



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin
Nationales Metrologieinstitut

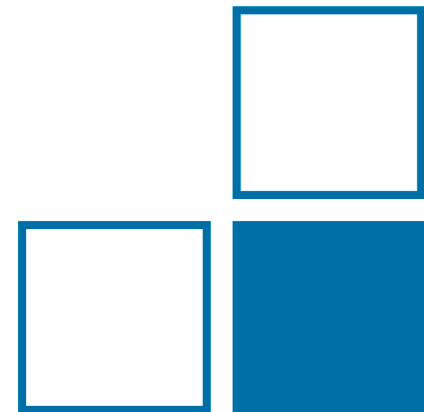
Optimierter Schaltungsentwurf für planare Thermokonverter bis 100 MHz

Rolf Judaschke, Susanne Weimann

303. PTB-Seminar

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und
Hochfrequenzbereich

15. Mai 2019

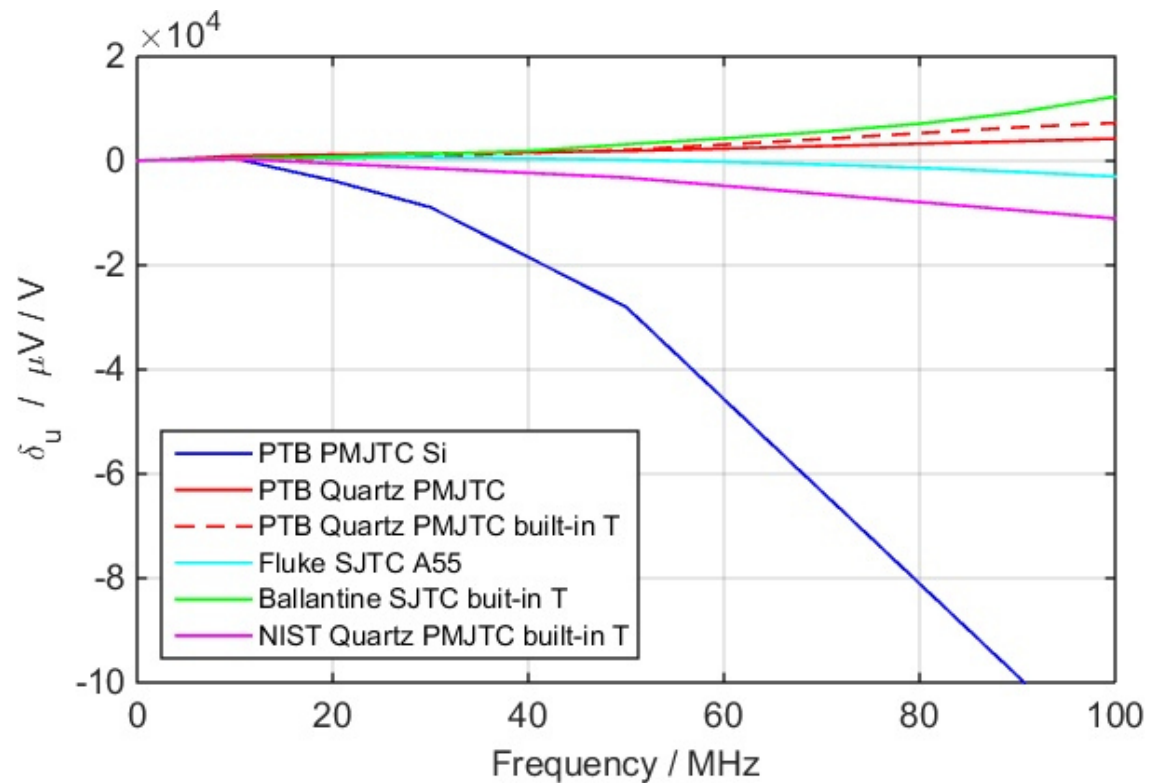


- Einleitung
- PTB-Thermokonverter
- Elektromagnetische Simulation
- Einbautechniken
- Messergebnisse
- Zusammenfassung
- Ausblick

- Planare Vielfach-Thermokonverter (PMJTC) als AC/DC-Transferstandard in der Metrologie etabliert (s. nationaler Ringvergleich)
- Verbesserung der On-chip-Eigenschaften durch Einsatz verlustarmer Substratmaterialien (Quarzglas, Polyimid)
- integrierte T-Verzweigung
- **Entwurfskriterien:** kleine Transferdifferenz, besonders bei höheren Frequenzen (bis 100 MHz), flacher Frequenzgang

- **Ziel:** „berechenbarer Standard“ durch Modellierung der **frequenzabhängigen** Eigenschaften:
 - Wert und Änderung der Heizer-Impedanz
 - Skin- und Proximity-Effekt
 - kapazitive Kopplung
 - Änderung der Temperaturverteilung
 - Einfluss der Zuführungsleitungen
 - Minimierung von Leitungs- und dielektrischen Verlusten

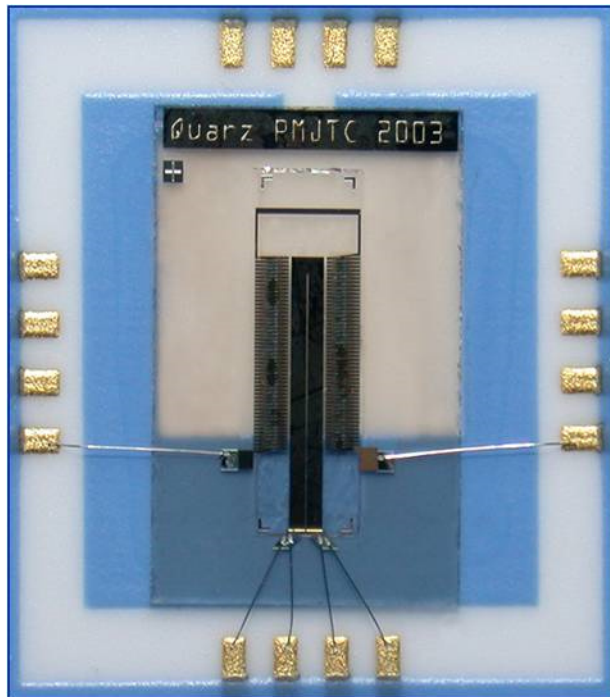
Ausgangslage: Gemessene Spannungstransferdifferenz
(bezogen auf R&S NRS Sensor), Heizerwiderstand $R_H \approx 100 \, \Omega$



➡ PMJTC auf **Quarz-Substrat** vielversprechend bis 100 MHz

Verfügbare PMJTC:

1) Quarz PMJTC, L. Scarioni, PTB 2003

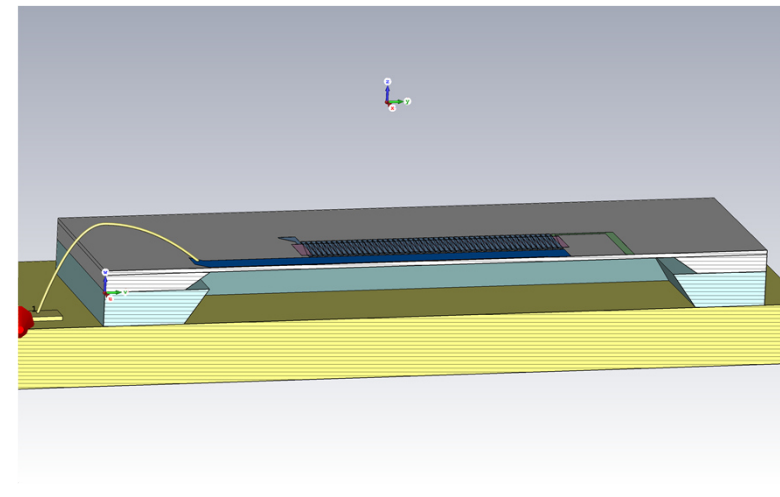
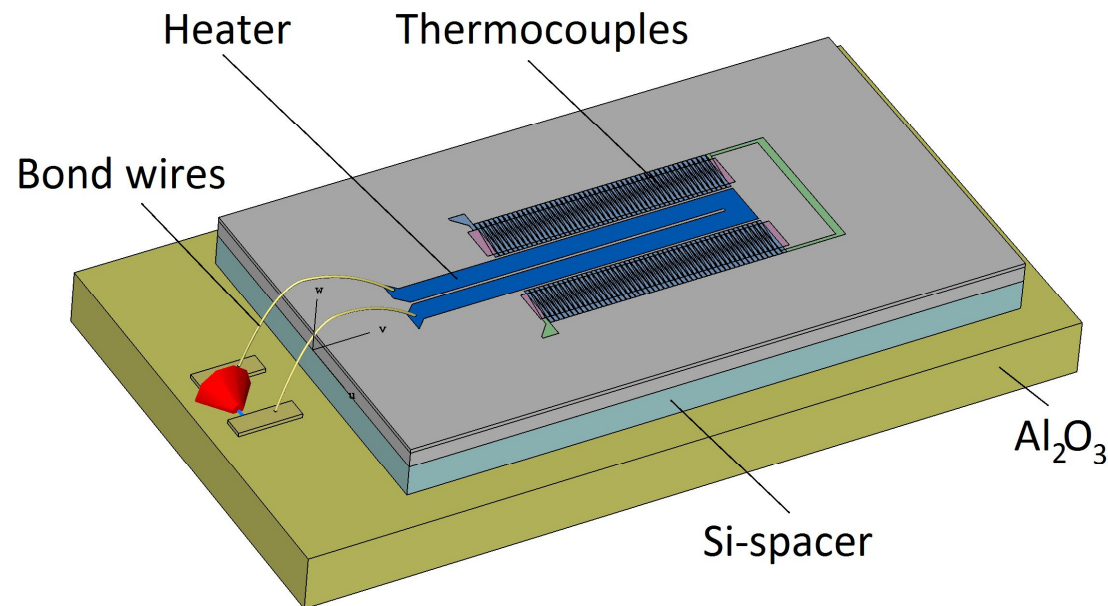


- Bifilarer Heizer $R_H = 100 \, \Omega - 1000 \, \Omega$
- Substrathöhe $250 \, \mu\text{m}$
- Membrandicke $30 \, \mu\text{m} - 100 \, \mu\text{m}$
- Fenstergröße $1.3 \times 5.2 \, \text{mm}$
- Thermoelemente 100 Bi-Sb
- Al_2O_3 Trägerplatte
- Keramikgehäuse (entfernt)
- Bonddrähte

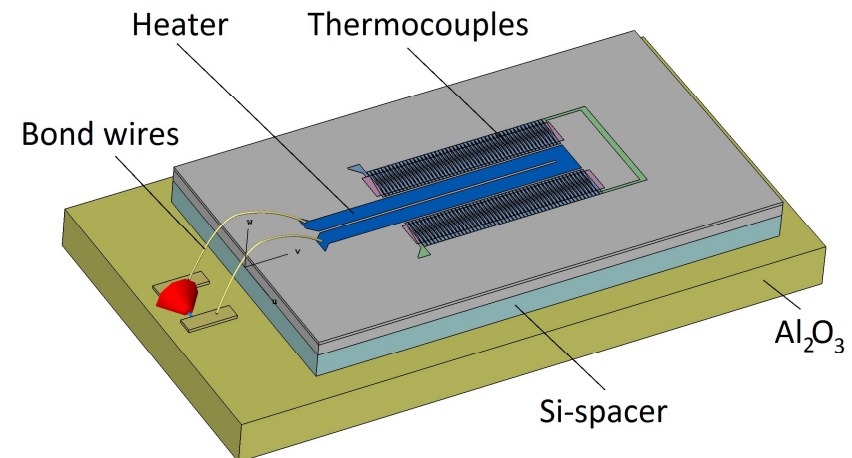
2) Silizium PMJTC mit Oblelisk, M. Klonz et al., PTB, seit 2001.

Elektromagnetische Simulation

- CST Microwave Studio: multi-physikalische Simulation
- PMJTC-Chip ohne Gehäuse und externer Schaltung

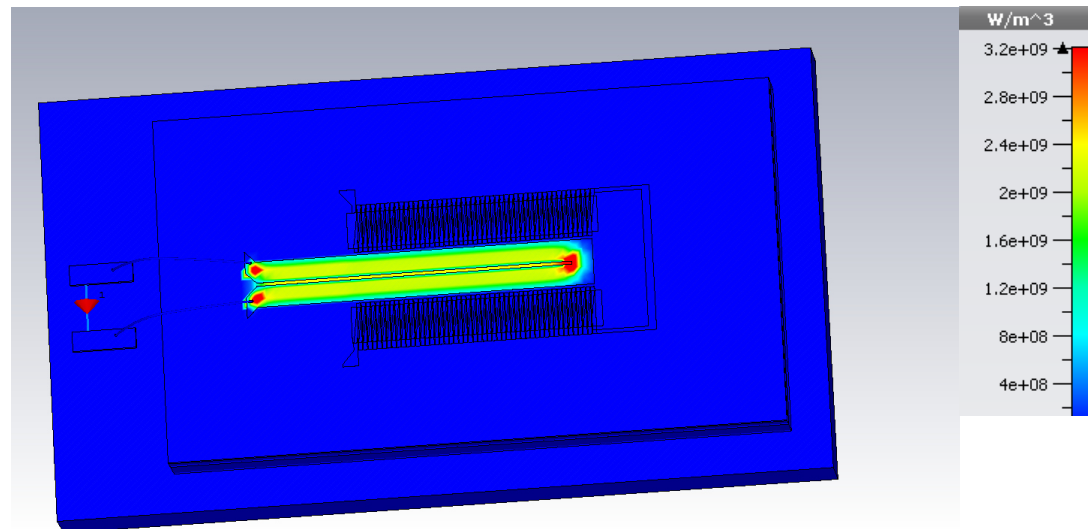


- Vollständige Diskretisierung $\approx 500\,000$ Zellen
- Frequenzbereich 1 kHz – 1 GHz
- Ausnutzung der Symmetrie
- Anregende Spannung 1V
- Time-domain Solver
- Simulationsdauer: 6 Std. auf hardware-beschleunigtem PC
- Berechnung von
 - 3D E-/H-Feldverteilung
 - 3D Leistungsverluste
 - Wärmefluss
 - Temperaturverteilung
 - Fußpunktimpedanz



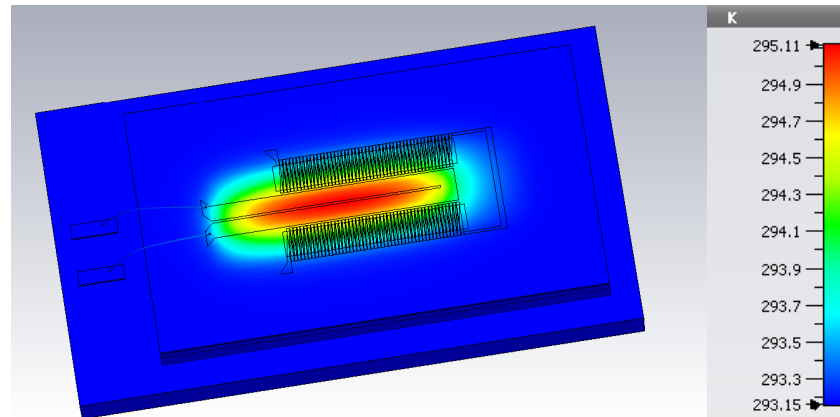
Elektromagnetische Simulation (3)

- Leistungsverlustdichte: Quarz PMJTC $R_H = 100 \, \Omega$ @ 10 MHz

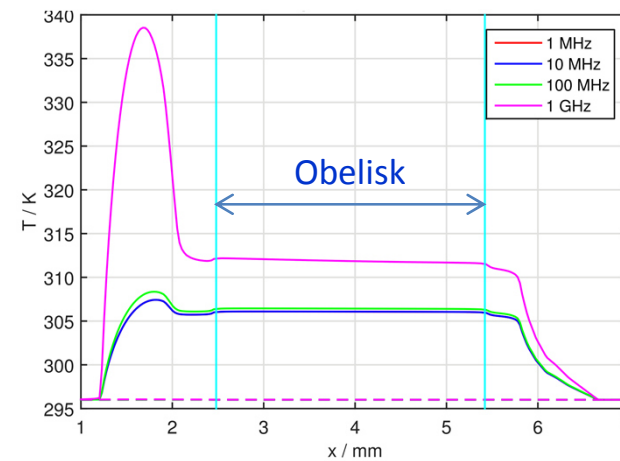
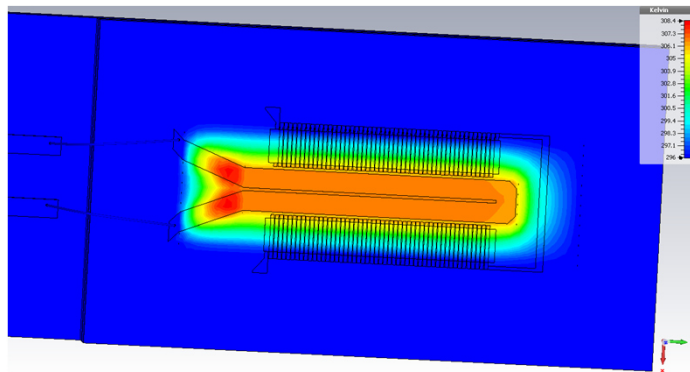


Elektromagnetische Simulation (4)

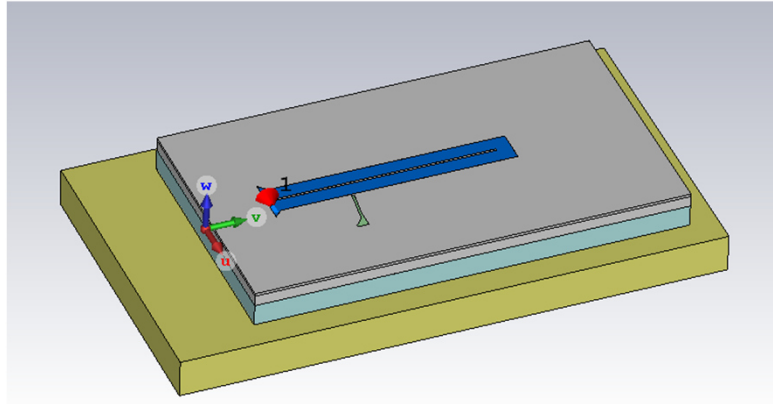
- Temperaturverteilung Quarz PMJTC, $R_H = 100 \, \Omega$ @ 10 MHz



- Temperaturverteilung Si PMJT mit Obelisk, $R_H = 100 \, \Omega$ @ 10 MHz



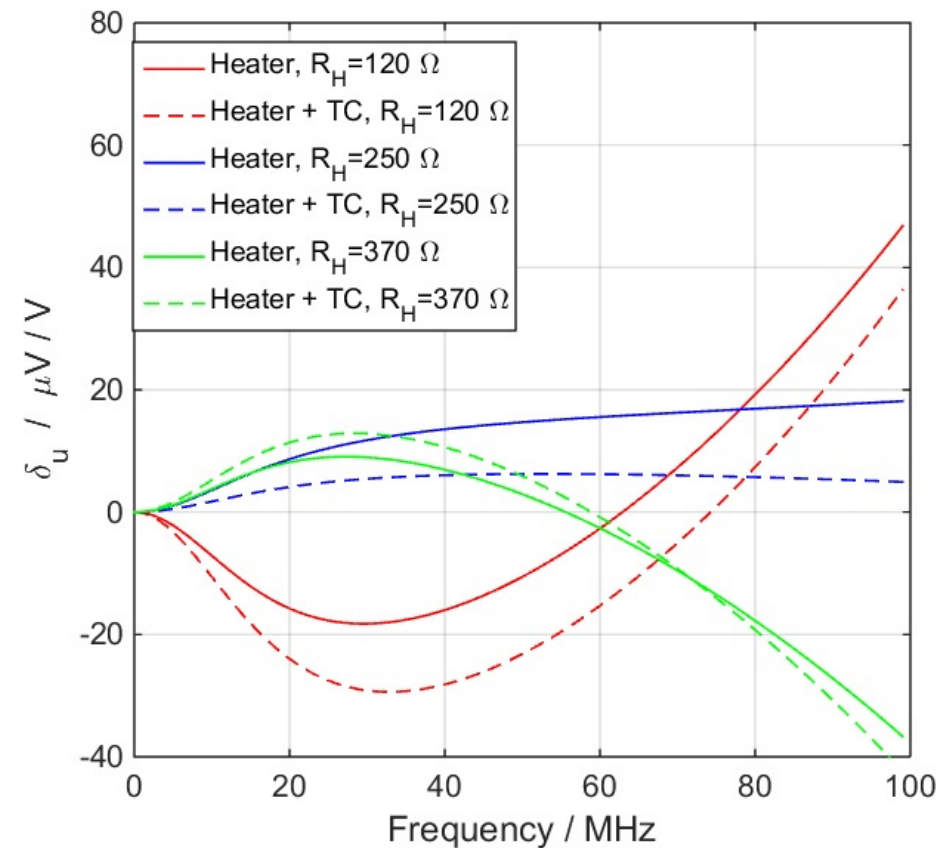
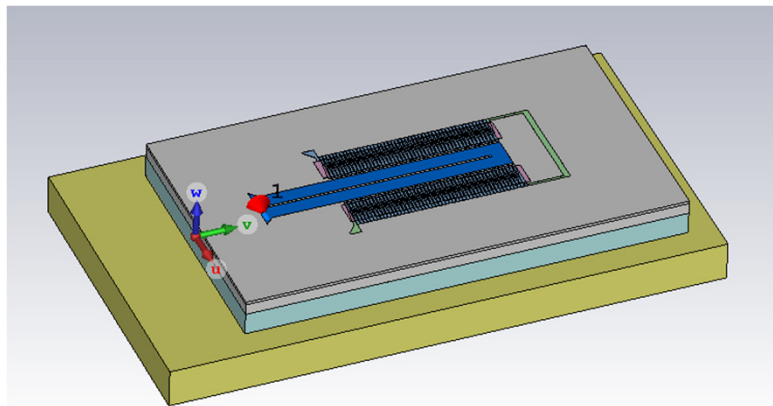
■ Quarz PMJTC: bifilarer Heizerwiderstand



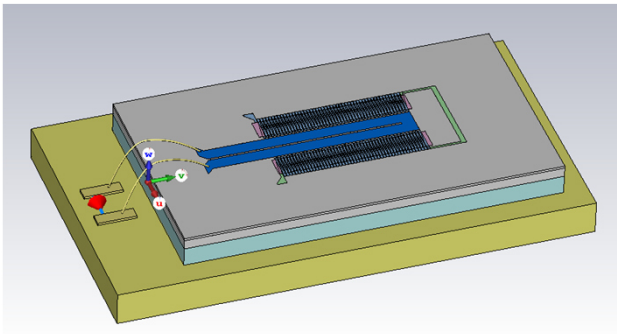
Spannungs-Transferdifferenz

$$\delta_u = \frac{|\underline{Z}|}{\sqrt{R_H \operatorname{Re}\{\underline{Z}\}}} - 1$$

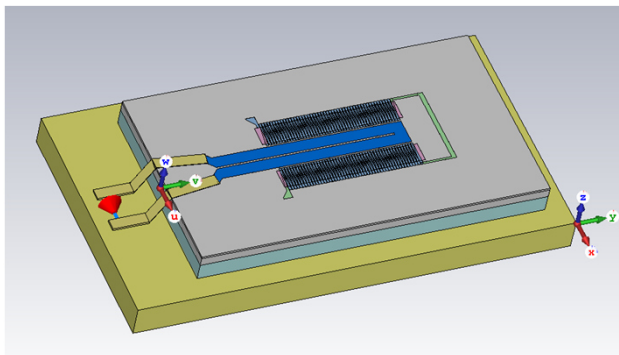
■ Bifilarer Heizer + Thermoelemente



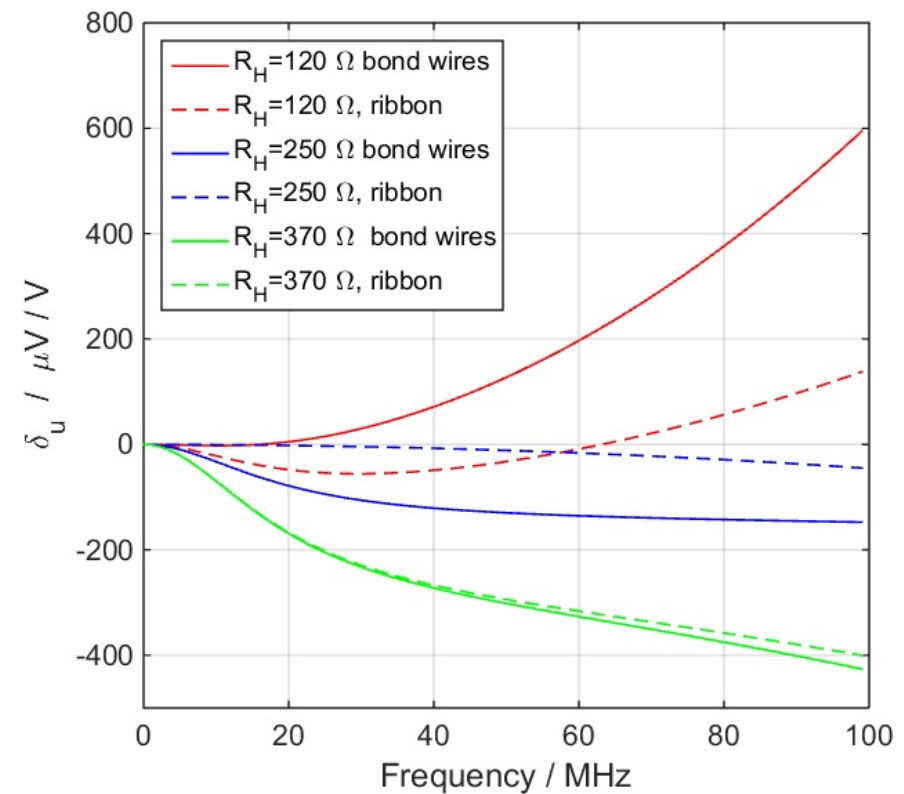
- Einfluss von Heizer + Thermoelemente + Bonddrähte



- Bifilarer Heizer + Thermoelemente + Gold-Bändchen

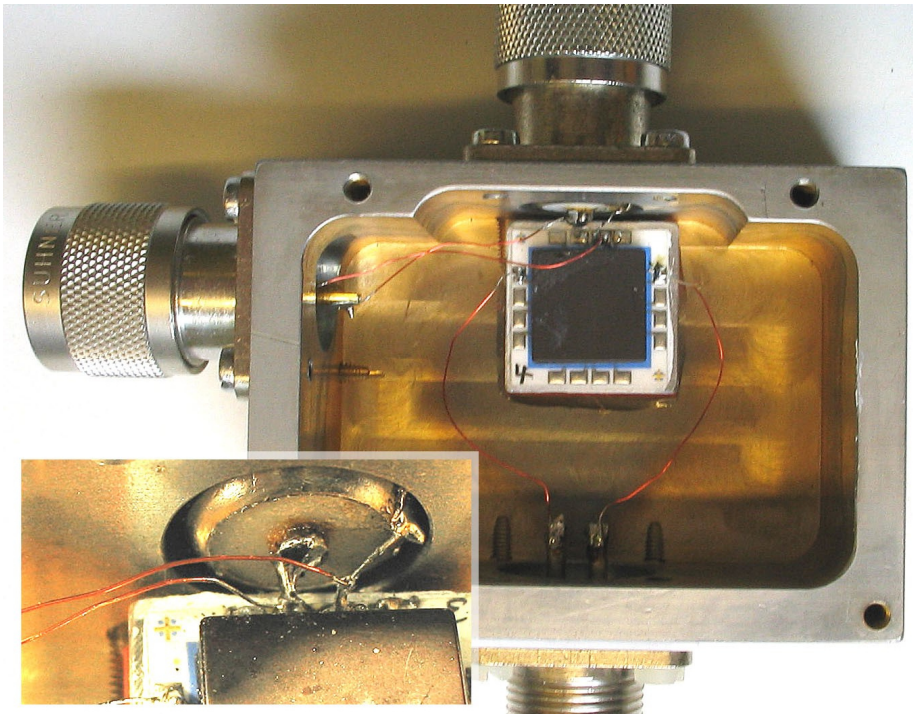


Transferdifferenz δ_u (berechnet)



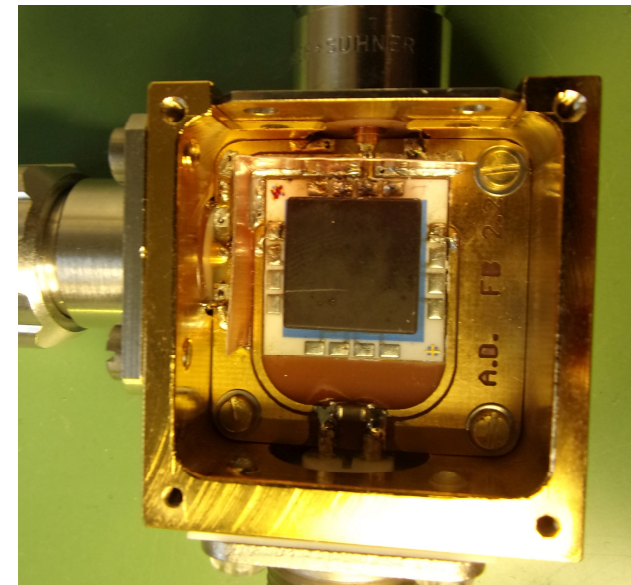
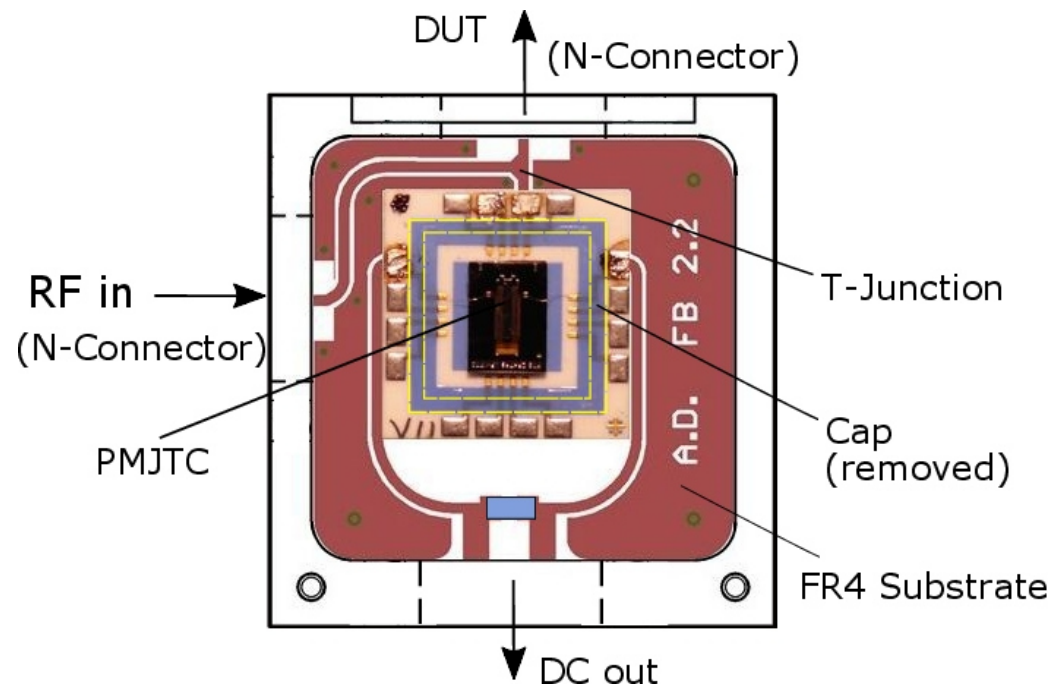
➔ Simulation: Anstieg von δ_u um Faktor 10 durch Verbindungstechnik!

- konventionelles Gehäuse



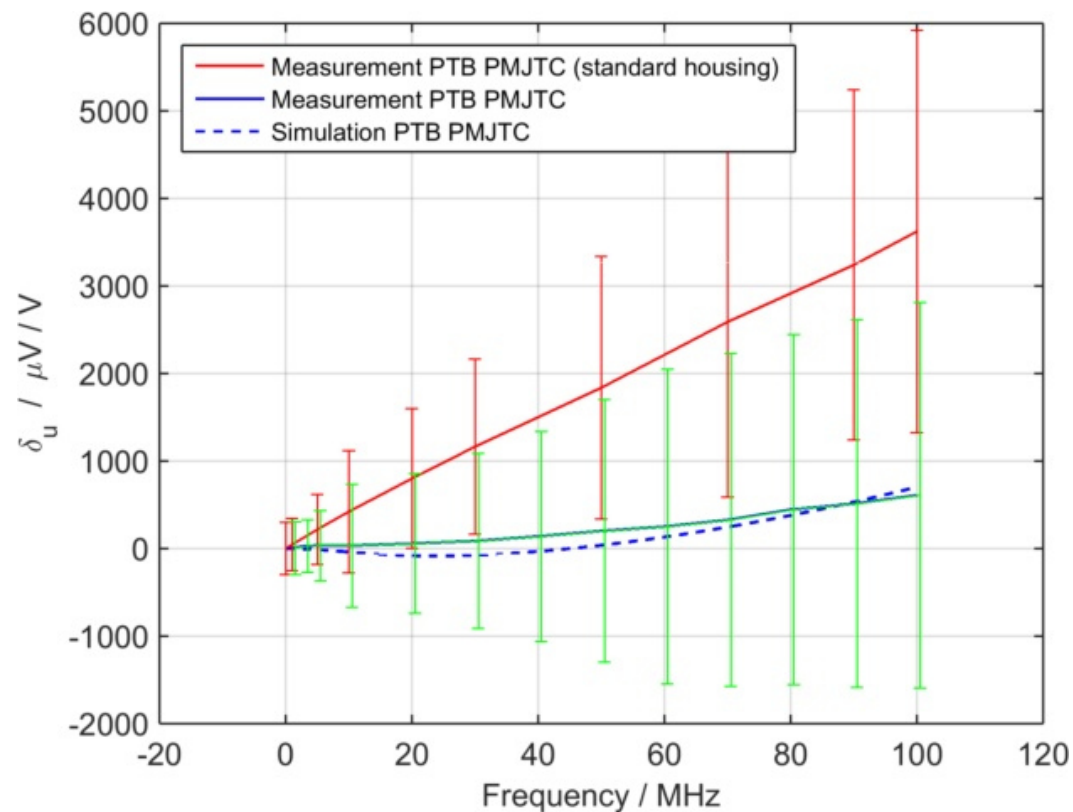
- undefinierter Übergang zwischen koaxialem Konnektor und Chip
- parasitäre Verkopplungen (?)
- Gehäusegröße
- schlechte Wiederholbarkeit bei hohen Frequenzen

- “Built-in-T” auf planarem Substrat
- koplanare Zuführungsleitungen $Z_0 = 50 \Omega$
- verkürzte Leitungslängen
- verkleinerte Gehäuseabmessungen (ca. 1 x 1 Zoll)



Messergebnisse

Transferdifferenz (gemessen bezogen auf R&S NRS Leistungssensor),
 $R_H = 120 \, \Omega$, 1 V, Kontaktierung mit Bonddrähten



- ähnlich gute Übereinstimmung bei höheren Heizerwiderständen R_H

- Optimierungspotenzial von PMJ-Thermokonvertern untersucht durch multi-physikalische Simulationen
- AC/DC-Spannungstransferdifferenz mit steigender Frequenz zunehmend von externer Schaltung abhängig
- PMJ Thermokonverter auf Quarz-Substrat geeignet bis zu einigen 100 MHz
- **Planare** Ausführung von PMJTC chip, Verbindungstechnik und Zuführungsleitungen ergibt **reproduzierbare** und **kleine** AC/DC-Transferdifferenzen bis 100 MHz

- Verbesserter Entwurf eines PMJ-Thermokonverters (Optimierung der Heizer- und Membranstruktur)
- Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für **Photonische Technologien** Jena (IPHT) reaktivieren
- Realisierung und Charakterisierung des verbesserten Entwurfs



**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