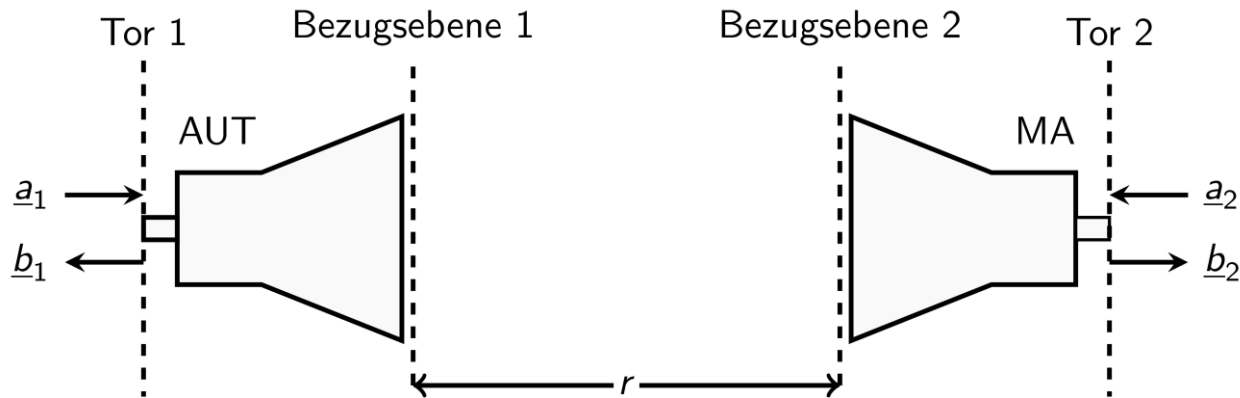


Abb.: Übertragungsstrecke zweier Antennen als Zweitor

- Gefiltertes Betragsquadrat der Transmission lässt sich in eine Reihe entwickeln:

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

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

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

Fliegende Messplattform

arcass – advanced remote-controlled airborne sensor systems



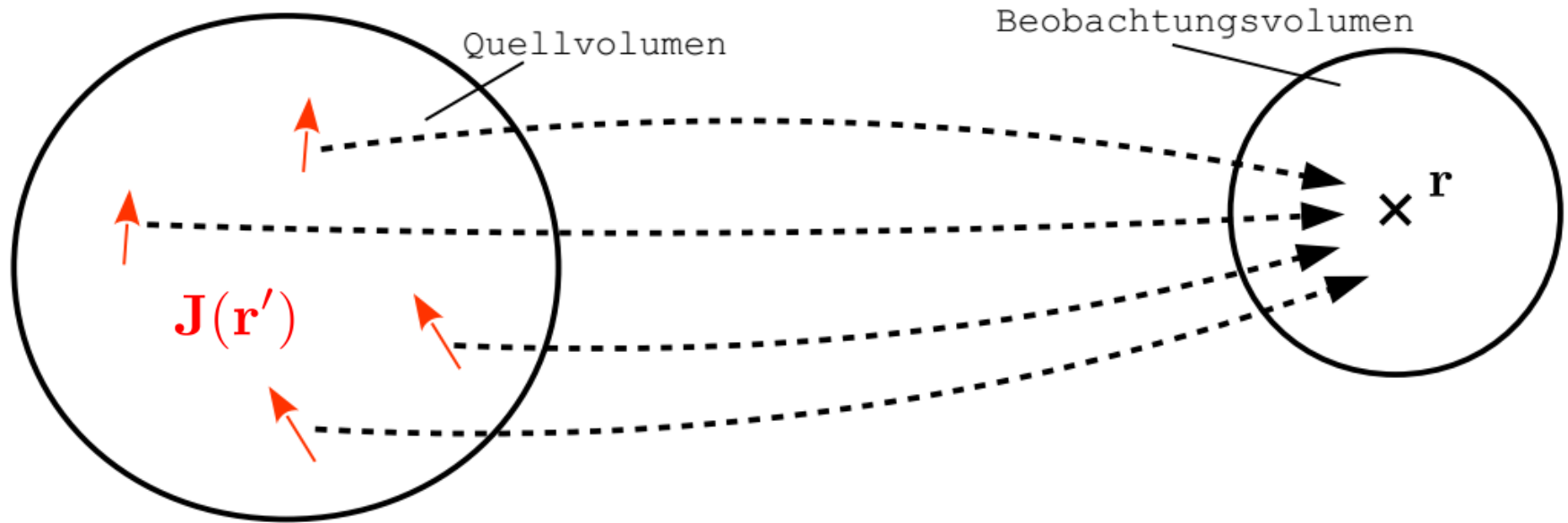
Modifikation kommerzieller Oktocopter mit verschiedenen Messköpfen,
Präzisionslokalisierung mit d-GPS mit einigen cm Genauigkeit

Automatisiertes Abfliegen
einer Trajektorie mit
3 m Genauigkeit

Gliederung

- Antennenkenngößen
- Messeinrichtungen zur Antennencharakterisierung
- • Nah-Fernfeld-Transformation
- Zusammenfassung und Ausblick

Grundlagen Nah-Fernfeld-Transformation



- Berechnung der elektrischen Feldstärke mit „Electric Field Integral Equation“ (EFIE)

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \iiint_{V_s} \bar{\mathbf{G}}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}') dv'$$

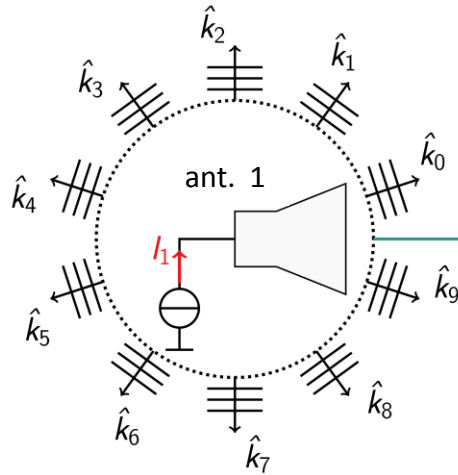
- Mit (Dyadische Greensche Funktion):

$$\bar{\mathbf{G}}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -j \frac{\omega \mu}{4\pi} \left(\bar{\mathbf{I}} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$$

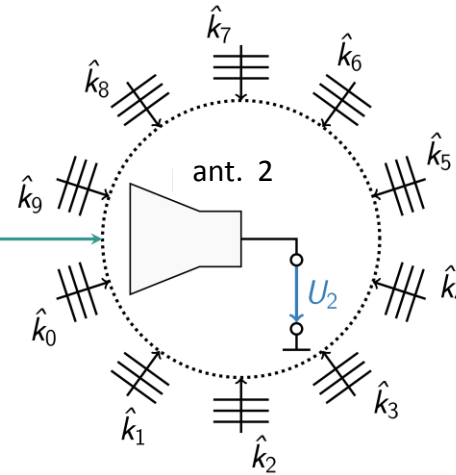
FIAFTA (fast irregular antenna field transformation algorithm)

T. Eibert et al., Progress in EM Research 151, 127-150, 2015.

antenna under test (AUT)



Messantenne (MA)



$$\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} = \oint\!\!\!\oint e^{j\mathbf{k}\cdot(\mathbf{r}_m-\mathbf{r})} e^{-j\mathbf{k}\cdot(\mathbf{r}'_s-\mathbf{r}')} T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_s) d\hat{k}^2 \quad \text{mit Translationsoperator}$$

$$T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \frac{-jk}{4\pi} \sum_{l=0}^L (-j)^l (2l+1) h_l^{(2)}(k|\mathbf{r}|) \cdot P_l(\hat{k} \cdot \hat{r}).$$

Empfangsantenne gewichtet einfallende Wellen gemäß Fernfeldcharakteristik zur Leerlaufspannung U_2 :

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

Grundlagen FIAFTA

- Translationsoperator und sphärische Komponenten des Spektrums ebener Wellen lassen sich durch skalare Kugelflächenfunktionen darstellen:

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

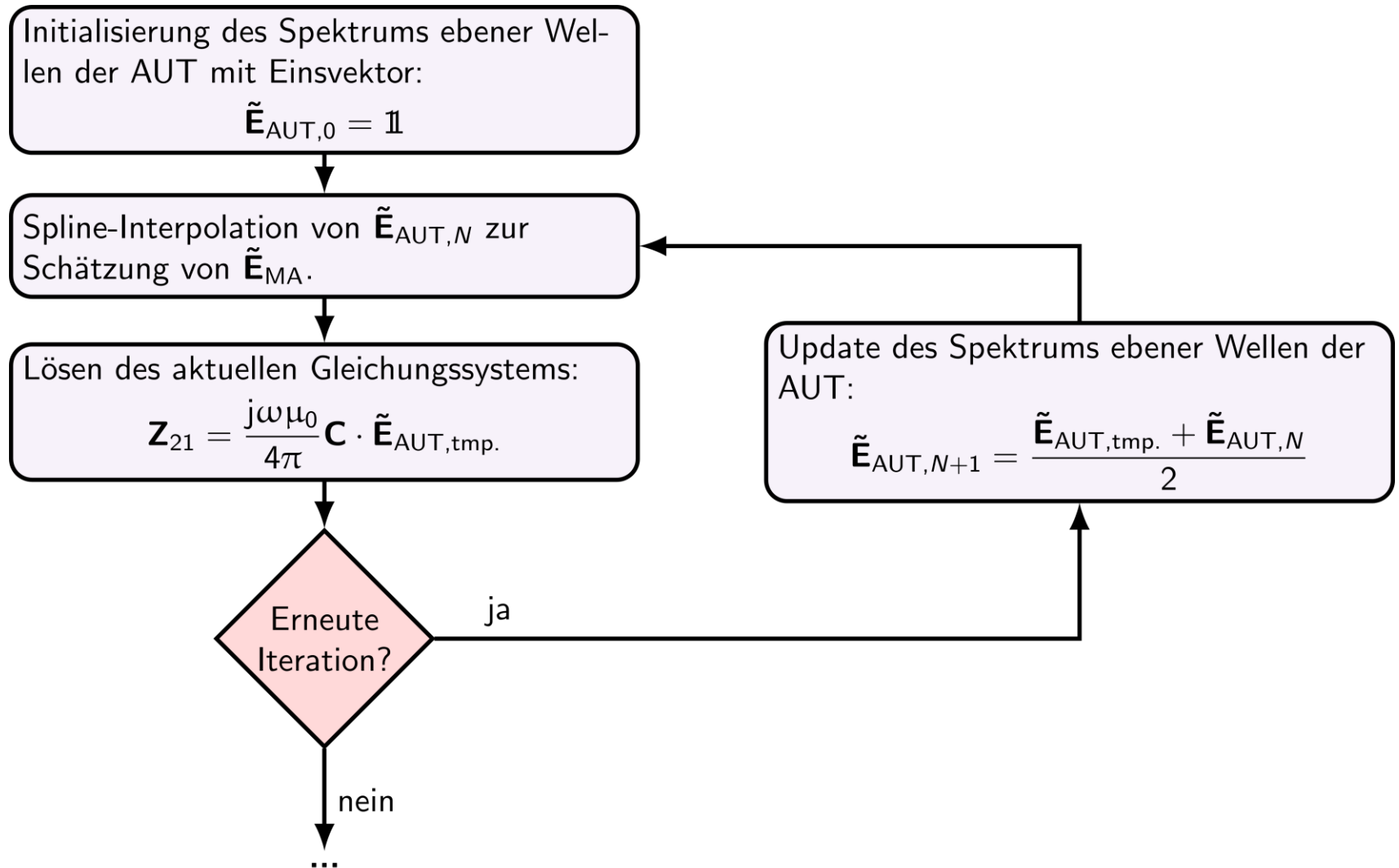
→ Exakte Integration des Kopplungsintegrals durch Gauß-Legendre-Quadratur möglich:

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

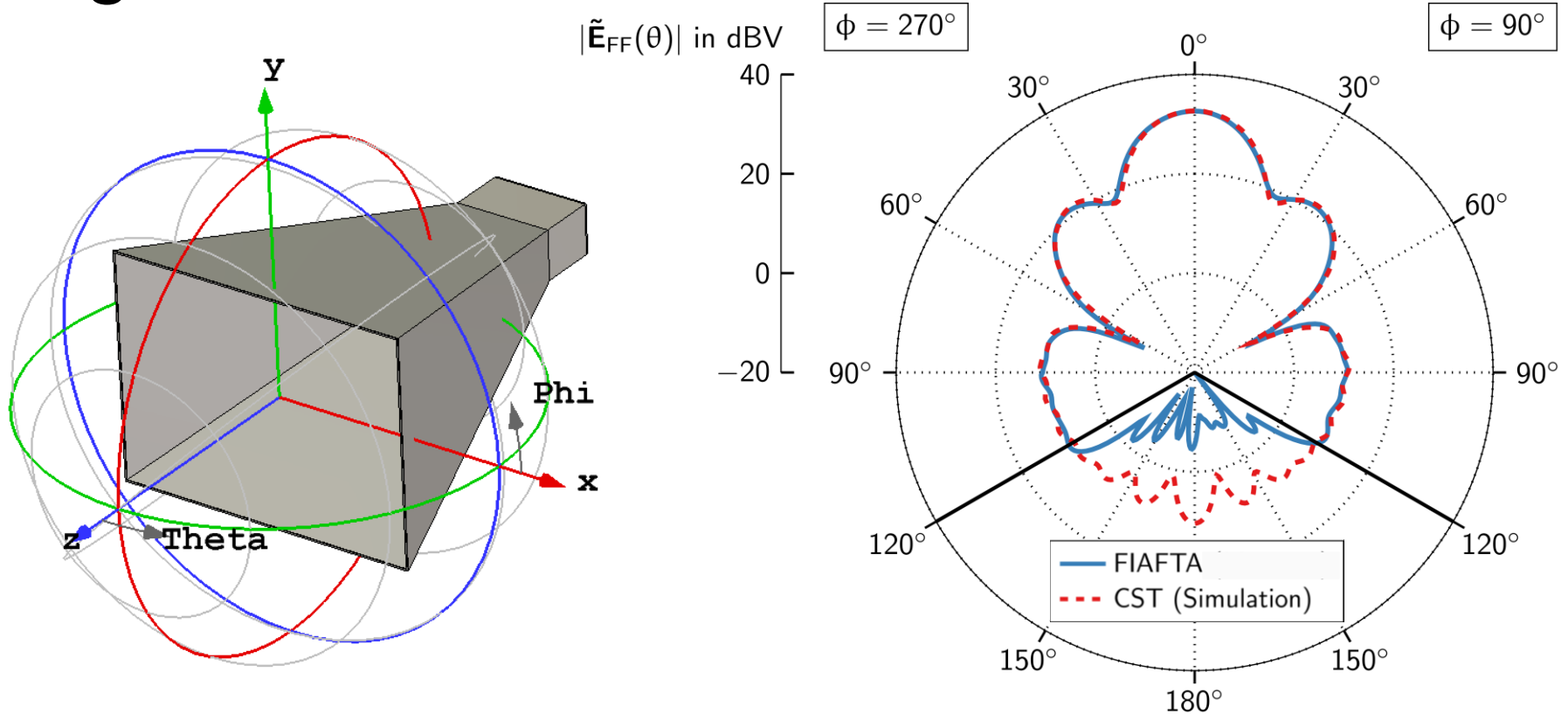
- Aufstellen eines LGS ermöglicht direkte Berechnung des diskreten Spektrums ebener Wellen der AUT:

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

Iterative Zwei-Antennen-Methode



Ergebnisse

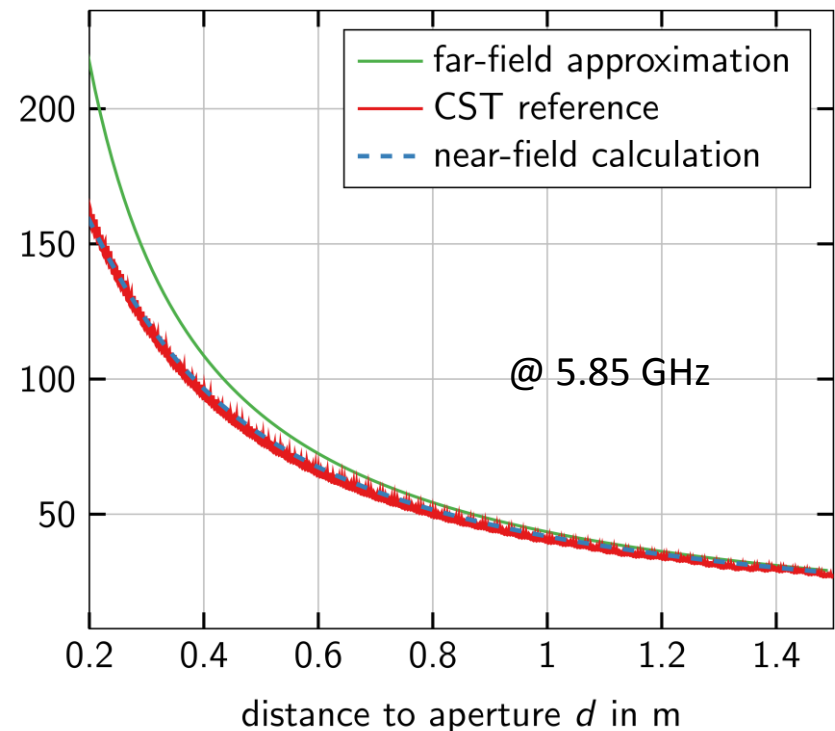
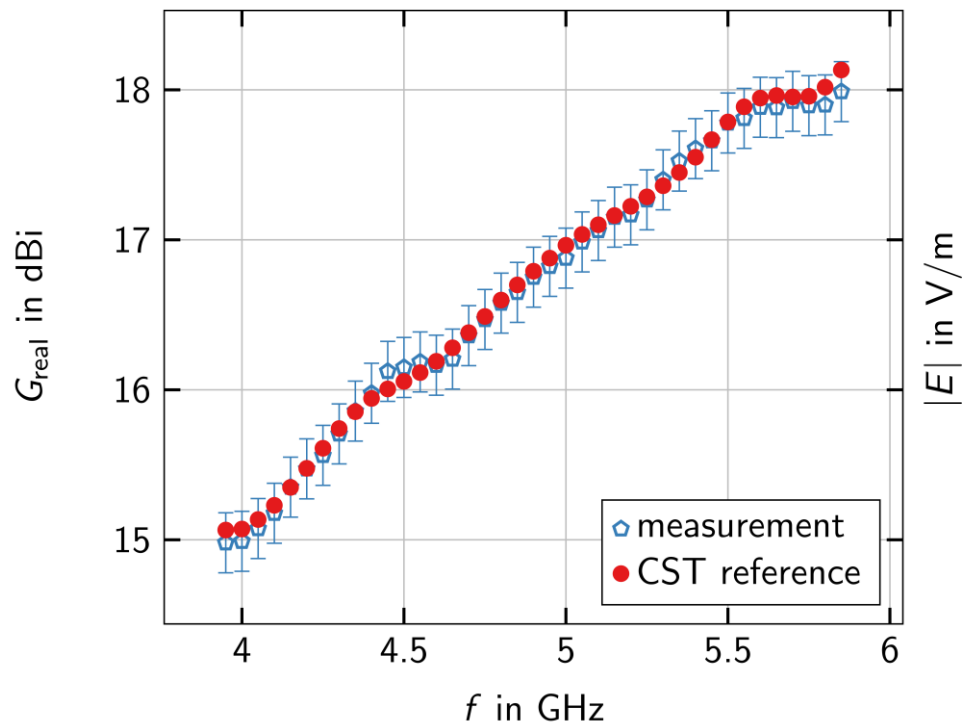


Sphärischer Scan, $|\mathbf{r}_m| = 2 \text{ m}$, $f = 1.7 \text{ GHz}$

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

Ergebnisse

Vergleich mit Simulationsergebnissen für Hornantenne EMCO 3160-05



NFFF-Transformation ohne Phaseninformation

- NFFF-Transformation lässt sich als lineares Gleichungssystem darstellen

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$$

- Phasenlose NFFF-Transformation ist eine nichtlineare Gleichung!

$$\mathbf{Ax} \circ (\mathbf{Ax})^* = \mathbf{c} = |\mathbf{b}|^2$$

- Formulierung als nichtlineares Optimierungsproblem:

$$\min_x \|\mathbf{Ax} \circ (\mathbf{Ax})^* - \mathbf{c}\|_2^2$$

Problem: Nichtlineare
Optimierungsprobleme haben
häufig eine nicht-konvexe
Kostenfunktion (lokale Minima)

Gliederung

- Antennenkenngößen
- Messeinrichtungen zur Antennencharakterisierung
- Nah-Fernfeld-Transformation
- • Zusammenfassung und Ausblick

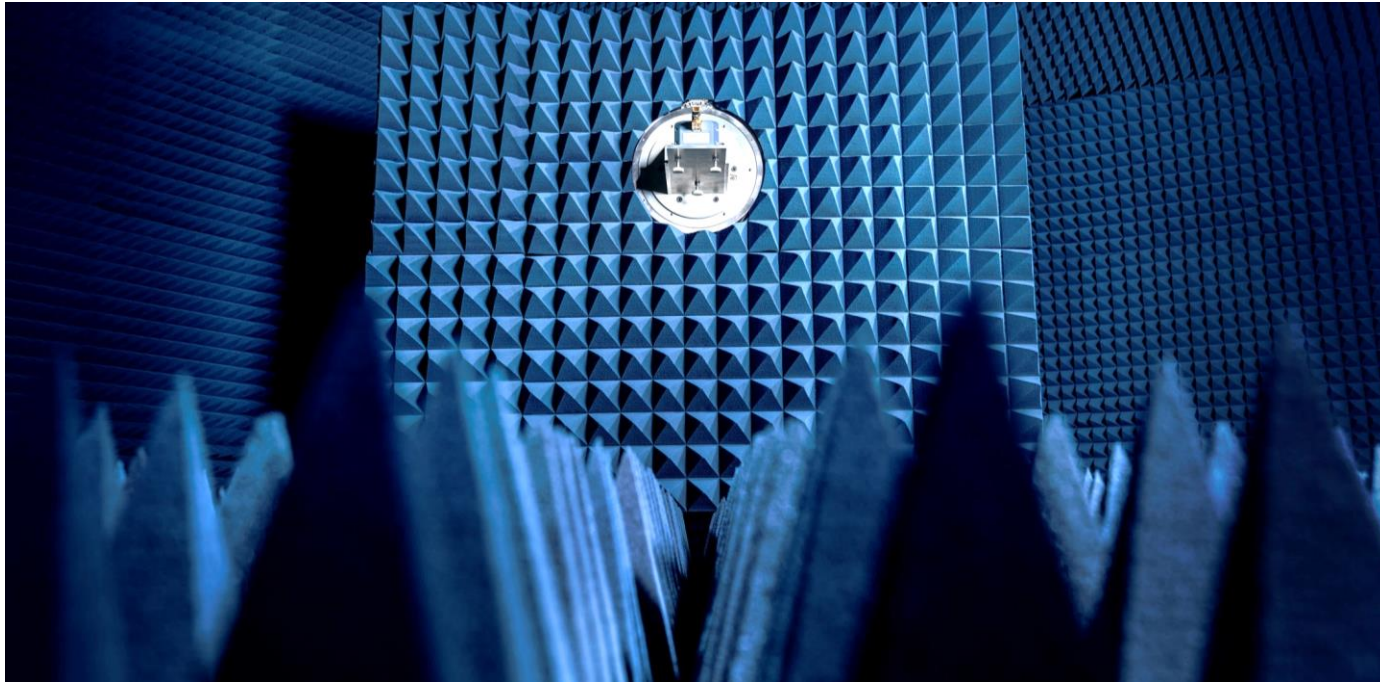
Zusammenfassung und Ausblick

- Vielzahl von (z.T. genormten) Messverfahren zur Bestimmung von Antennengewinn oder -faktor für den Freiraum oder einen bestimmten Messabstand
- Freifelder und SAC/FAR (z.T. Compact Ranges) für den unteren Frequenzbereich (bis wenige GHz)
- Antennenscanner für den oberen Frequenzbereich
- Einsatz effektiver Nah-Fernfeld-Transformationsalgorithmen (z.B. FIAFTA) erlaubt Bestimmung von Antennenabstrahlcharakteristiken in Antennenscannern

zukünftig:

- Weiterentwicklung der Nah-Fernfeld-Transformation (z. B für phasenlose Messung mit UAS)
- Kalibrierung intelligenter Antennensysteme (z.B. Beamforming, De-Embedding,...)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

PD Dr.-Ing. Thomas Kleine-Ostmann
Arbeitsgruppe 2.21 – Elektromagnetische Felder und Antennenmesstechnik

Telefon: 0531 592 2210

E-Mail: thomas.kleine-ostmann@ptb.de

<http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt2/fb-22/ag-221.html>

