

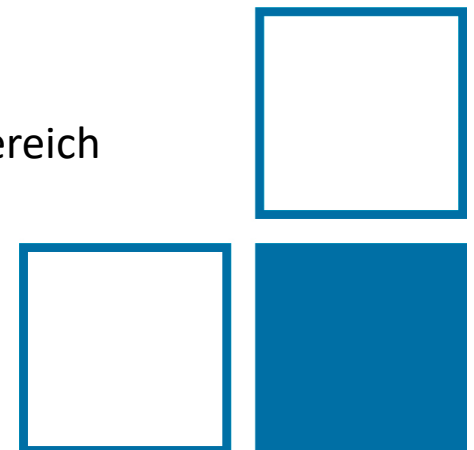
Leistungsvergleich zwischen leitungs- und quasi-optisch geführten elektromagnetischen Wellen

Rolf Judaschke, Mathias Kehrt, Karsten Kuhlmann, Andreas Steiger

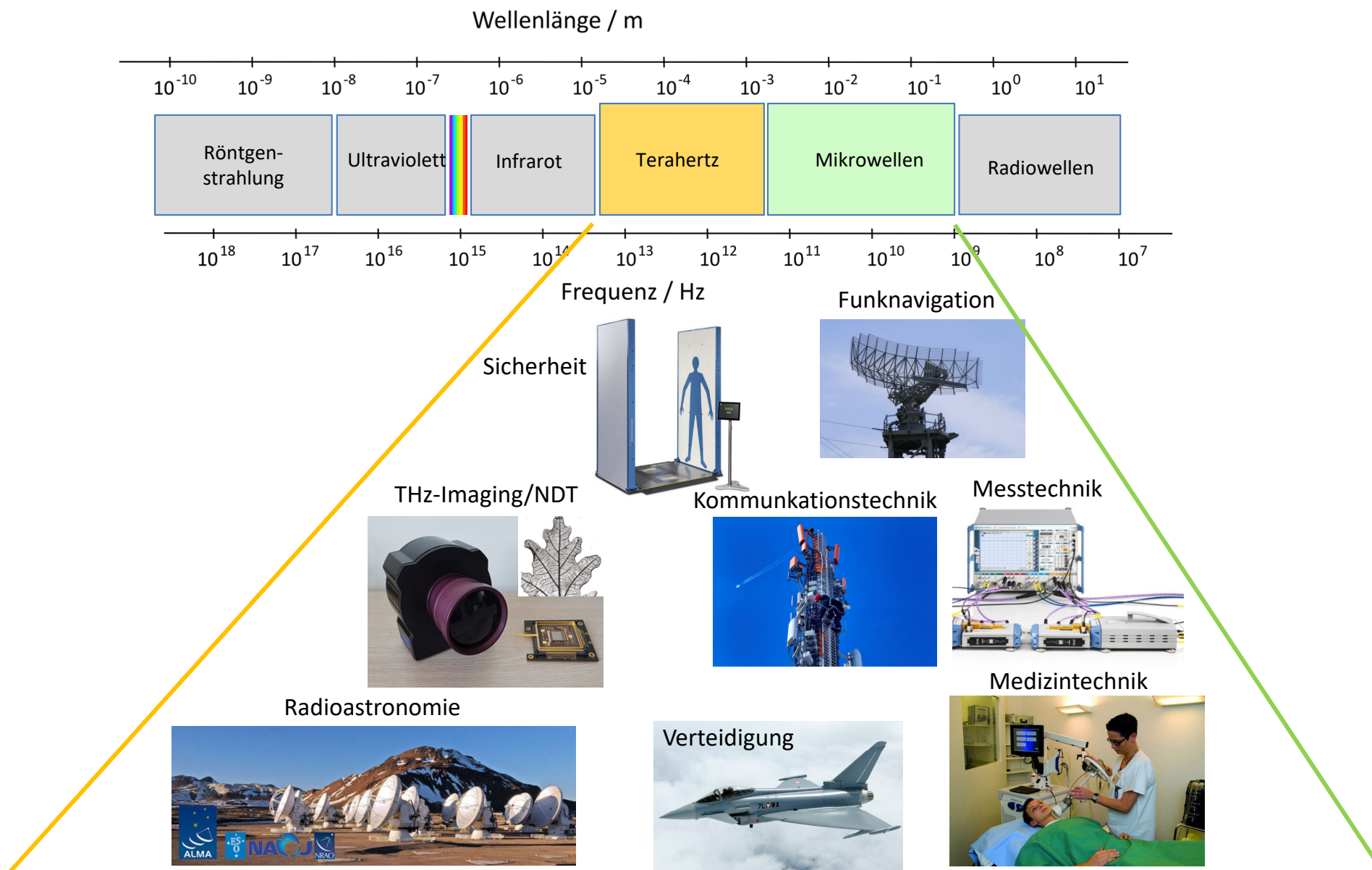
319. PTB-Seminar

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

18. Mai 2022

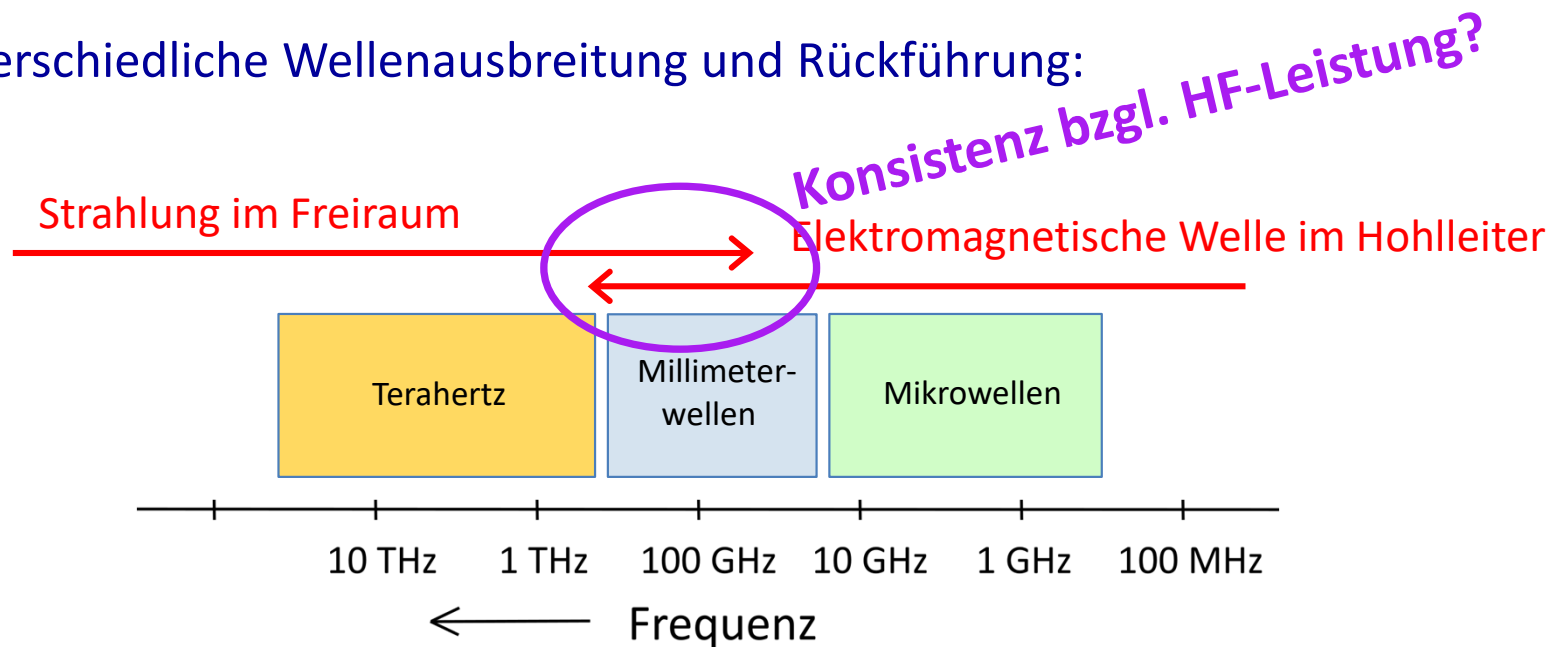


- Einleitung
- Motivation
- Leitungsgeführte Leistungsmessung
- Leistungsmessung im Freiraum
- Leistungsvergleich
- Messergebnisse
- Zusammenfassung
- Ausblick



T. Kleine Ostmann et al., „THz-Metrology“, Frequenz **62**, 137-142, 2008

- Messung der **Hochfrequenzleistung** ist Grundlage für die Entwicklung und Charakterisierung von Technologien im Mikrowellen- und Terahertz-Bereich
- unterschiedliche Wellenausbreitung und Rückführung:



Detektorradiometrie
und Strahlungsthermometrie

Hochfrequenz und
Felder

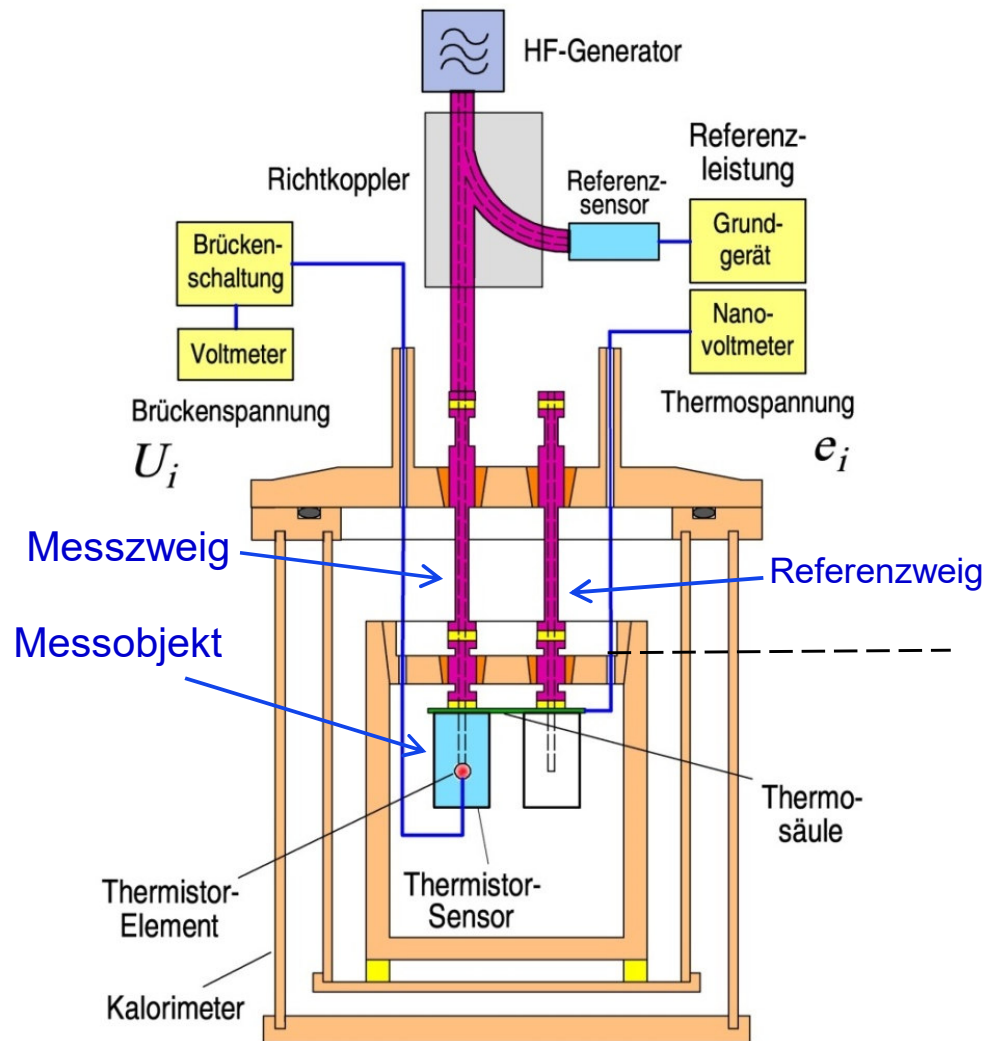


Terahertzradiometrie

Hochfrequenz-
Basisgrößen

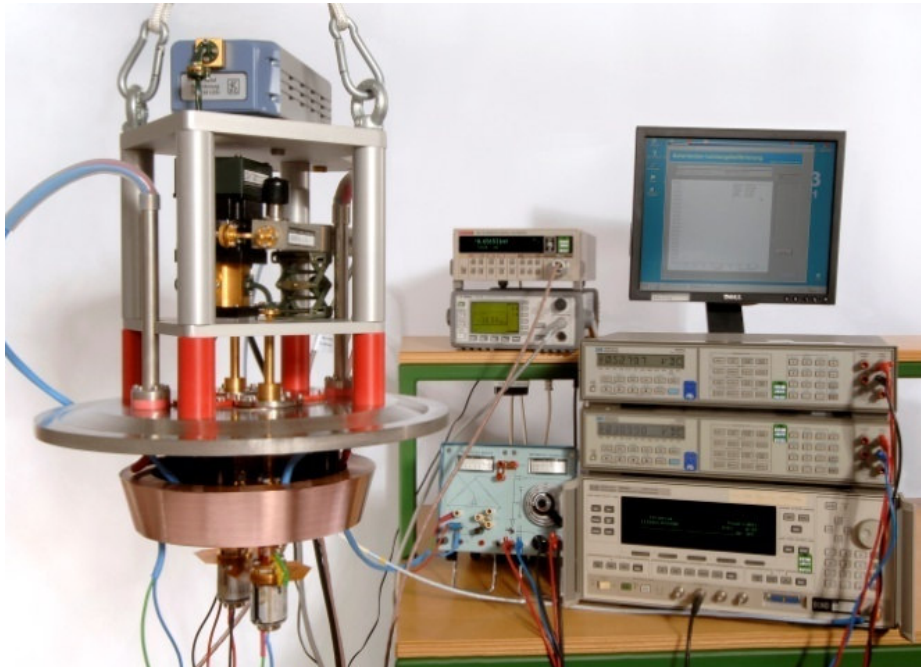


- Kalibrierung eines Leistungssensors im **Mikrokalorimeter**

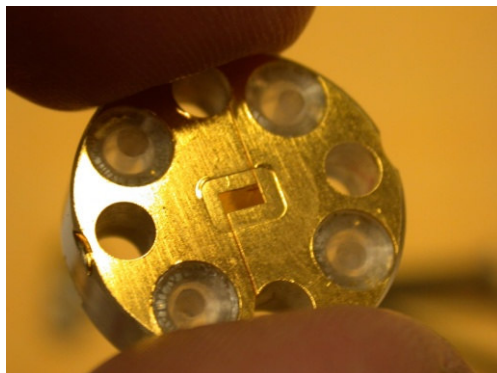


- HF/DC-Leistungsubstitution im Thermistorelement des Transferstandards durch automatischen Brückenabgleich
- zusätzliche Erwärmung in Referenzebene als Maß für absorbierte Leistung außerhalb des Thermistor-Elements (→ effektiver Wirkungsgrad)
- Rechthohlleiter-, koaxiale oder dielektrische Wellenleiterzuführung
- symmetrischer Aufbau
- hohe Temperaturstabilität erforderlich
- hohe thermische Zeitkonstante (> 2h pro Frequenzpunkt)
- Messleistung 1 bis 10 mW
- Standardmessunsicherheit < 1% @ 100 GHz

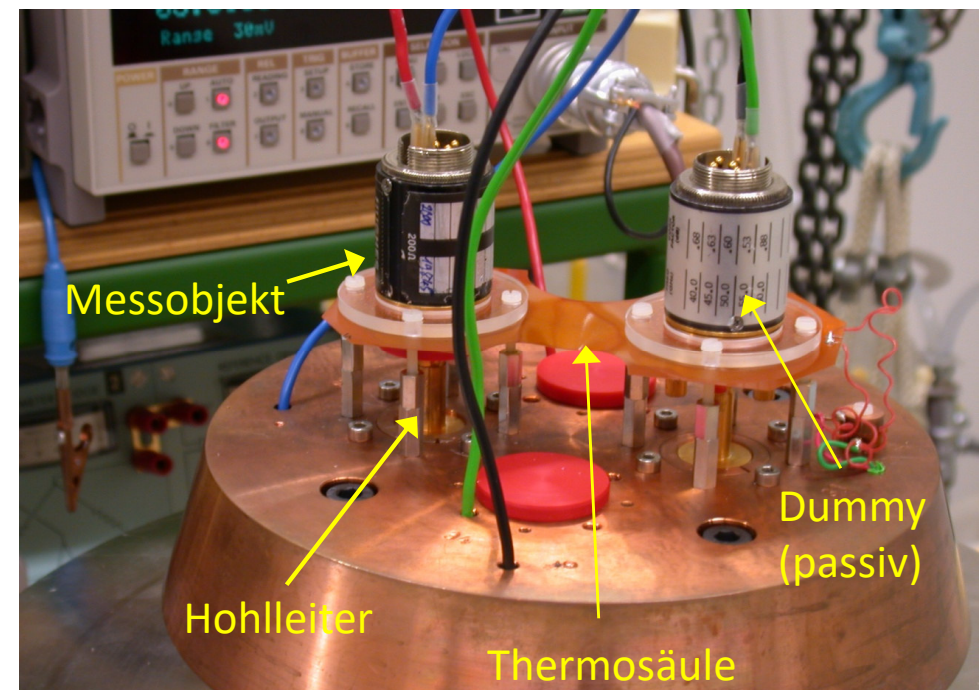
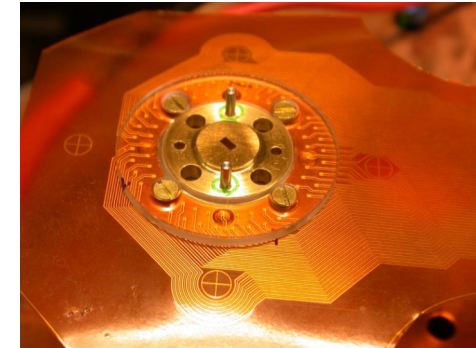
- Messaufbau:



Wärmeisulationsabschnitt

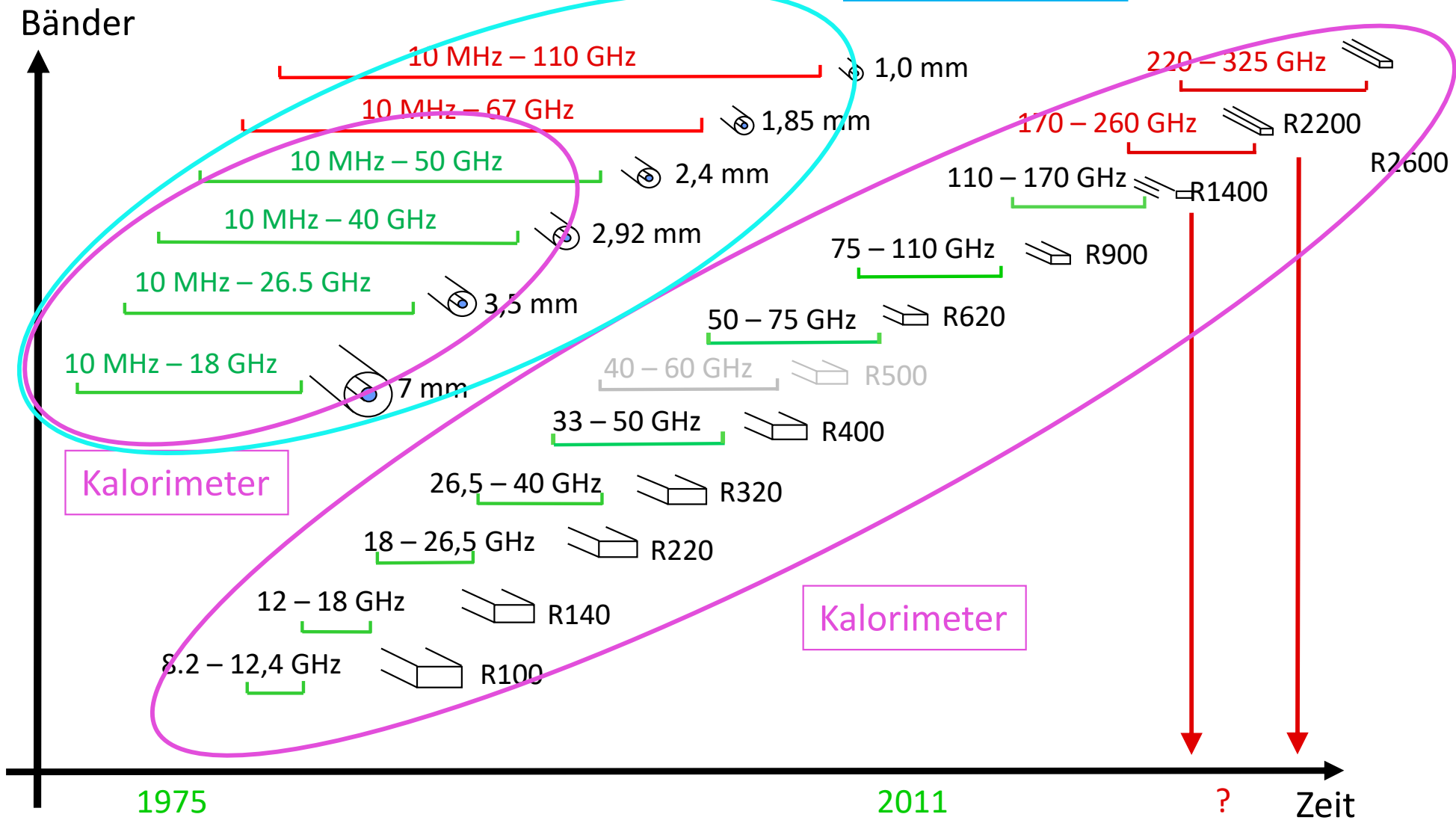


Thermosäule



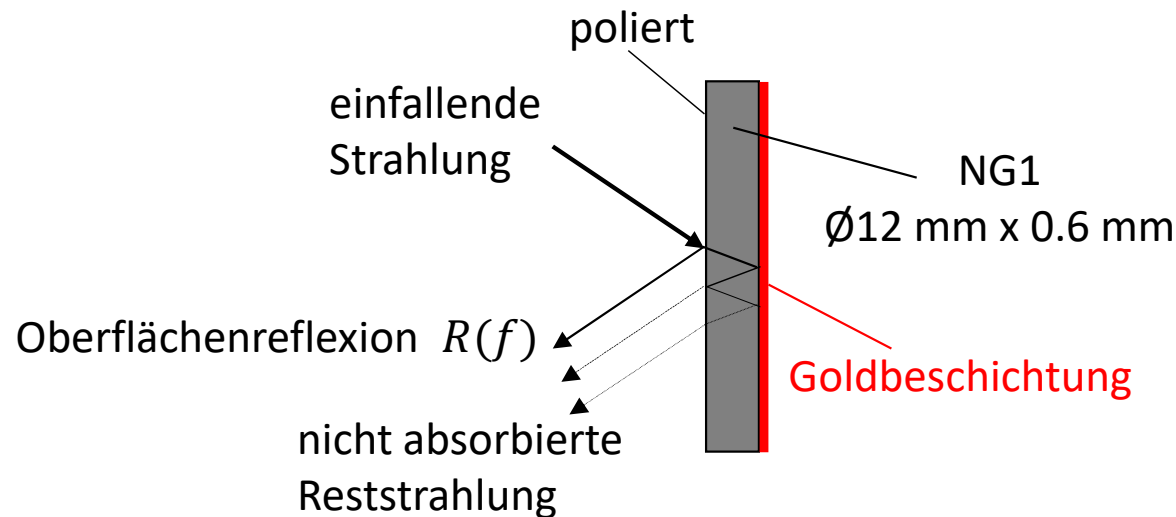
Leitungsgeführte Leistungsmessung (3)

Außenvergleich



- **PTB-Leistungsnorm für den Frequenzbereich 1 THz bis 5 THz**

- kommerzieller thermoelektrischer Laser-Leistungssensor mit modifiziertem Absorber:

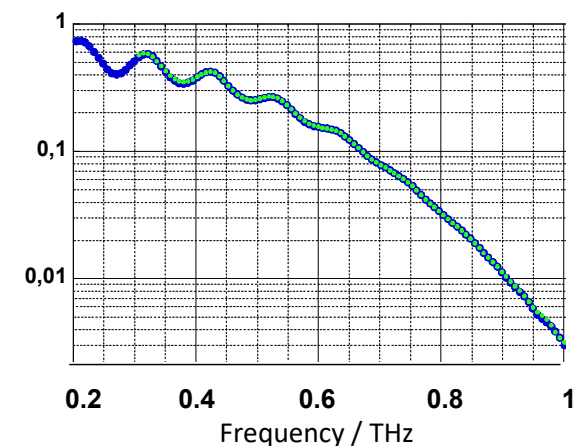


- Modell für Absorptionsgrad $A(f) = 1 - R(f)$

- Bestimmung der Empfindlichkeit $S(f)$ bei Kenntnis der Reflexion

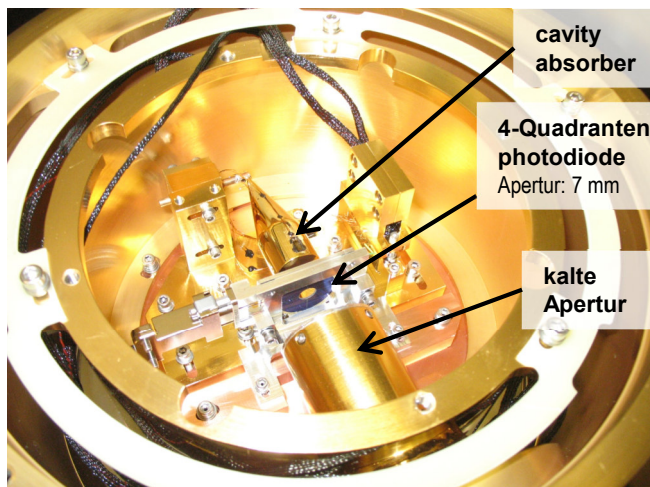
$$S(f) = S(f_0) \frac{A(f)}{A(f_0)}$$

Transmissionsgrad NG1



- **Kalibrierung des THz-Leistungsnormals im Bereich 1 THz bis 5 THz**

- 1) spektroskopische Messung der Reflexion $R(f)$ bei diskreten Frequenzen im Bereich 1 THz bis 5 THz sowie im sichtbaren Bereich bei 476 THz
- 2) Kalibrierung der spektralen Empfindlichkeit S bei 476 THz durch Vergleich mit Kryoradiometer mittels HeNe-Laser




Absolute Radiometrie bei $T = 4 \text{ K}$ mit schwarzem Körper als Strahlungsabsorber im Wellenlängenbereich 200 nm bis 10,6 μm

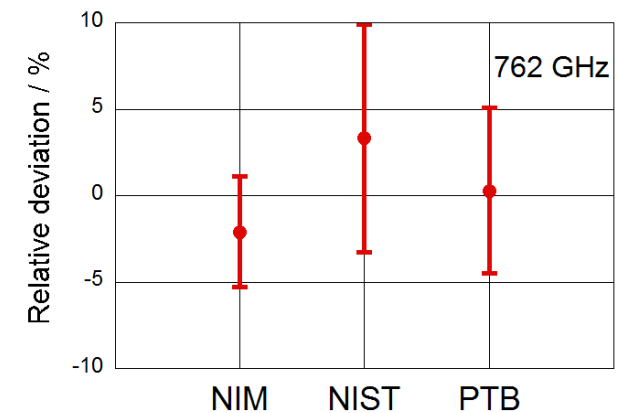
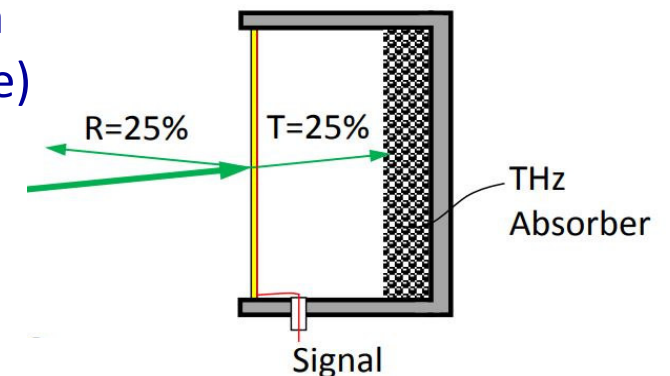


- 3) Berechnung der Empfindlichkeit $S(f)$ gemäß:
$$S(f) = \frac{S(476 \text{ THz})}{1 - R(476 \text{ THz})} (1 - R(f))$$

Messunsicherheit $u(S(f)) = 1,2 \%$

Optics Express **21** (2013) S. 14466-14473

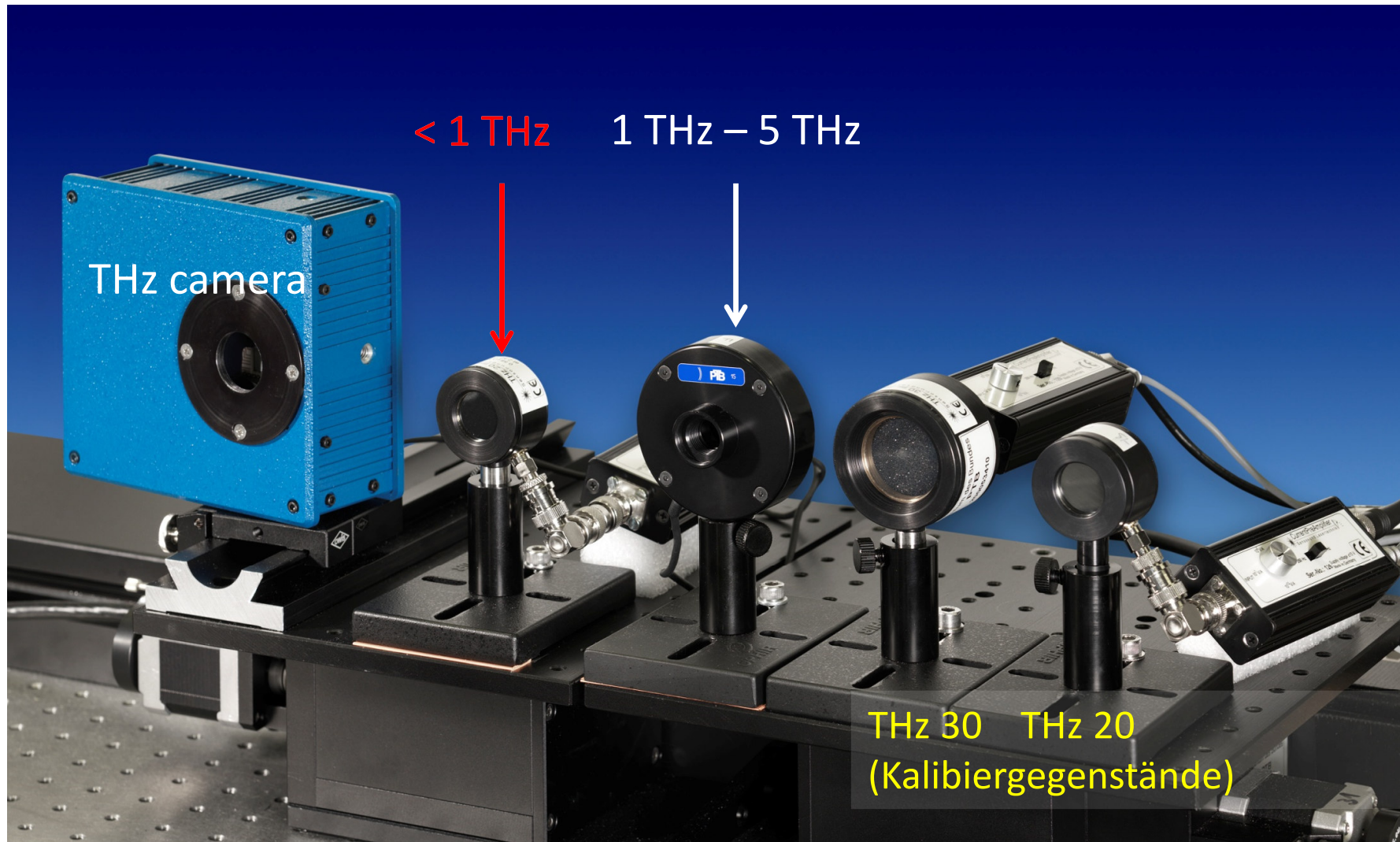
- **Pyroelektrischer Dünnsfilmdetektor (PTFD)** als Transfersensor für Frequenzen $f < 1$ THz
 - PTB-Entwicklung in Kooperation mit  **SLT** Sensor- und Lasertechnik
 - pyroelektrischer Polyvinylidendifluorid (PVDF)-Dünnsfilm (12µm) beidseitig beschichtet mit Metalloxid (nm-Stärke)
 - 25% Reflexion, 50% Absorption, 25% Transmission durch Flächenwiderstand $R_S = 0.5 \cdot \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$
 - geringe Zeitkonstante
 - **frequenzunabhängige** Absorption
 - Kalibrierung bei 1,4 THz gegen THz-Leistungsnormale
 - Empfindlichkeit 35,4 V/W, Standardunsicherheit 1 V/W
 - erfolgreiche Teilnahme AG 7.34 an internationaler Vergleichsmessung



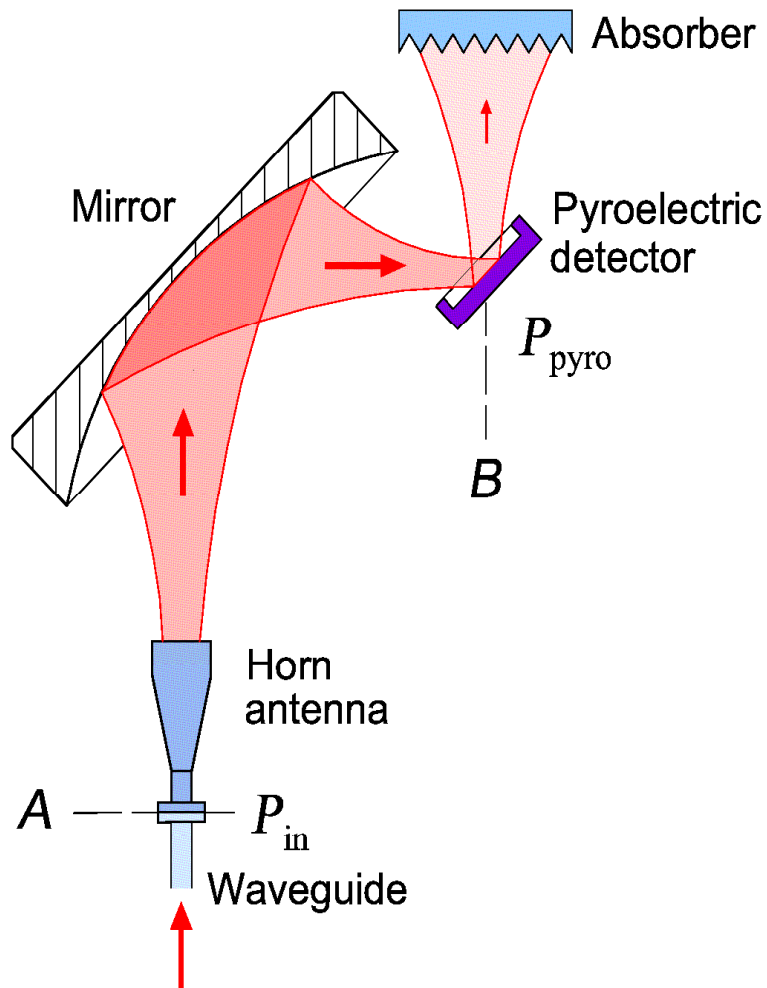
Wilhelm Woltersdorff, *Z. Physik* **91**, S. 230-252, 1934.

A. Steiger et al., *Technisches Messen*, **83**(6), S. 386–389, 2016.

- PTB-Leistungsdetektoren im Bereich 700 GHz bis 5 THz



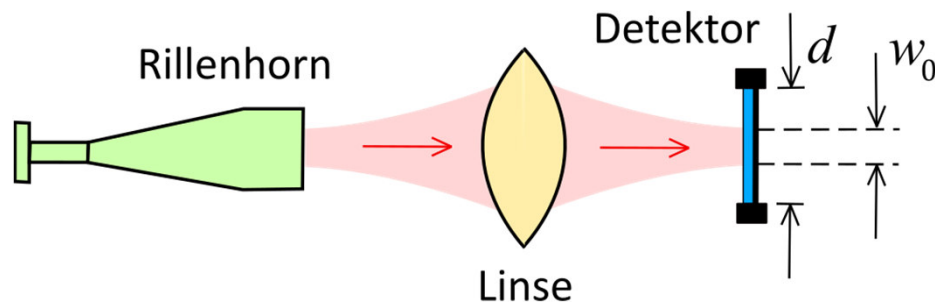
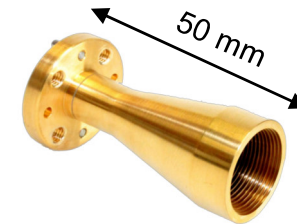
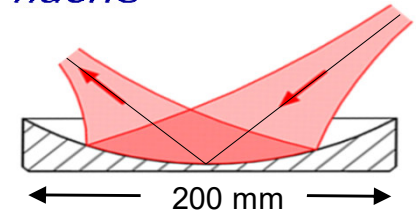
- **Quasi-optischer Messaufbau (75 GHz – 110 GHz)**



- Messung der Eingangsleistung P_{in} in Hohlleitersebene A
- Reflexion des Strahls durch elliptischen Spiegel unter 45°
- Pyroelektrischer Detektor, $\varnothing = 34 \text{ mm}$, unter 45° , 50 % Absorption, 25 % Reflexion
- keine Stehwellen

- Herausforderungen quasi-optischer Messplatz:

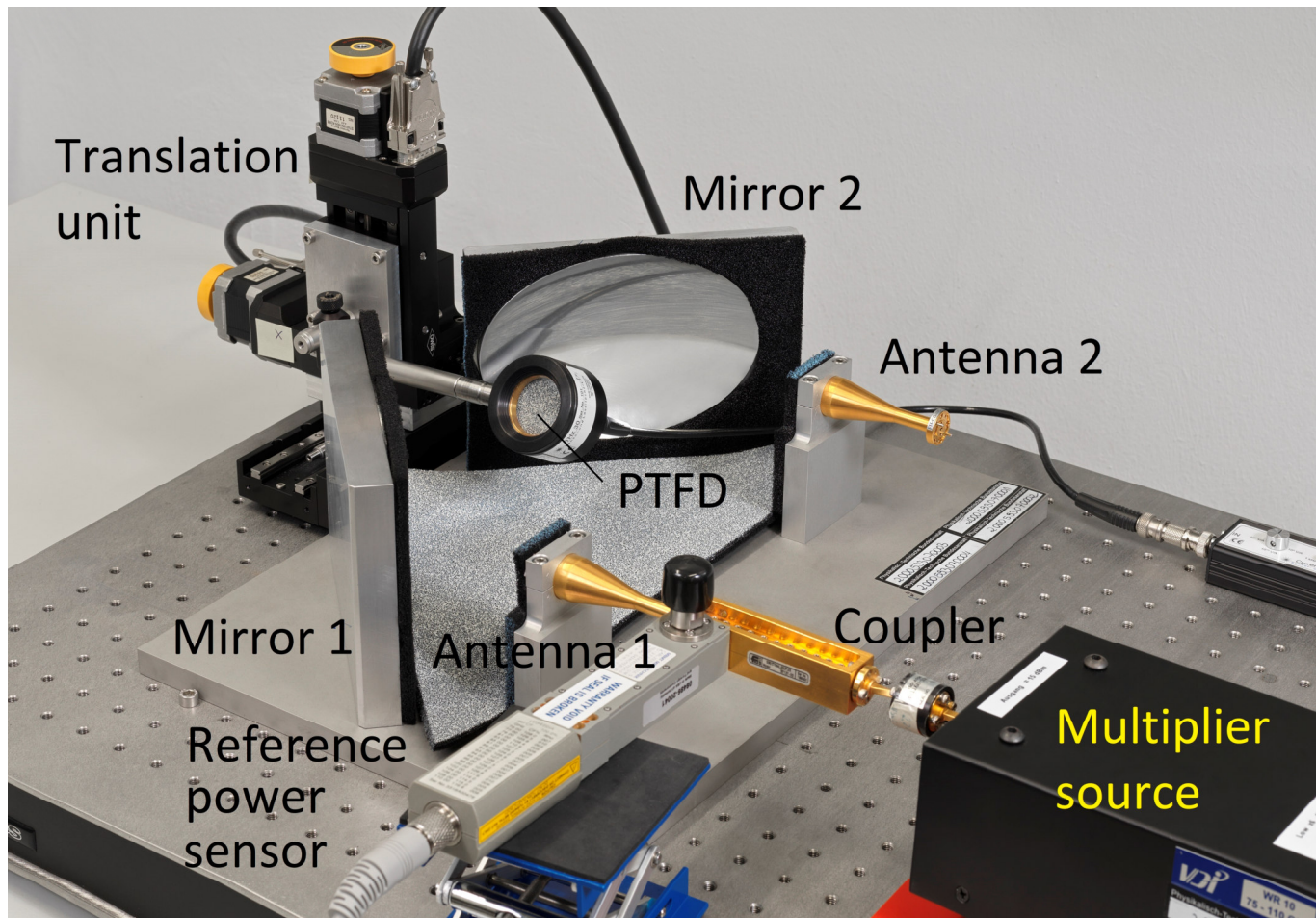
- @100 GHz: $\lambda = 3\text{ mm}$ → große Spiegel mit elliptischer Oberfläche zur Strahlungsfokussierung auf Spotgröße in mm-Bereich
- Justage des quasi-optischen Messplatzes
- große Divergenz bei quasi-optischer Wellenausbreitung
- Rillenhörner mit großer longitudinaler Dimension
- Aperturgröße des THz-Detektors



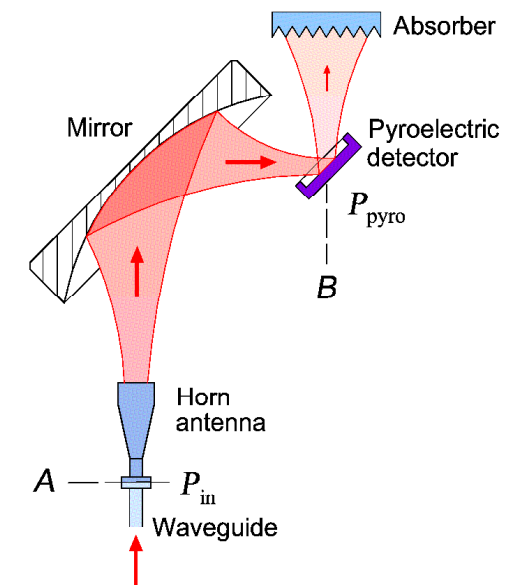
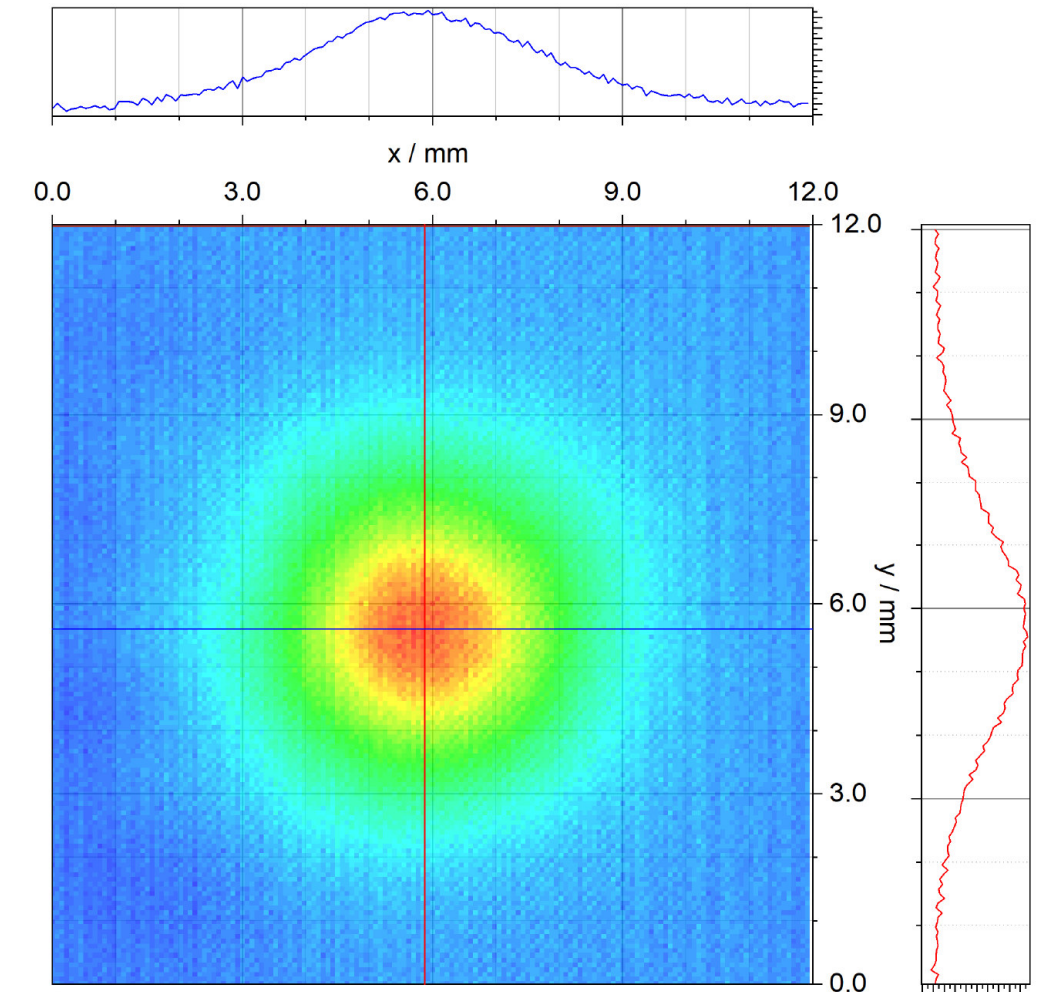
Bedingung für 99% Detektion:

$$d > 2.6 \cdot w_0$$

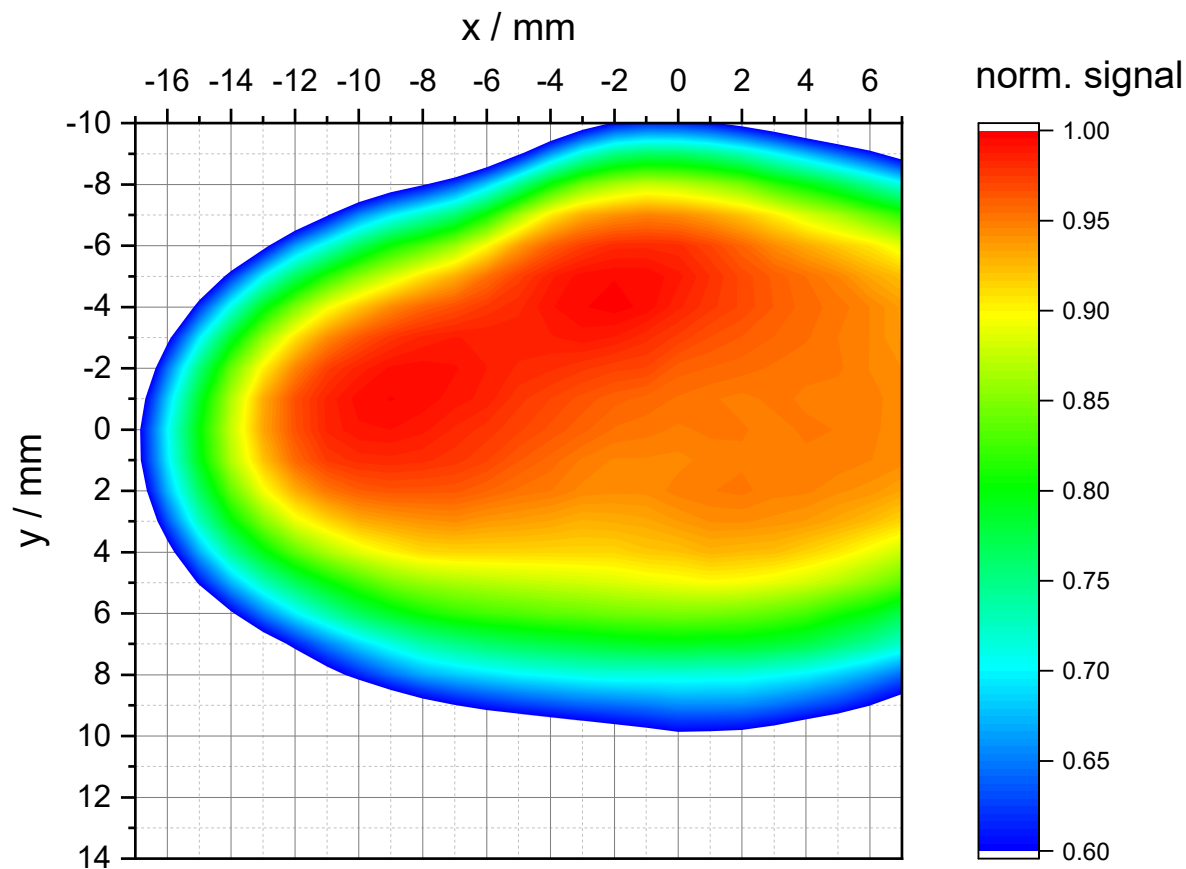
- Experimenteller Aufbau 75 GHz – 110 GHz



- **Gauß'sches Strahlprofil in Ebene *B*** (gemessen mit THz-Kamera)

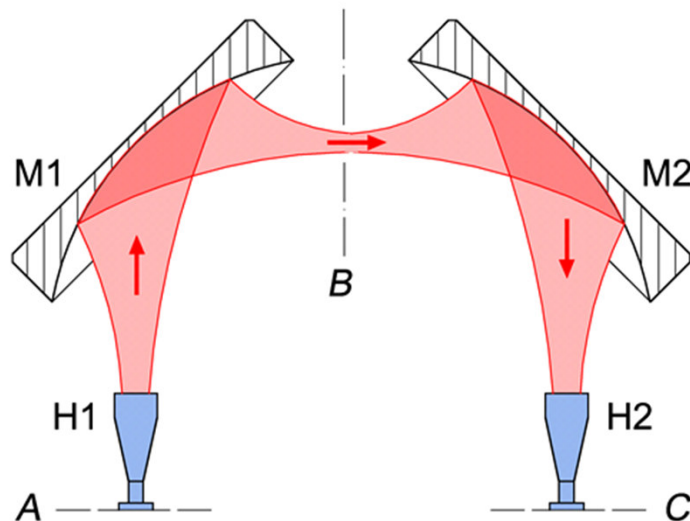


- Transversaler 2D-Scan in Ebene *B* mit PTFD-Detektor



➔ Apertur des PTFD-Detektors ist ausreichend

- Symmetrisch erweiterter quasi-optischer Aufbau zur Bestimmung der Verluste zwischen Ebenen A und B bzw. C und B



- TRL-Kalibrierung eines vektoriellen Netzwerk-analysators bzgl. der Hohlleiterebenen A und C
- Messung des „leeren“ Aufbaus zwischen Ebenen A und C

$$S_{AC} = \begin{pmatrix} S_{AC,11} & S_{AC,12} \\ S_{AC,21} & S_{AC,22} \end{pmatrix}$$

- Vernachlässigung der Fehlanpassung
- Symmetrieannahme

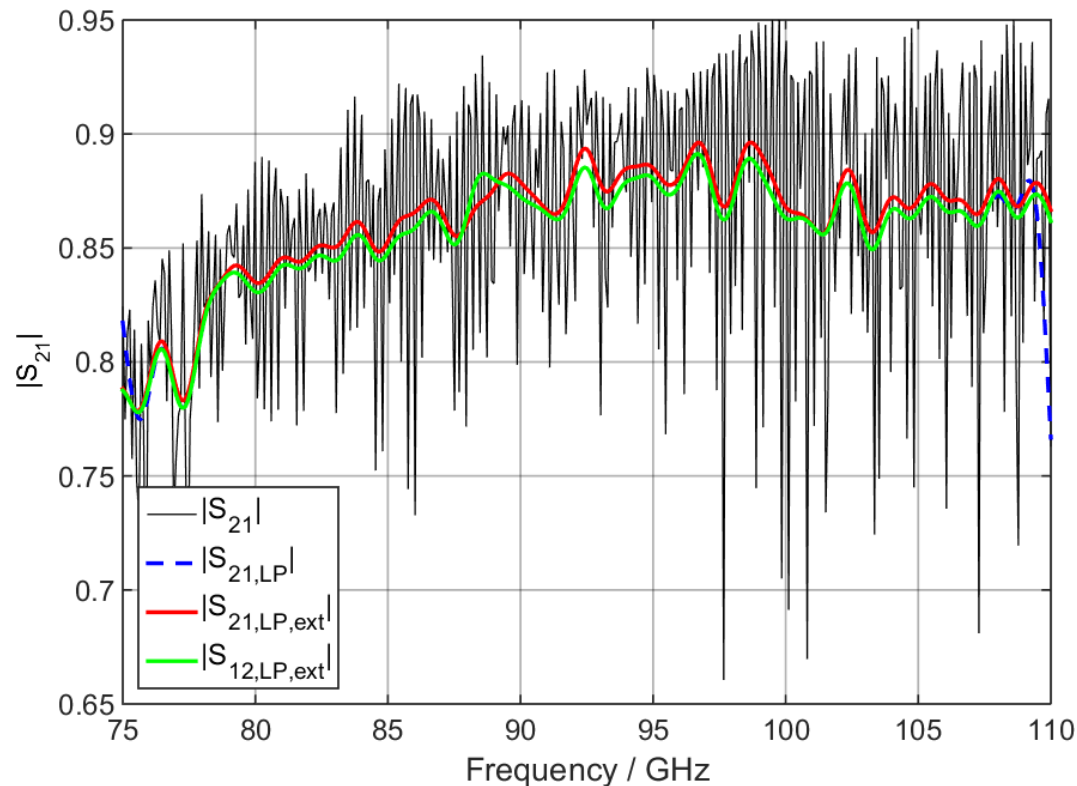
$$S_{AB,21} = \sqrt{S_{AC,21}}$$

$$S_{CB,21} = \sqrt{S_{AC,21}}$$

- Leistungsverlust durch Mittelung:

$$t = \frac{P_{\text{opt}}}{P_{\text{wgt}}} = \frac{|S_{21,AC}| + |S_{12,AC}|}{2}$$

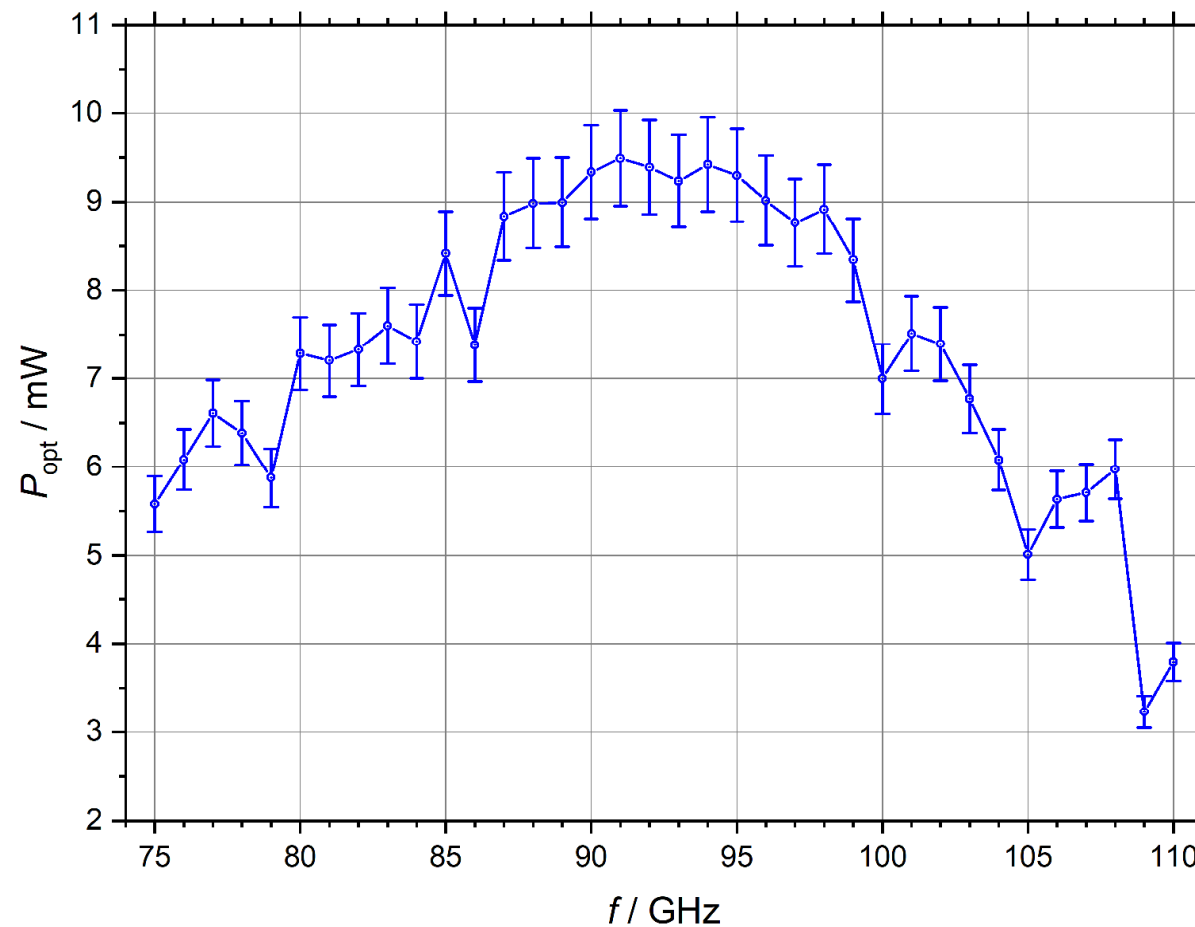
- **Transmissionsmessung mit VNA nach TRL-Kalibrierung**



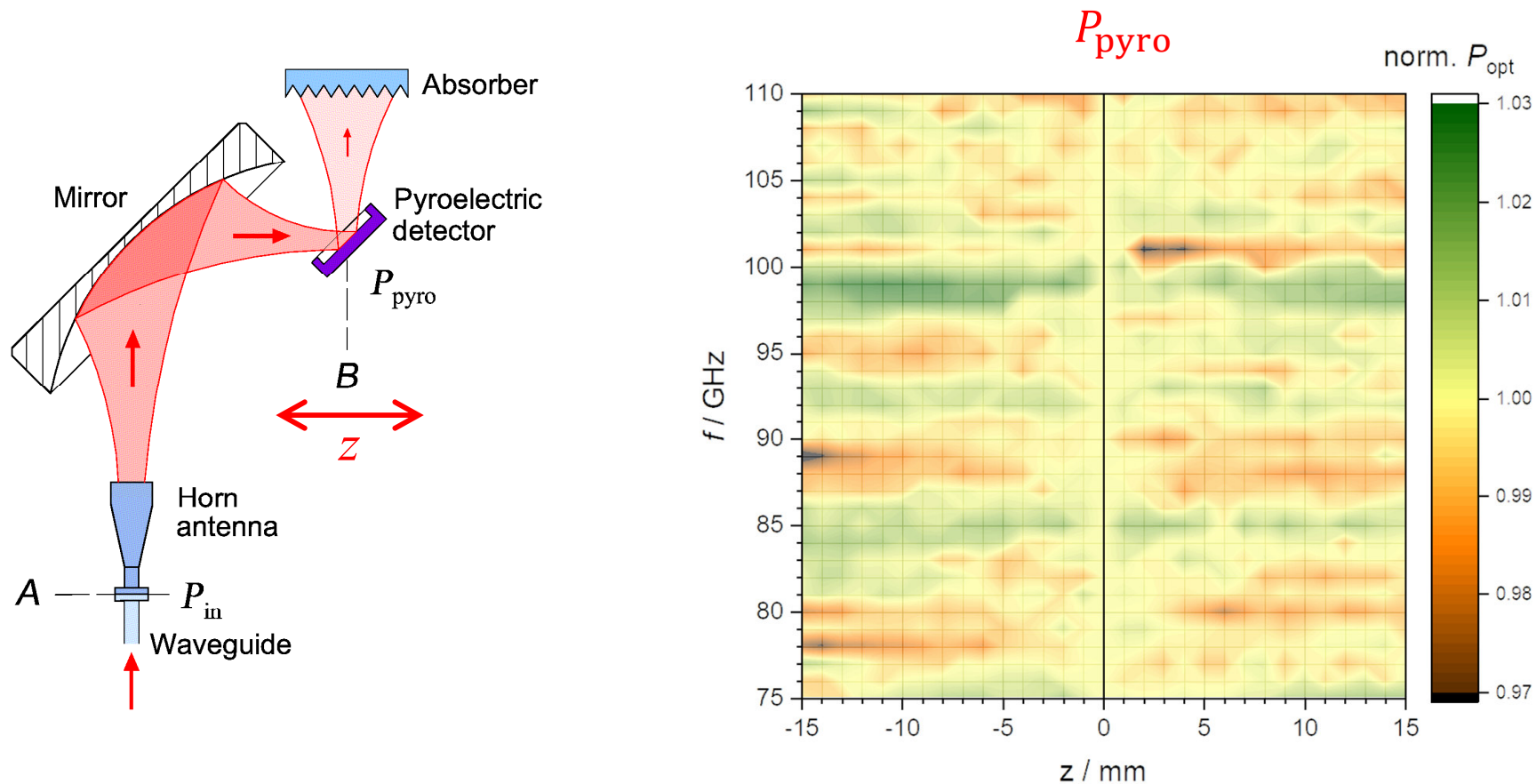
- TRL-Kalibrierung des VNA bzgl. der Ebenen A und C
- Starke Stehwelligkeit durch nicht ideale Antennen und Spiegel sowie Reflexionen an Hornaperturen aufgrund mangelnder Justage
- Tiefpassfilterung resultiert in geglättetem Verlauf
- Eliminierung von Filter-Artefakten an den Bandgrenzen durch lineare Prädiktion

$$t = \frac{P_{\text{opt}}}{P_{\text{wgt}}} = \frac{|S_{21,\text{LP},\text{ext}}| + |S_{12,\text{LP},\text{ext}}|}{2}$$

- PTFD-Messung der Ausgangsleistung in Ebene *B*

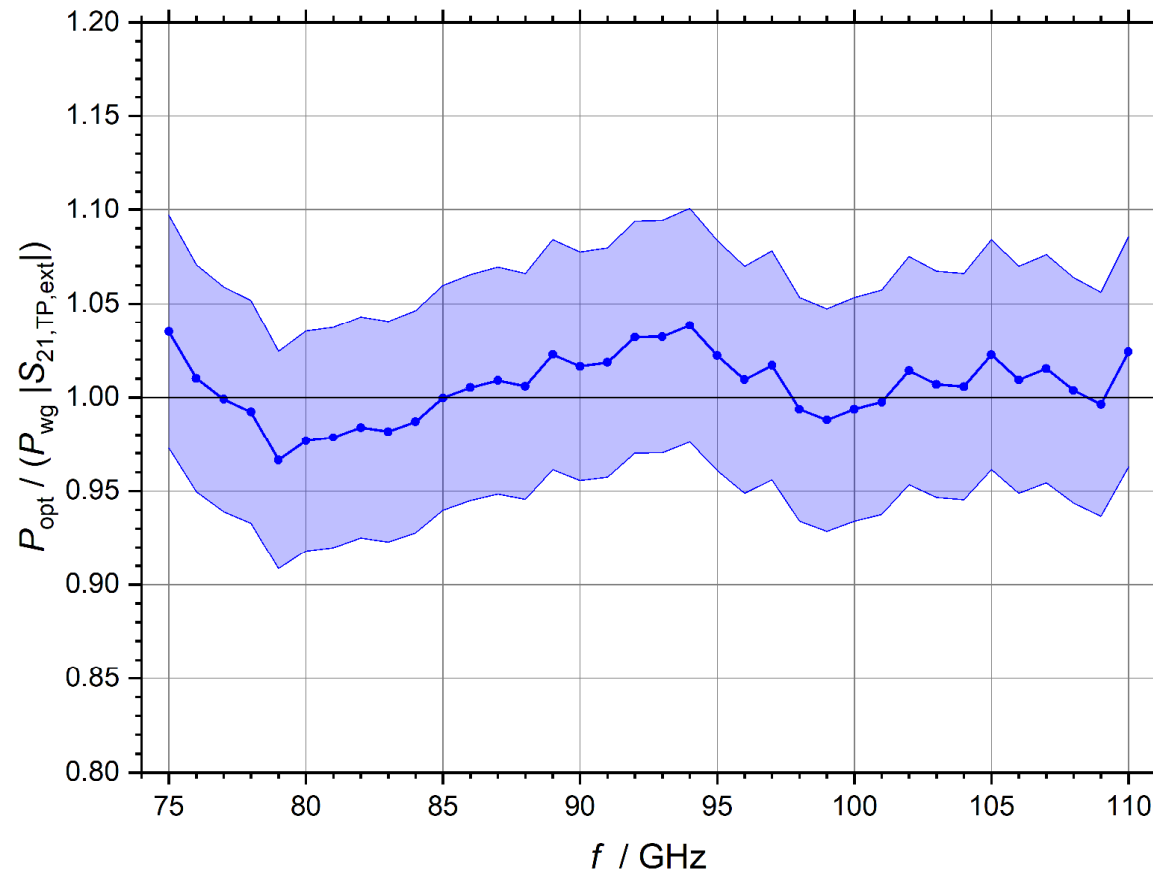


- PTFD-Messung in Abhängigkeit des longitudinalen Offsets z bzgl. Ebene B



➔ Keine Stehwellen erkennbar

- Leistungsvergleich zwischen Hohlleiter- und Freiraumleistung



➡ gute Übereinstimmung bzgl. der erweiterten Gesamtmessunsicherheit von $U = 6\%$

- Äquivalenz zwischen Leistungsmessung im Hohlleiter und Freiraumleistungsmessung im Frequenzbereich 75 GHz – 110 GHz nachgewiesen
- Rückföhrungslücke des Submillimeterwellenbereichs bzgl. HF-Leistung geschlossen
- Möglichkeit, HF-Leistung in Wellenleitern im Submillimeterwellenbereich mittels Freiraummessung rückzuführen

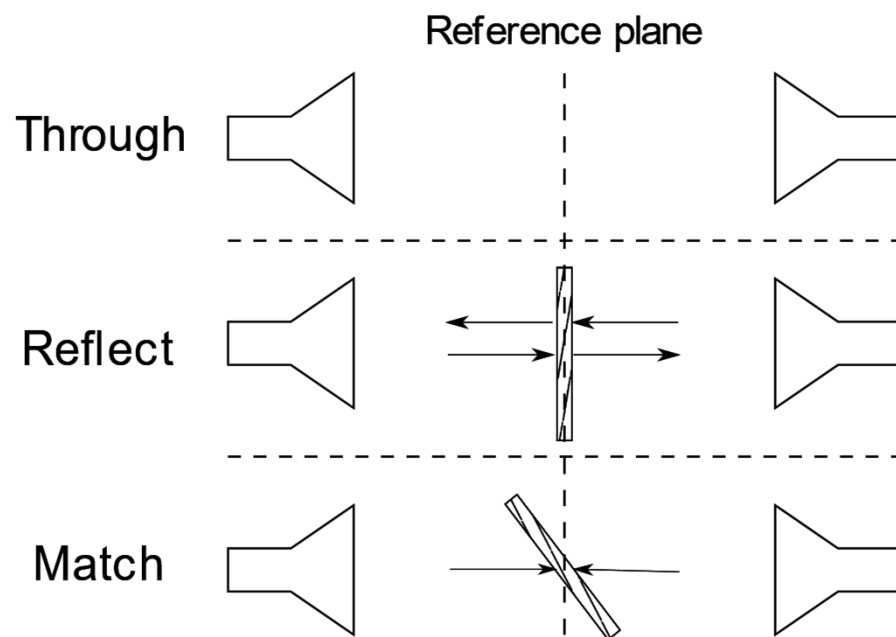
Auszeichnung

R. Judaschke, M. Kehrt, K. Kuhlmann, A. Steiger:

“Linking the power scales of free-space and waveguide-based electromagnetic waves”,
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 11, pp. 9056-9061, 2020.

Andy Chi Best Paper Award 2021, IEEE Instrumentation and Measurement Society

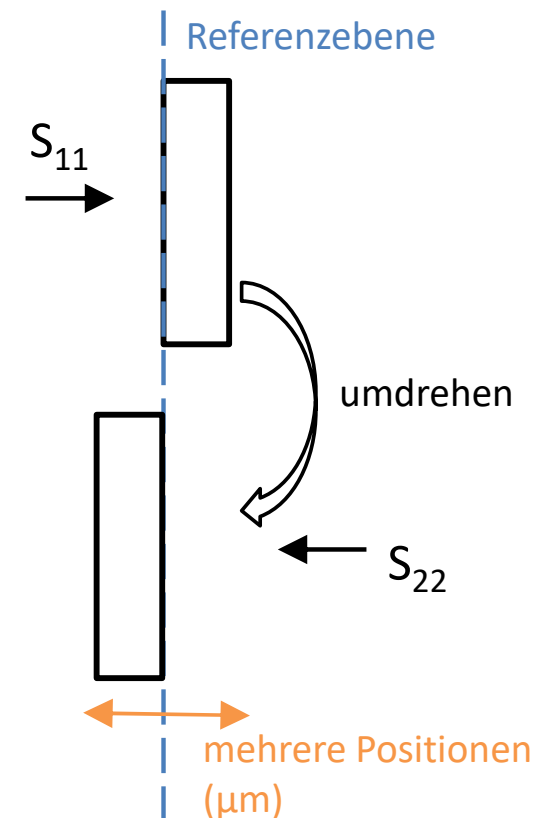
- Erweiterung des Vergleichs bei höheren Frequenzen (110 GHz – 170 GHz), im Rahmen des EMRP-Projekts TEMMT
- VNA-Transmissionsmessung nach **TRM-Kalibrierung** in PTFD-Ebene



kritische Reflect-Parameter

- identischer Reflekt
- Winkel
- Position (Mehrfachmessung)

<https://projects.lne.eu/jrp-temmt/>





**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Dr.-Ing. Rolf Judaschke
Fachbereich 2.1 Gleichstrom und Niederfrequenz

Phone: 0531 592-2100

E-Mail: rolf.judaschke@ptb.de

www.ptb.de