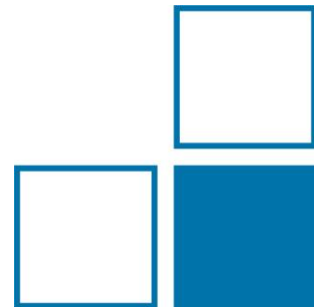


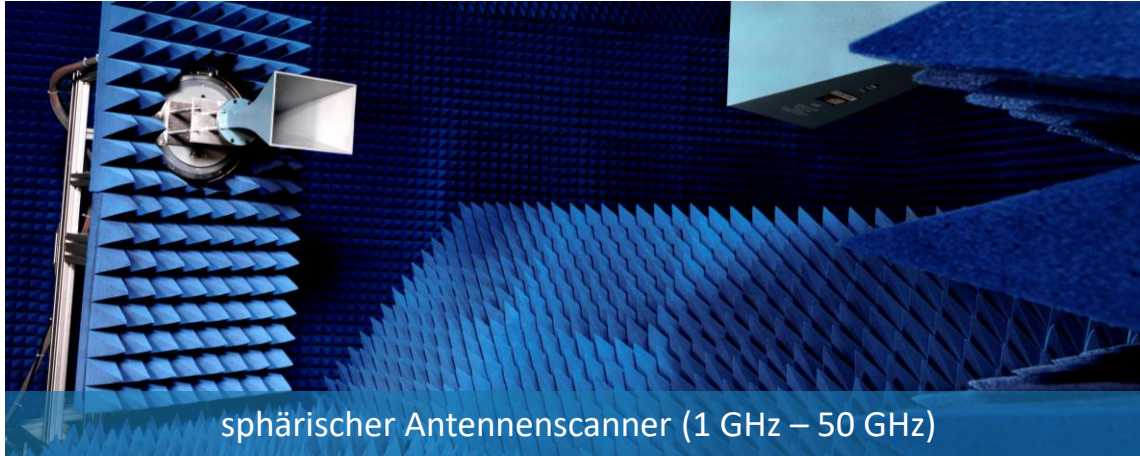
Aktuelle Entwicklungen in der Nahfeld-Antennenmesstechnik

ein Überblick zu Tätigkeiten der PTB

David Ulm, AG 2.21

Physikalisch-Technische Bundesanstalt





sphärischer Antennenscanner (1 GHz – 50 GHz)



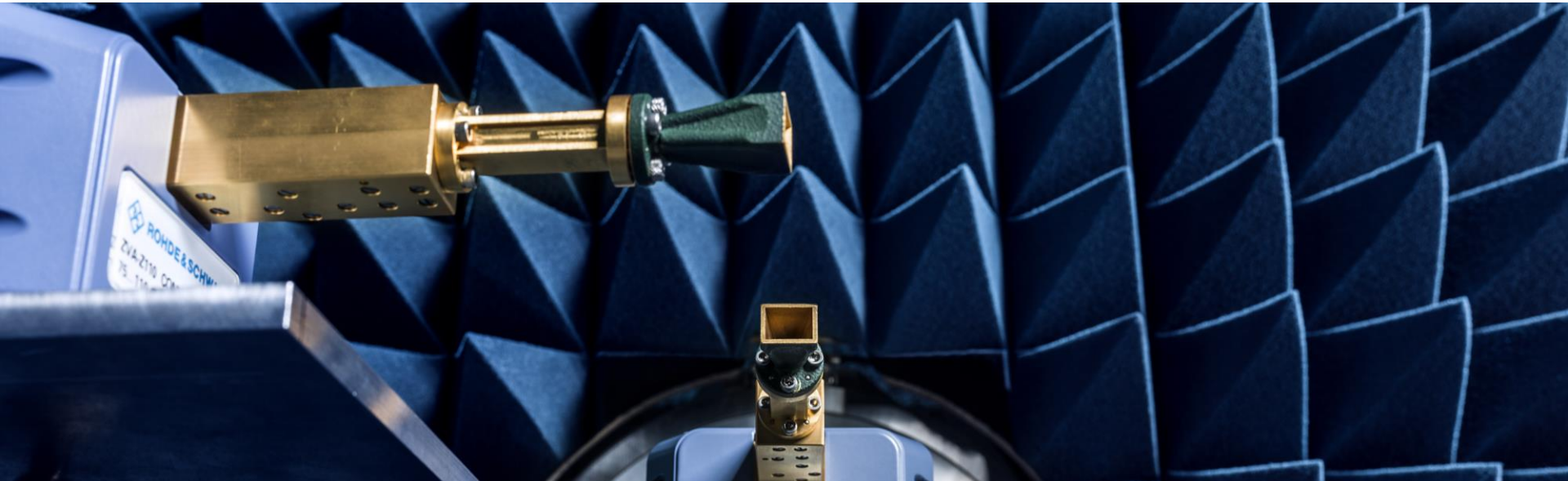
drohnenbasiertes System

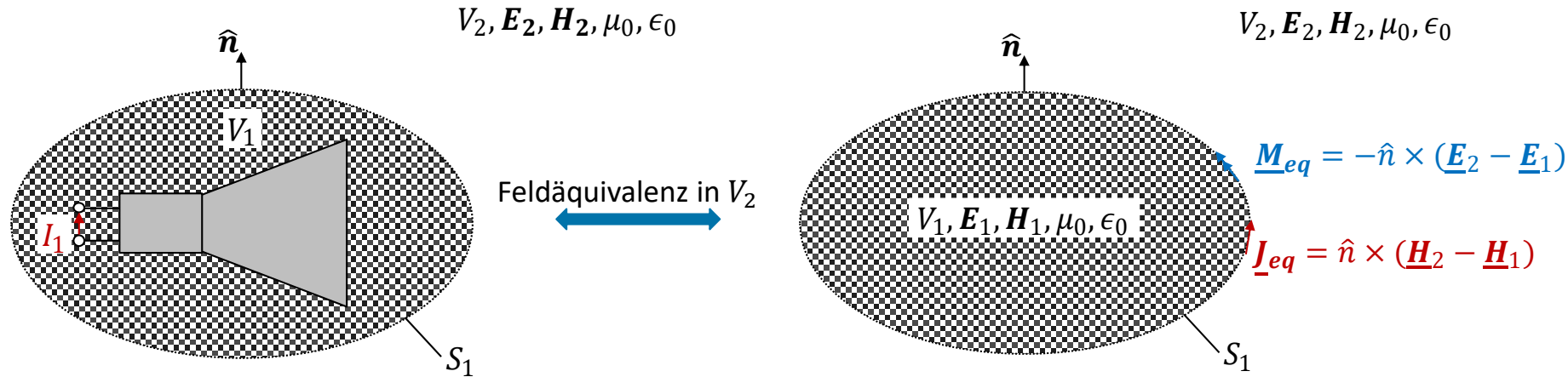
- CMC-Einträge für Antennengewinn und Pattern im Frequenzbereich 1 GHz – 18 GHz
- Erweiterung der Messmöglichkeiten um drohnenbasiertes System und mm-Wellenscanner
- beide Systeme können keine reguläre Abtastung der Felddaten sicherstellen



planarer mm-Wellenscanner

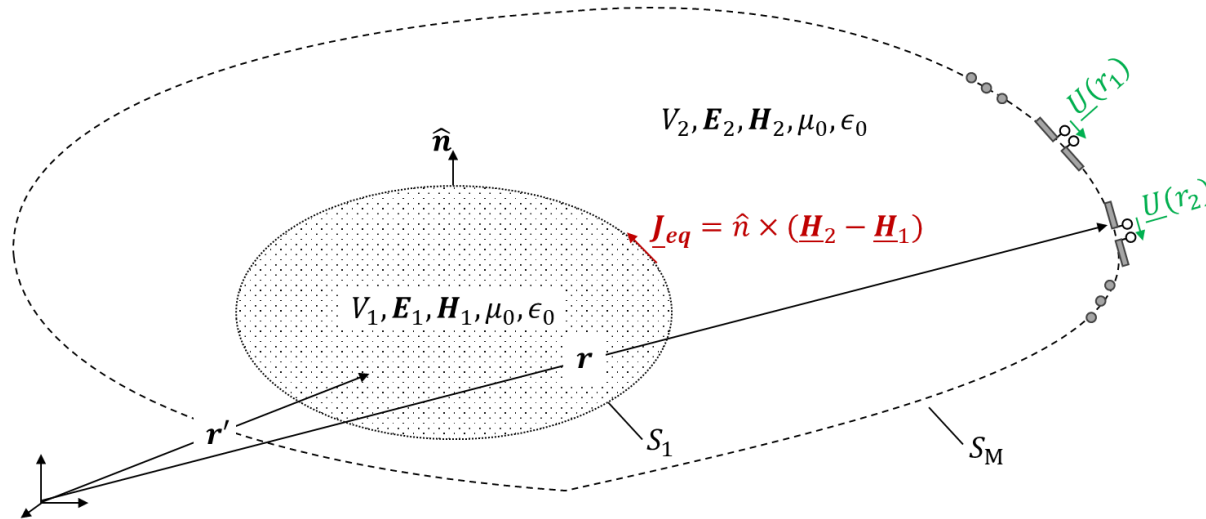
1. Grundlagen zur Quellrekonstruktion
2. drohnenbasierte Nahfeld-Antennenmessungen
3. NF-Antennenmesstechnik im mm-Wellenbereich





- *Eindeutigkeitssatz*: eine eindeutige Lösung kann durch Festlegung der Randbedingungen erreicht werden ► Ersetzen der Antenne durch fiktive Oberflächenstromverteilung
- für die Darstellung von äußeren Feldern in unbeschränkten Medien genügt es (theoretisch), entweder mit elektrischen \underline{J}_{eq} oder magnetischen Oberflächenströmen \underline{M}_{eq} zu arbeiten^[4.1]

[4.1] E. Martini, G. Carli and S. Maci, "An Equivalence Theorem Based on the Use of Electric Currents Radiating in Free Space," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 421-424, 2008



- durch Messung des elektrischen Feldes \underline{E} einer geschlossenen Hüllfläche S_M , kann mit Hilfe der EFIE eine äquivalente Quellstromverteilung rekonstruiert werden:

$$\underline{E}(\mathbf{r}) = \oint\oint_{S_1} \mathbf{G}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \underline{J}_{eq}(\mathbf{r}') da'$$

- damit ist das EM-Feld im gesamten Volumen V_2 eindeutig bestimmt [5.1]

Diagonalform der EFIE

Das elektrische Feld eines räumlichen Stroms kann mit Hilfe des EFIE berechnet werden:

$$\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = \oint\oint_{S_1} \mathbf{G}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \underline{\mathbf{J}}_{eq}(\mathbf{r}') d\alpha'$$

$$\mathbf{G}_E(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \left(\mathbf{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$$

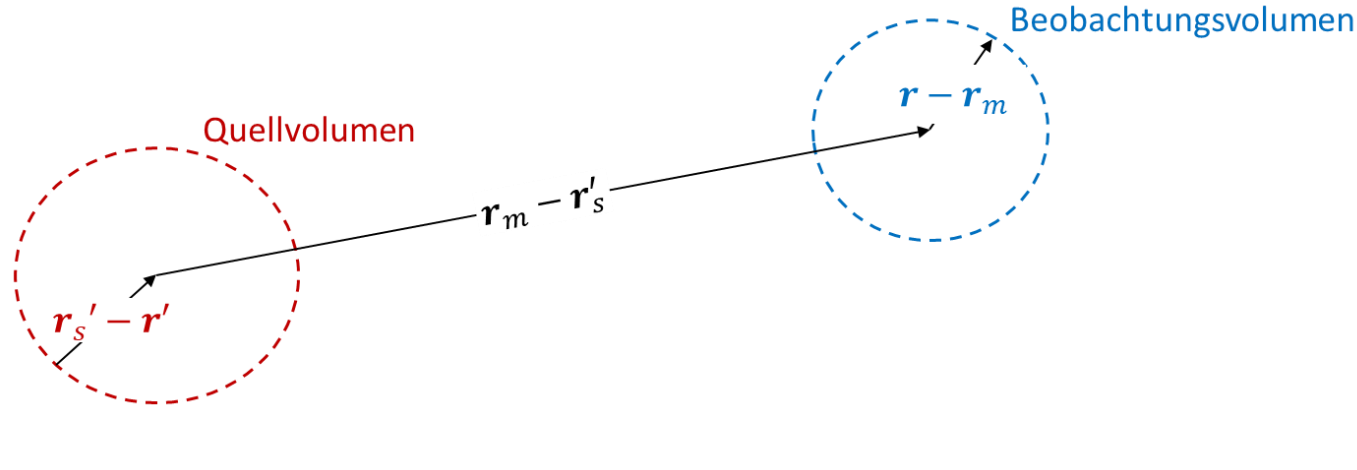
solange sich das Quell- und das Beobachtungsvolumen nicht überschneiden^[6.1]

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

spektrale Darstellung:

$$\underline{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \oint\oint e^{j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_m - \mathbf{r})} \cdot T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_s) \cdot \underbrace{\left(\mathbf{I} - \hat{\mathbf{k}}\hat{\mathbf{k}} \right) \oint\oint_{S_1} \underline{\mathbf{J}}_{eq}(\mathbf{r}') e^{-j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}')} d\alpha' d\hat{\mathbf{k}}}_{=\tilde{\mathbf{J}}(\hat{\mathbf{k}})}$$

[6.1] R. Coifman, V. Rokhlin and S. Wandzura, "The fast multipole method for the wave equation: a pedestrian prescription," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 35, no. 3, pp. 7-12, June 1993, doi: 10.1109/74.250128.

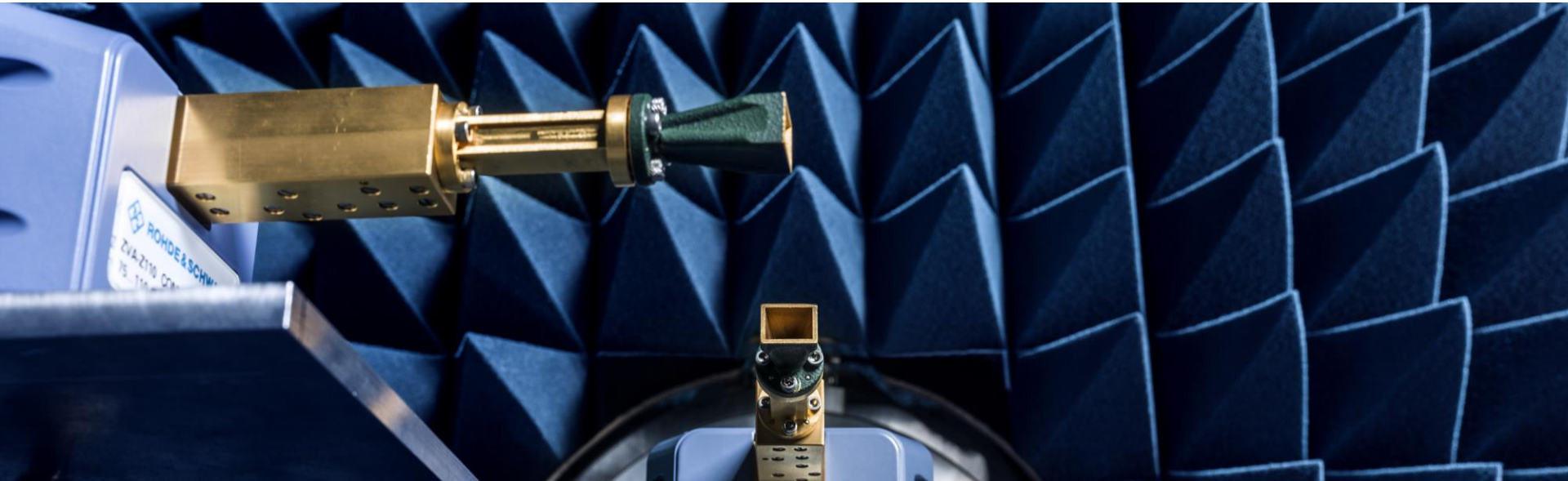


Bei ausreichendem Abstand von Quell- und Beobachtungsvolumen kann die Feldberechnung lokal mit ebenen Wellen durchgeführt werden:

$$\underline{\underline{E}}(\mathbf{r}) = -\frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \iint e^{-j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_m)} \cdot T_L(\mathbf{k}, \mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_s) \cdot \underbrace{\left(\mathbf{I} - \hat{k}\hat{k} \right) \iint_{S_1} \underline{\underline{J}}_{eq}(\mathbf{r}') e^{-j\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r}'_s - \mathbf{r}')} da' d\mathbf{k}}_{=\tilde{\mathbf{j}}(\hat{k})}$$

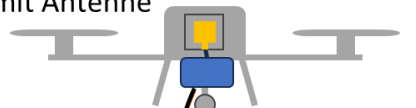
Jede ausgehende ebene Welle des Quellvolumens wird mit Hilfe des Translationsoperators in eine ebene Welle in das Beobachtungsvolumen translatiert.

1. Grundlagen zur Quellrekonstruktion
2. drohnenbasierte Nahfeld-Antennenmessungen
3. NF-Antennenmesstechnik im mm-Wellenbereich



drohnenbasierte Nahfeld-Antennenmessungen

Drohne mit Antenne

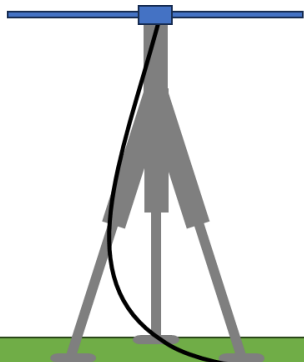


RFoF-Übertragung

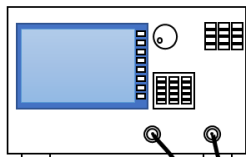
- Da die RFoF-Module unidirektional sind, ist eine modifizierte Systemfehlerkorrektur erforderlich
- Berücksichtigung des Bodeneinflusses ist erforderlich ► DFG SPP 2433

<https://www.uni-bremen.de/spp-2433/projekte>

Referenzantenne



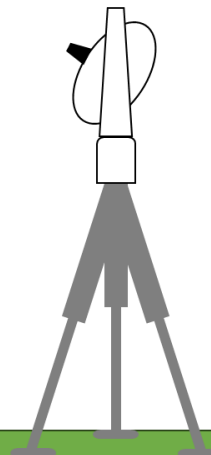
Netzwerkanalysator



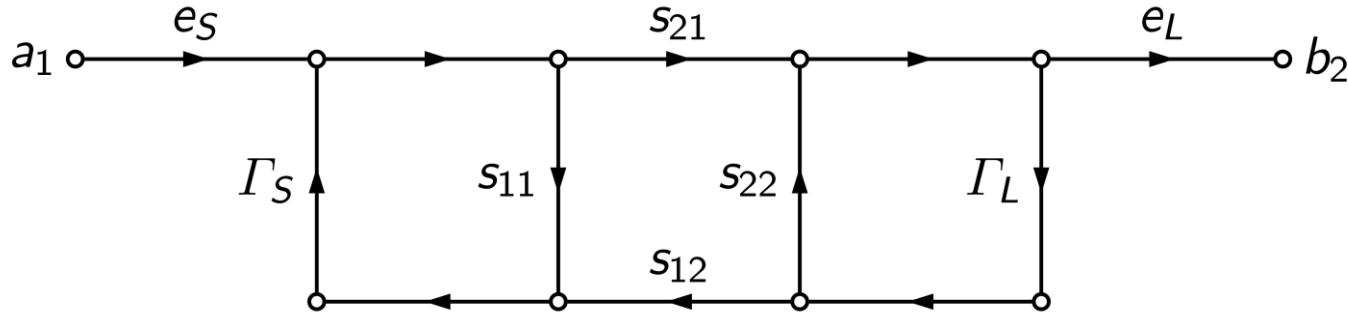
Stromversorgung



Lasertracker



Extended TransNorm - Herleitung



- Analyse des Signalflussgraphen ergibt die folgende Vorwärtsübertragung

$$s_{21}^M = \frac{b_2}{a_1} = \frac{s_{21} \cdot e_S e_L}{1 - s_{11} \Gamma_S - s_{22} \Gamma_L + \cancel{\Gamma_L \Gamma_S (s_{11} s_{22} - s_{12} s_{21})}}$$

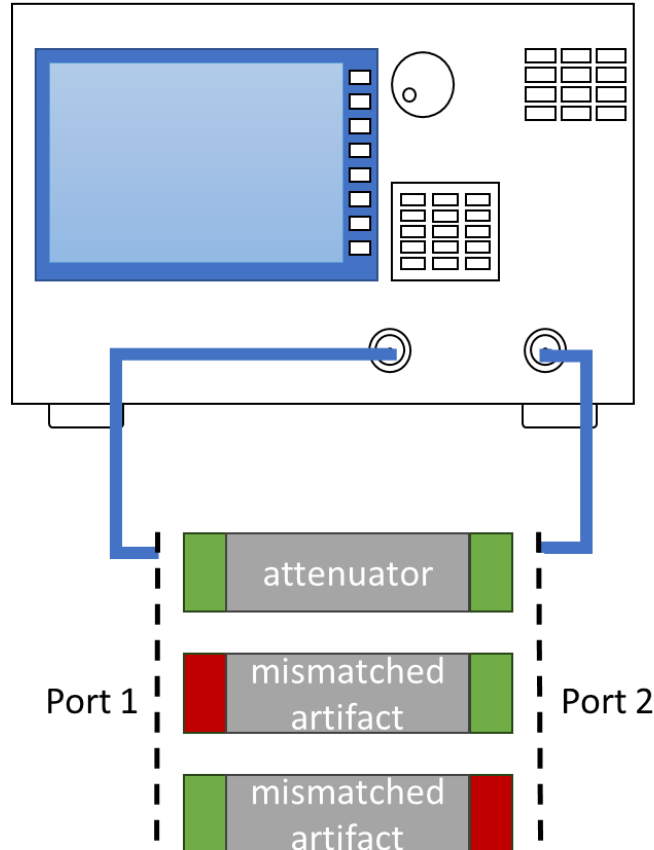
- diese Beziehung kann durch die folgende Linearisierung angenähert werden:

$$s_{21}^M \approx s_{21} \cdot e_S e_L + s_{21}^M s_{11} \cdot \Gamma_L + s_{21}^M s_{22} \cdot \Gamma_S$$

- falls relevant, kann der Einfluss von Übersprechen vorab kompensiert werden

Extended TransNorm - Konzept

vector network analyzer

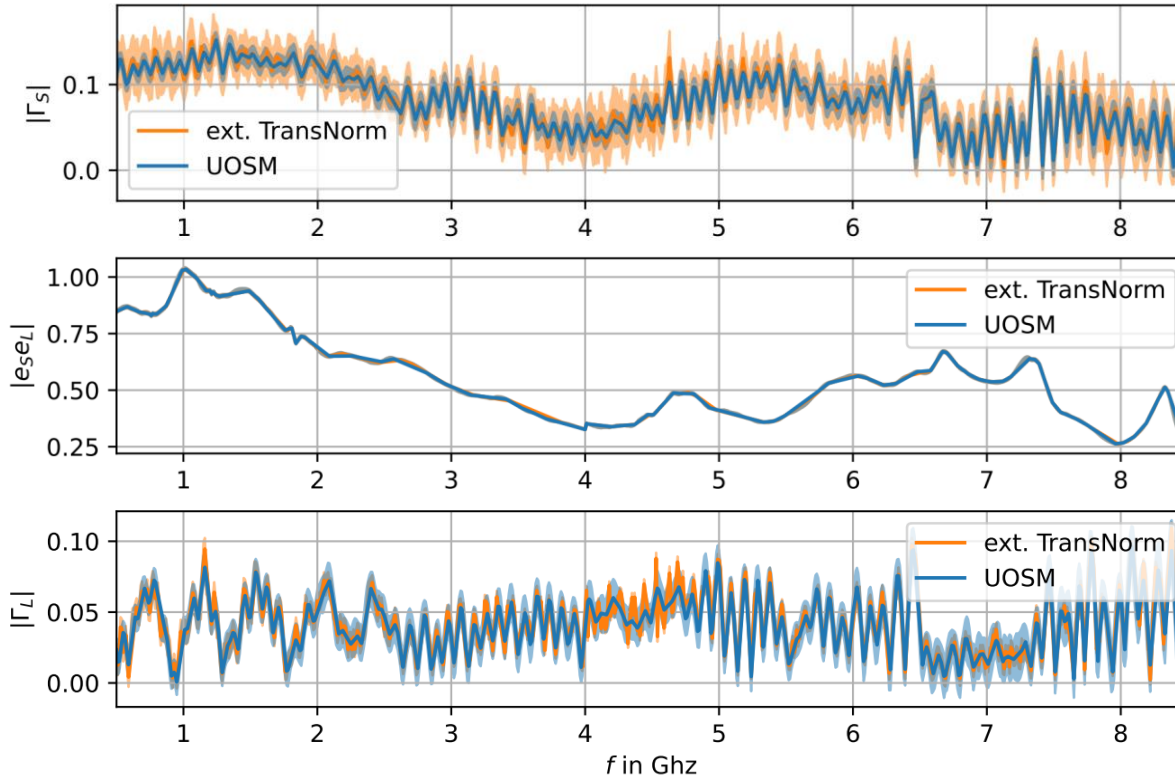


- die linearisierte Darstellung kann zur Formulierung eines linearen Gleichungssystems verwendet werden

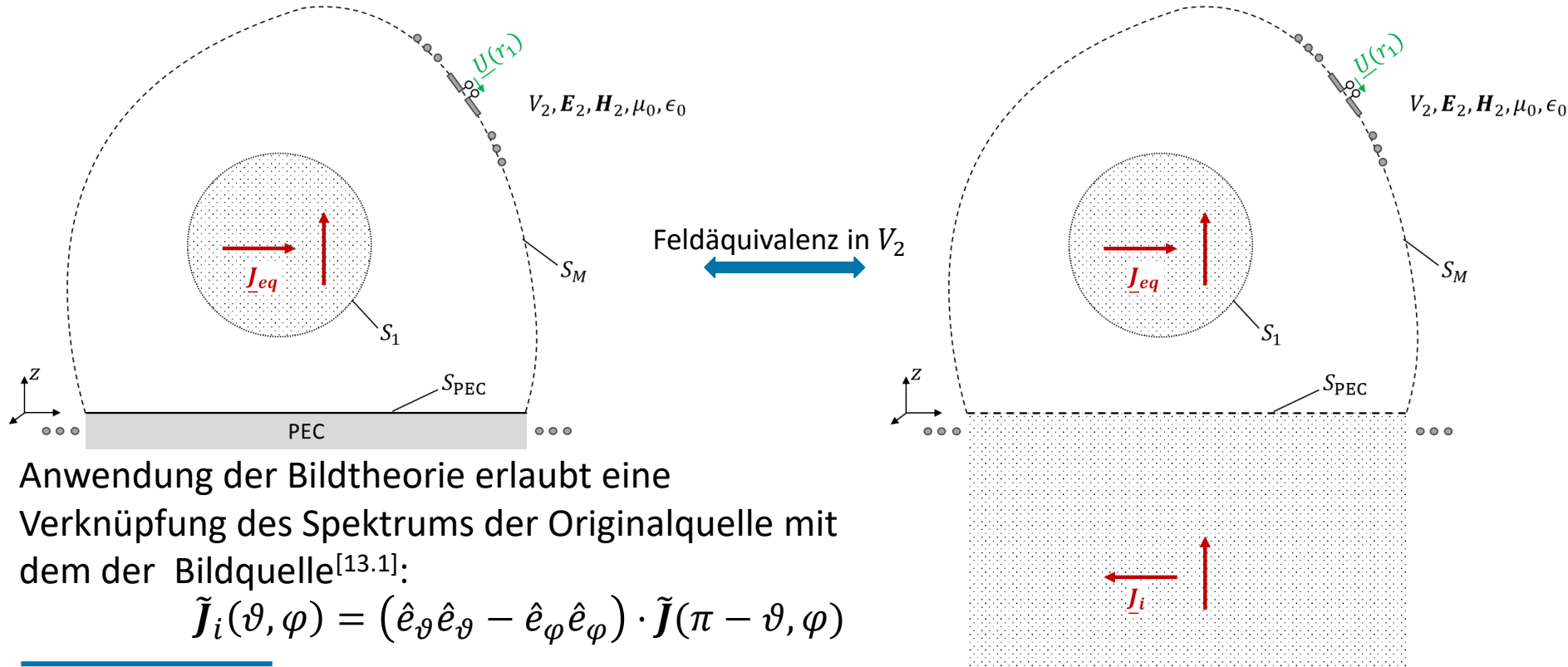
$$\begin{pmatrix} S_{21}^{M1} \\ S_{21}^{M2} \\ S_{21}^{M3} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} S_{21}^1 & S_{21}^{M1} s_{11}^1 & S_{21}^{M1} s_{22}^1 \\ S_{21}^2 & S_{21}^{M2} s_{11}^2 & S_{21}^{M2} s_{22}^2 \\ S_{21}^3 & S_{21}^{M3} s_{11}^3 & S_{21}^{M3} s_{22}^3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_S e_L \\ \Gamma_S \\ \Gamma_L \end{pmatrix}$$

- zur Verbesserung der Matrizenkondition wird ein einseitig fehlangepasstes Zweitor als Kalibrierstandard verwendet
- um das Ergebnis weiter zu verbessern, können mehr als drei Standards verwendet werden

Extended TransNorm - Ergebnisse



- Test des Verfahrens durch Vergleich der Fehlerboxparameter mit denen einer klassischen Systemfehlerkorrektur (UOSM)
- Anwendung bei Messungen
 - mit hoher Ausgangsleistung
 - mit langen, stark dämpfenden Kabeln
 - mit direktem Empfängerzugang

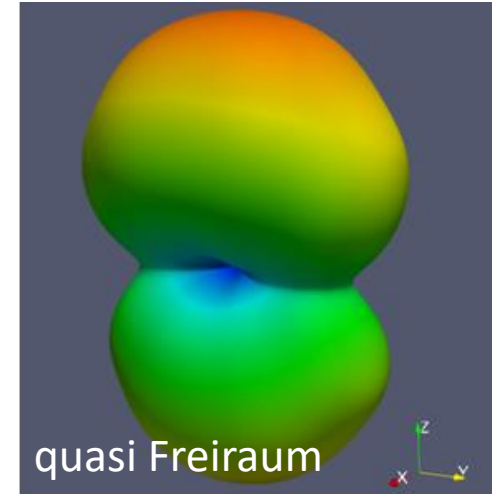
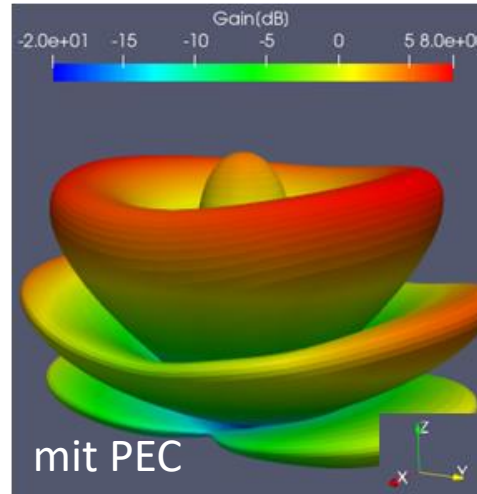
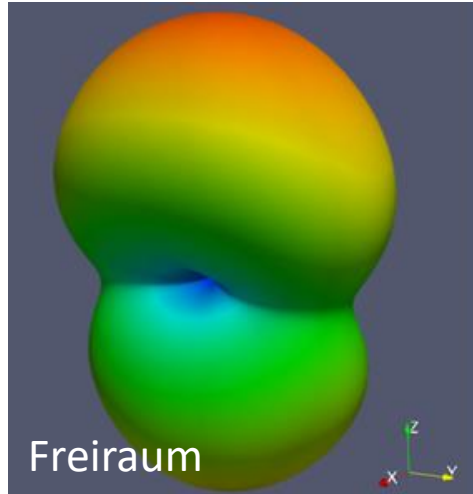
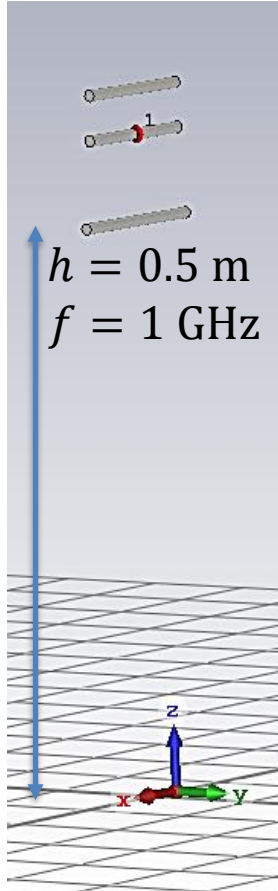


Anwendung der Bildtheorie erlaubt eine Verknüpfung des Spektrums der Originalquelle mit dem der Bildquelle^[13.1]:

$$\tilde{J}_i(\vartheta, \varphi) = (\hat{e}_\vartheta \hat{e}_\vartheta - \hat{e}_\varphi \hat{e}_\varphi) \cdot \tilde{J}(\pi - \vartheta, \varphi)$$

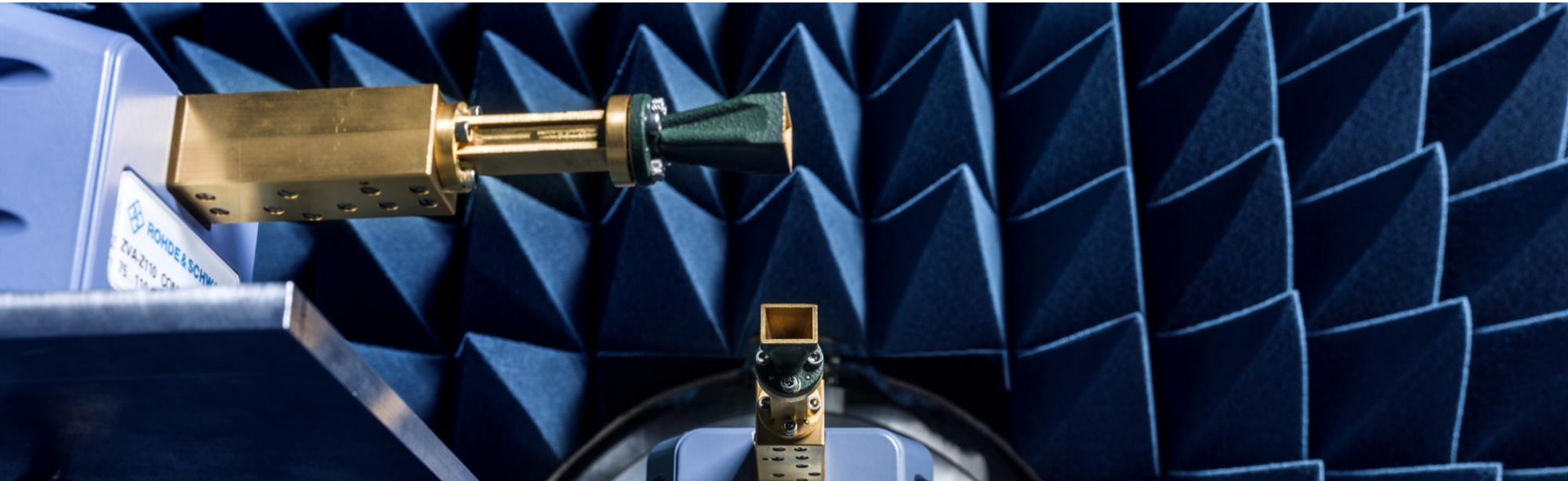
[13.1] R. A. M. Mauermayer and T. F. Eibert, "Spherical Field Transformation Above Perfectly Electrically Conducting Ground Planes," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 3, pp. 1465-1478, March 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2794406.

Messungen über PEC

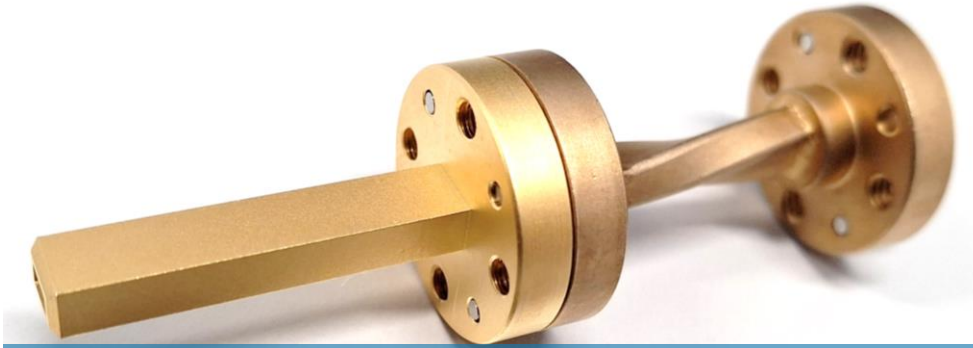


- nach der Rekonstruktion von **Original-** und **Bildquelle** kann das Quasi-Freiraumverhalten durch Berechnung des Feldes der Originalquelle berechnet werden
- der Einfluss des Bodens auf die ursprüngliche Stromverteilung muss ggf. in der Messunsicherheitsbilanz berücksichtigt werden

1. Grundlagen zur Quellrekonstruktion
2. drohnenbasierte Nahfeld-Antennenmessungen
3. NF-Antennenmesstechnik im mm-Wellenbereich

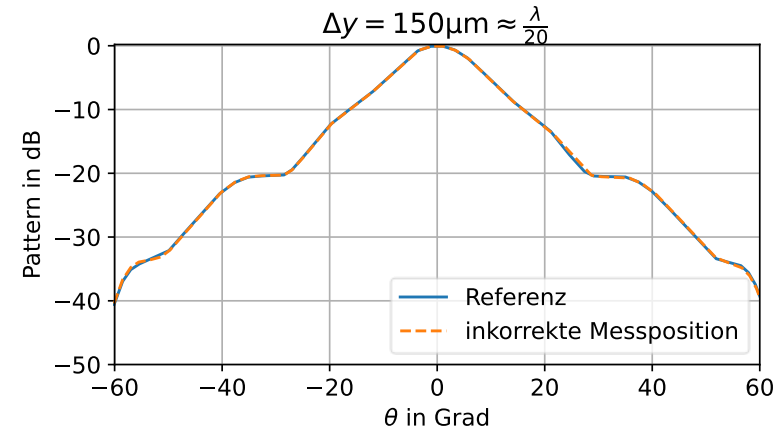
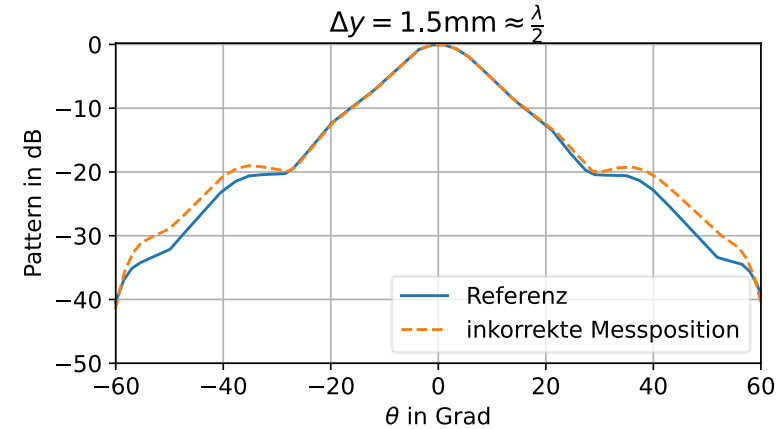


Laterale Positionierungsfehler bei 100 GHz

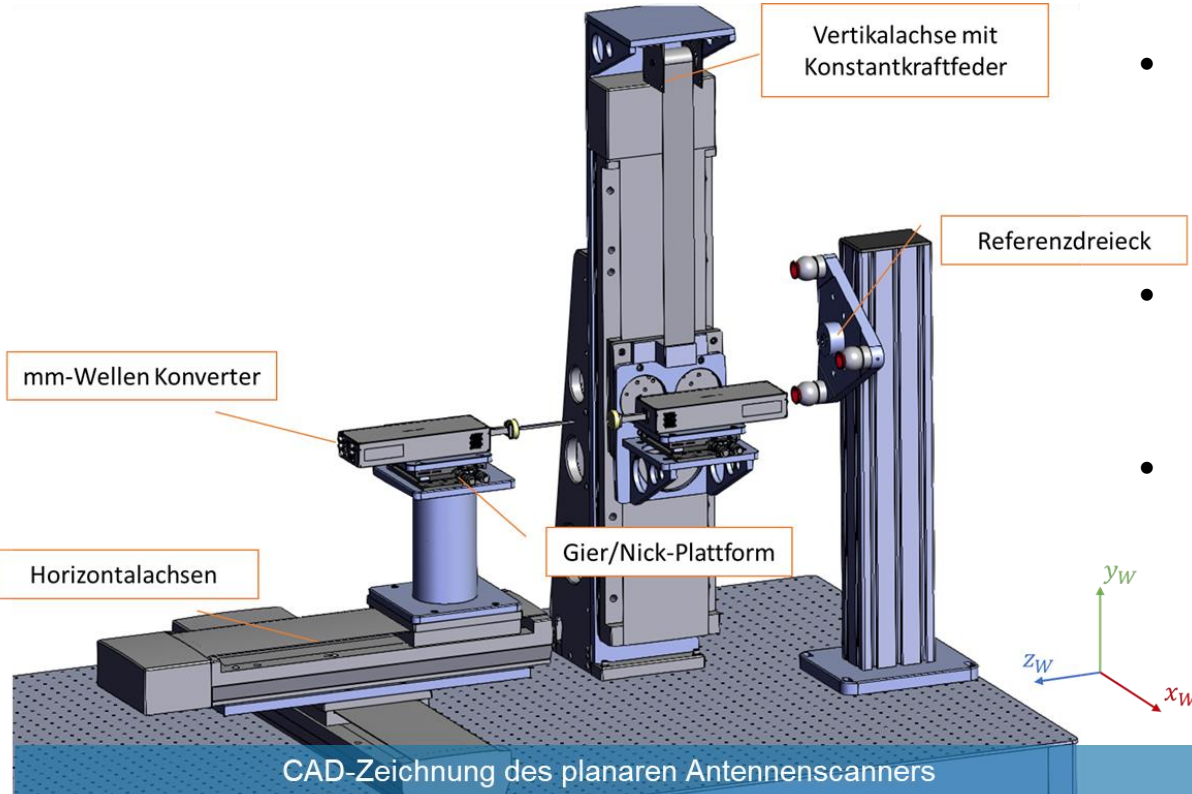


Hohlleiter-Sonde mit 90°-Hohlleiter-Twist

- Drehung der Sonde mittels 90°-Hohlleiter-Twist
- Simulation eines planaren NF-Scans eines zirkular-polarisierten Horns mit und ohne lateralem Positionierungsfehler bei 100 GHz
- akzeptabler Restfehler für $\Delta x, \Delta y \ll \lambda$



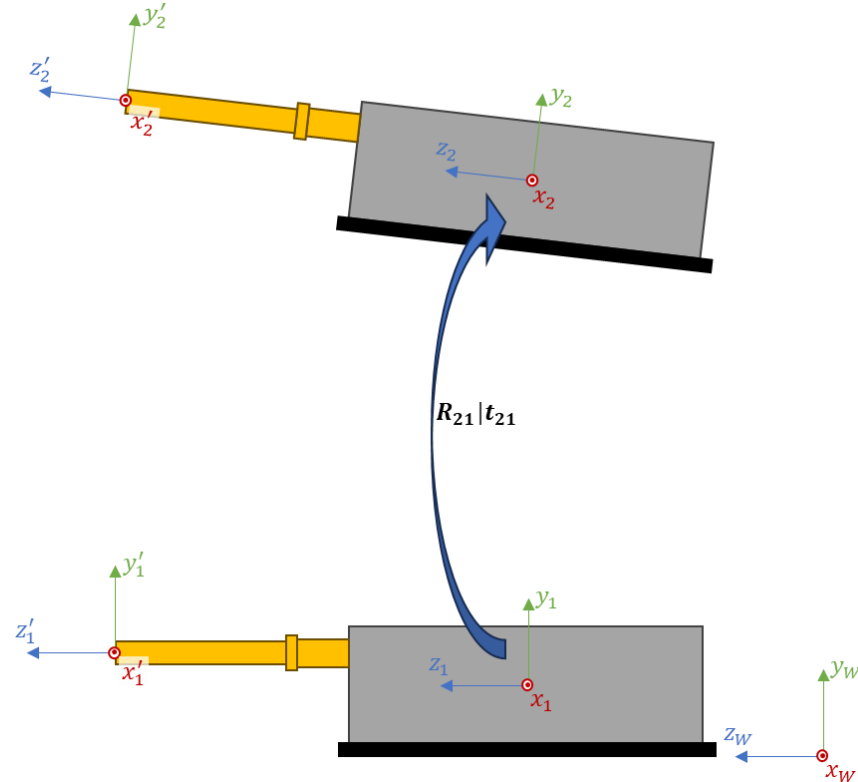
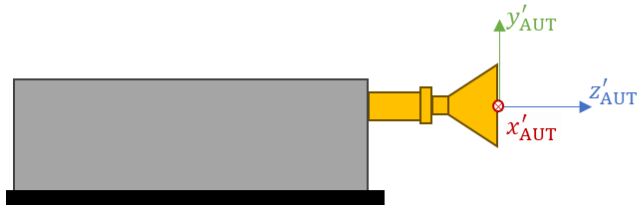
mm-Wellenscanner der PTB



- kurze HF-Kabel zur Reduktion von Fehlern durch Kabelbewegung, obwohl teilweise korrigierbar [17.1]
- mechanisch stabile Konstruktion mit hoher Wiederholpräzision
- fest montiertes Referenzdreieck
Definition eines übergeordneten Koordinatensystems

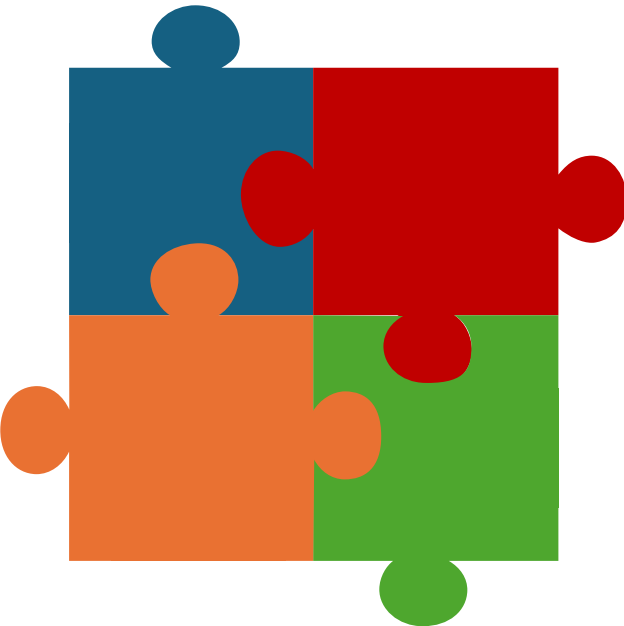
[17.1] Gellersen, Frauke Kathinka Helene, David Ulm, Florian Rausche, Andreas Tobias Schramm and Karsten Kuhlmann. "Influence of LO cable movements on VNA measurements using Frequency Extensions." Advances in Radio Science (2024).

- Bestimmung von Rotation und Translation für verschiedene Positionen der Linearachsen mit Hilfe eines Lasertrackers unter Verwendung des *Kabsch-Umeyama Algorithmus* ^[18.1]
- Bestimmung des Offsets des Antennenkoordinatensystems mittels Computer Vision zur Kompensation des *Abbé-Fehlers*



[18.1] Kabsch W., A Solution for the Best Rotation to Relate Two Sets of Vectors, Acta Crystallographica Section A: Crystal Physics 32 (1976) 922-923.

Was benötigen wir im mm-Wellenbereich?



Koordinatenmesstechnik

Präzise Charakterisierung der eingesetzten Linearachsen mit Hilfe eines Laser-Trackers

Computer Vision

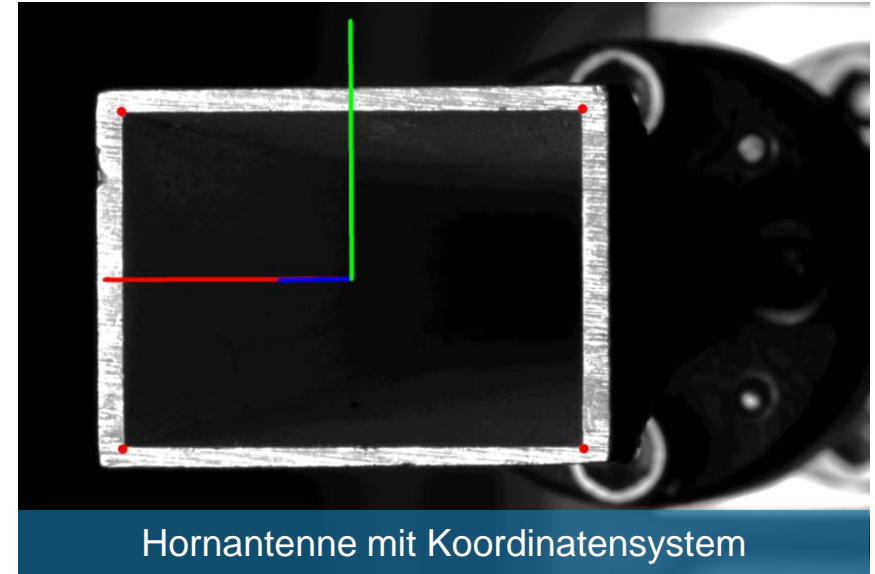
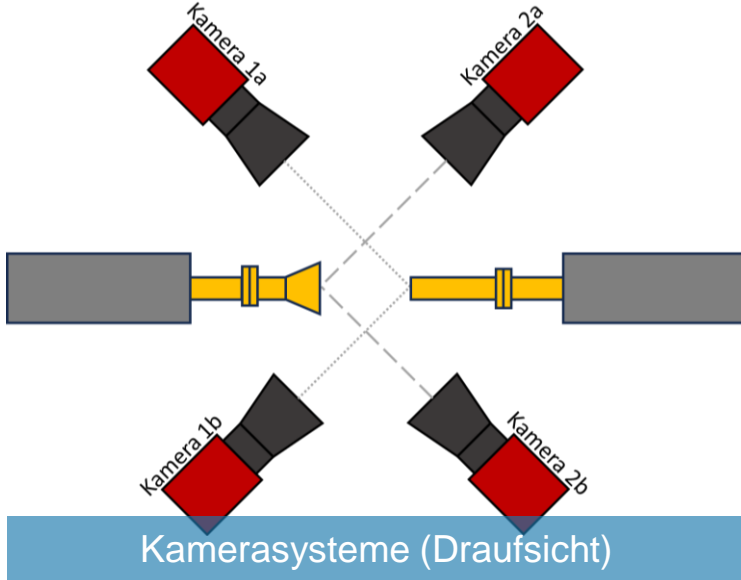
Bestimmung der Lage und Pose der Antennen im Koordinatensystem des Einmessvorgangs

Vektorielle Netzwerkanalyse

Kernkompetenz des FB Hochfrequenz und Felder: Messung der Streuparameter der Übertragungsstrecke

Numerik

(effiziente) Lösung des inversen Problems

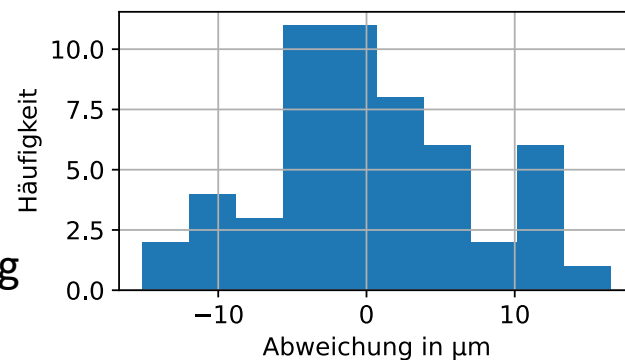


- sofern die Rotation und Translation zwischen zwei Kameras bekannt ist, kann die Lage von markanten Objektpunkten trianguliert werden
- Schätzung der Lage und Ausrichtung von Sonde und AUT mit Hilfe von Stereo-Kameras

Bilderkennung eines SMR

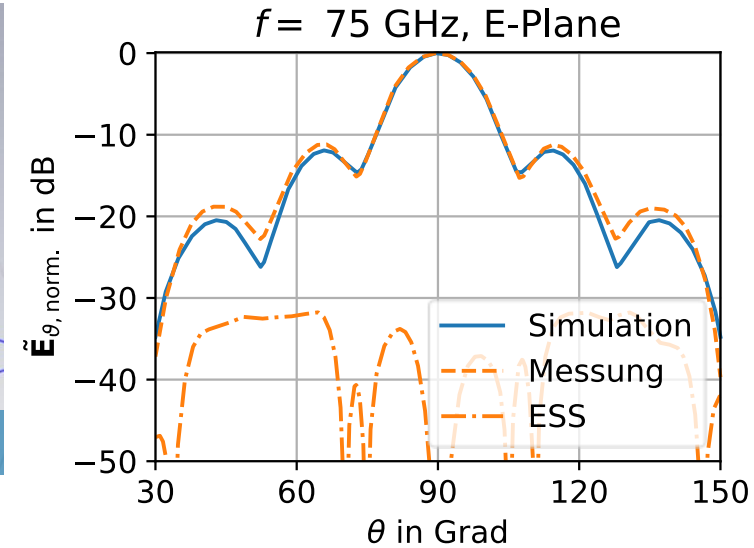
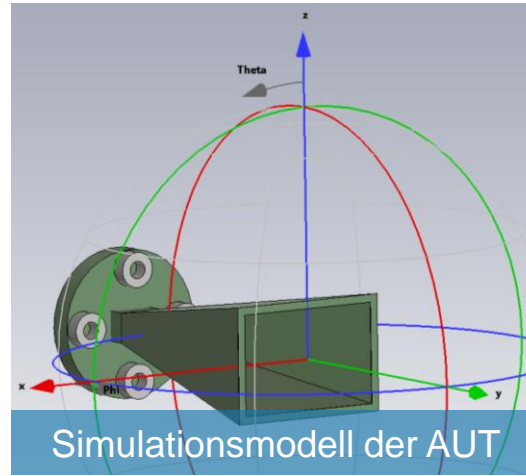
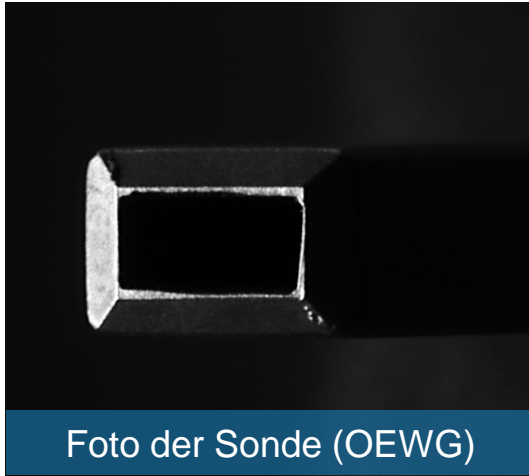


- relevante Spezifikationen eines typischen SMR ^[21.1]
 - Durchmesser: 12.7 mm (0.5 in.)
 - optische Zentrierung (MPE): $\pm 3 \mu\text{m}$
 - Rundheitsabweichung von Kugelform (MPE) : $\pm 3 \mu\text{m}$
- Aufnahme eines Hellfeldbildes zur besseren Bilderkennung



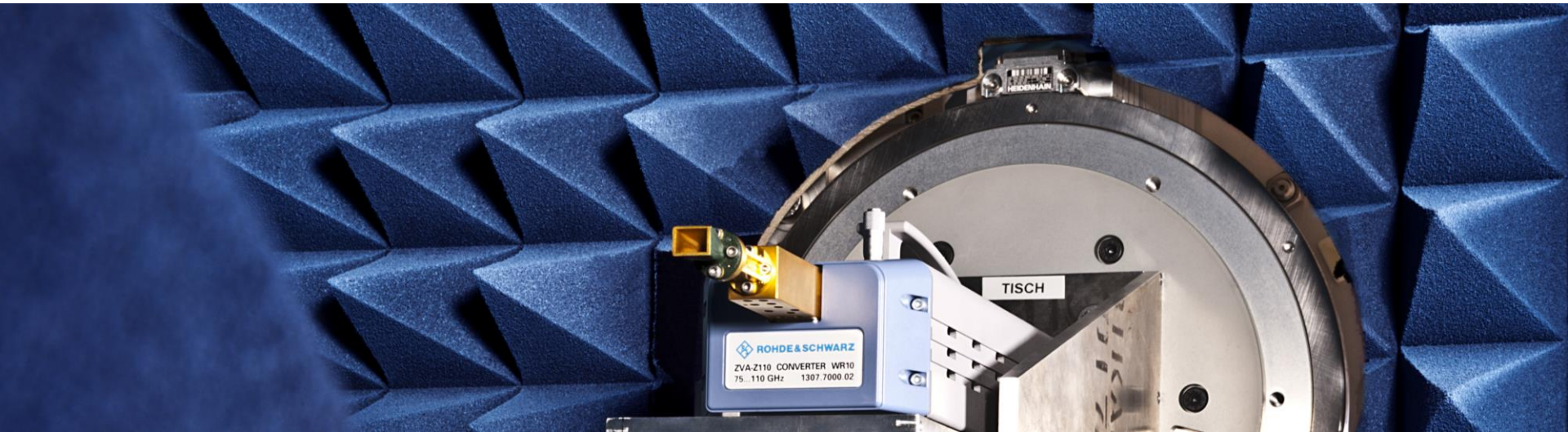
[21.1] https://shop.hexagonmi.com/na/en_US/USD/Catalog/Laser-Tracker/Reflectors/Red-Ring-Reflector-0-5%22-%28RRR%29-2-Pack/p/576238

erste Messergebnisse



- Messung einer Hornantenne Flann 25240-20 (Fraunhofer-Distanz: $\sim 300 \text{ mm}$ bei 75 GHz)
- Scaneigenschaften: $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ in einer Distanz von 50 mm
- schwierige Detektion der Sonden-Apertur
Überarbeitung der Sonden (optische Marker oder Fertigung beim wiss. Gerätebau)

- derzeitige Arbeiten in der PTB umfassen:
 - Vergrößerung der messbaren Antennen
 - Erhöhung des messbaren Frequenzbereichs
- nächstes Etappenziel: Bestimmung der Messunsicherheit und Etablierung einer Kalibrierdienstleistung im Band R740 (60 GHz – 90 GHz)





Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Bundesallee 100

38116 Braunschweig, Germany

David Ulm

Fachbereich 2.2 – Hochfrequenz und Felder



+49 531 592 2214



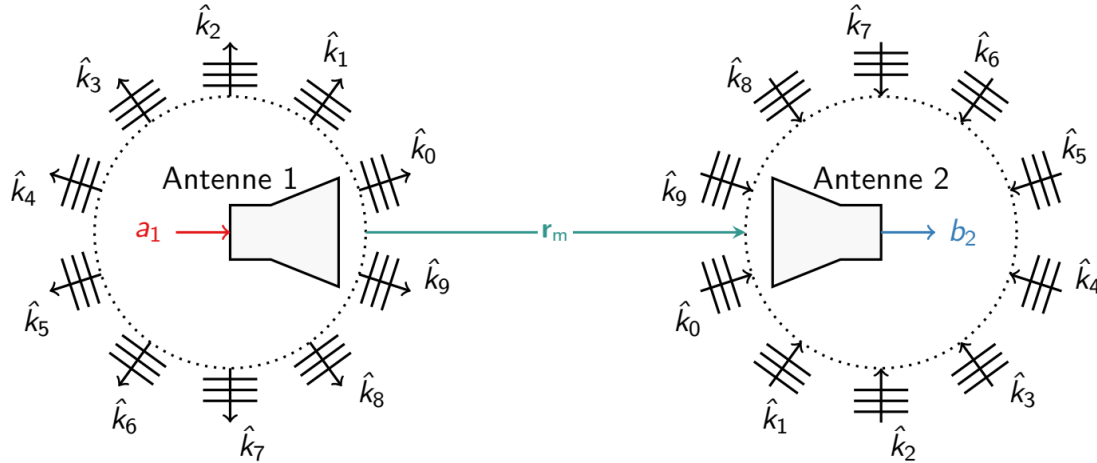
david.ulm@ptb.de



<https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-22.html>



scan me



Die Empfangsantenne gewichtet die einfallenden ebenen Wellen entsprechend ihrer eigenen Charakteristik [25.1]:

$$s_{21}(\mathbf{r}_m) = \frac{b_2}{a_1} = \frac{j\omega}{8\pi} \iint \underbrace{\tilde{\mathbf{J}}_2(-\hat{k}) \cdot \frac{1 - s_{22}}{I_2 \cdot \sqrt{Z_0}} \cdot T_L(k, \mathbf{r}_m - \mathbf{r}'_s) \cdot (\mathbf{I} - \hat{k}\hat{k})}_{=\tilde{\mathbf{E}}_2(-\hat{k})} \underbrace{\tilde{\mathbf{J}}_1(\hat{k}) \cdot \frac{1 - s_{11}}{I_1 \cdot \sqrt{Z_0}}}_{=\tilde{\mathbf{E}}_1(\hat{k})} d\hat{k}$$

[25.1] 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.