

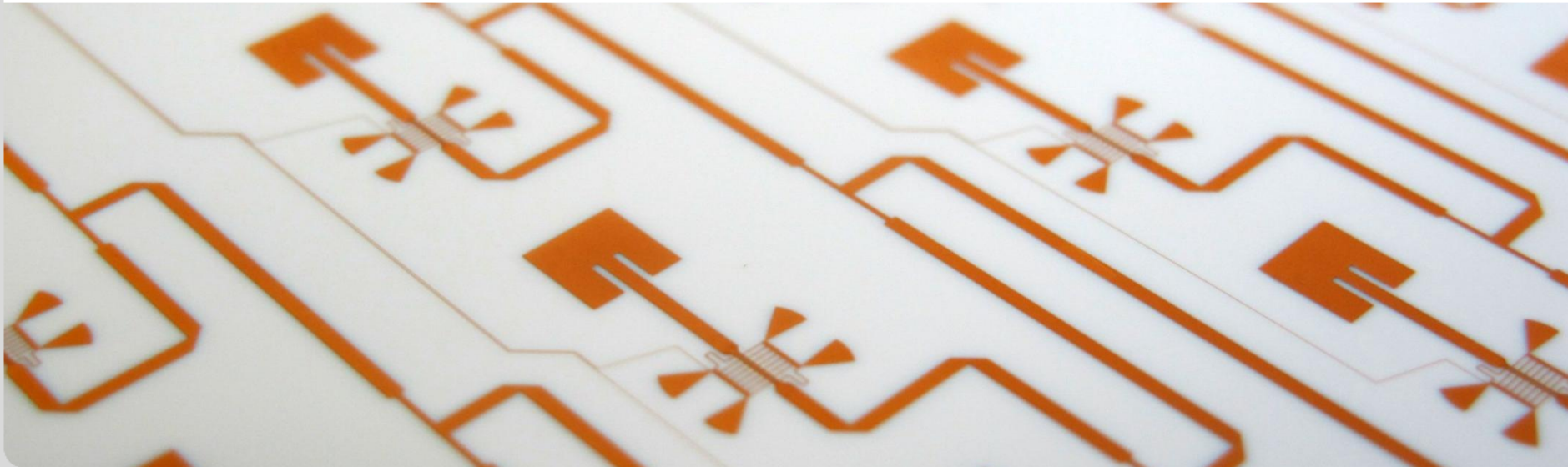
Entwicklung tintenstrahlgedruckter Dickschichtkondensatoren für steuerbare Mikrowellenkomponenten

A. Friederich^{1,2}, C. Kohler^{1,2}, M. Nikfalazar², M. Sazegar², R. Jakoby², J.R. Binder¹ und W. Bauer¹

¹ Institut für Angewandte Materialien (IAM), Karlsruher Institut für Technologie

² Institut für Mikrowellentechnik und Photonik (IMP), Technische Universität Darmstadt

Institut für Angewandte Materialien (IAM)



Gliederung

- Barium-Strontium-Titanat (BST)

- Gedruckte Mikrowellenkomponenten
 - Konzept
 - Dielektrische BST-Dickschichten für Kosinterprozesse
 - Gedruckte Silberelektroden

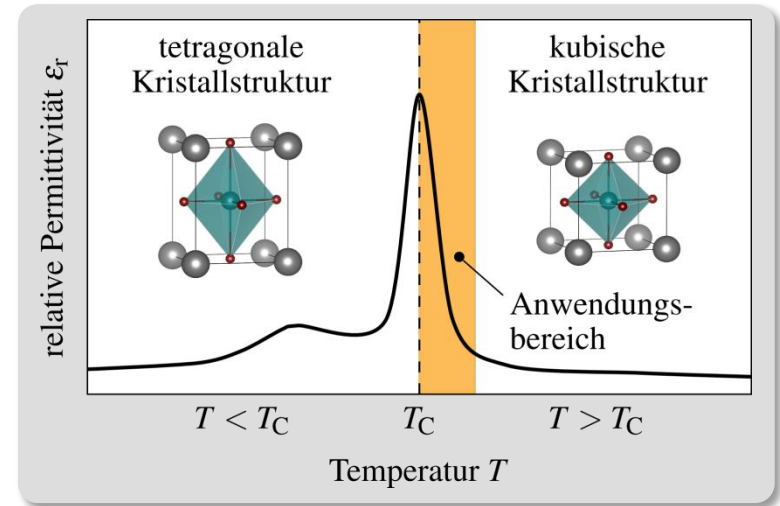
- Vollständig gedruckte *Metal-Insulator-Metal* (MIM)-Varaktoren

- Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber

- Zusammenfassung

Barium-Strontium-Titanat

- $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST)
 - Mischoxid in Perovskitstruktur
 - Ferroelektrisch für $T < T_{\text{Curie}}$
 - $T_{\text{Curie}}(x)$

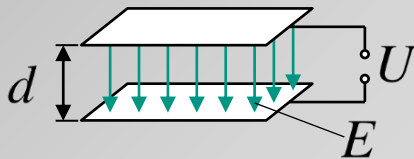


Charakteristische Größen

Relative Permittivität

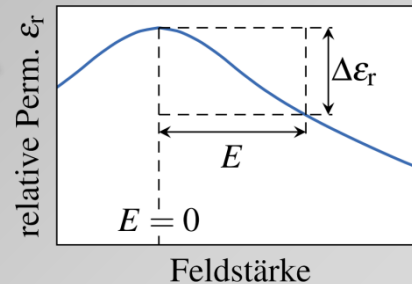
$$\epsilon_r(f, T, E, \dots)$$

$$E = U/d$$



Steuerbarkeit

$$\tau_\epsilon(E) = \frac{\epsilon_r(0) - \epsilon_r(E)}{\epsilon_r(0)}$$



Dielektrischer Verlust

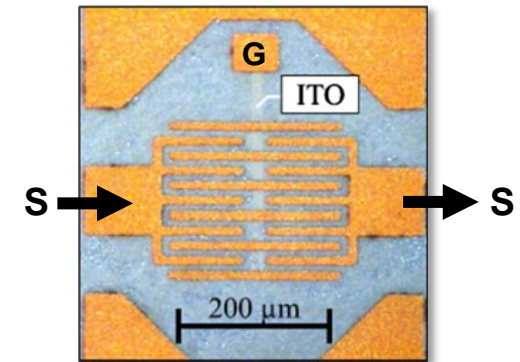
$$\tan \delta(f, T, E, \dots)$$

$$Q = 1 / \tan \delta$$

(Güte)

Barium-Strontium-Titanat

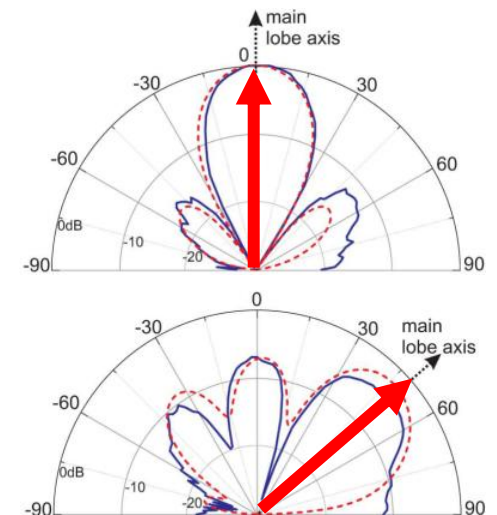
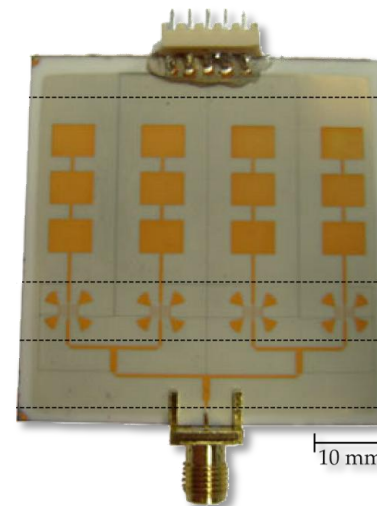
- Was kann man damit machen?
 - Steuerbare Kapazitäten (Varaktoren)
 - Anpassbare Phasenverschiebung eines Signals
 - Anpassbare Resonanzfrequenz einer Antenne
 - Anpassbare Filter etc.



Koplanarer Varaktor auf BST-Dickschicht, Maune et al., *Microsyst. Technol.* 17 (2011)

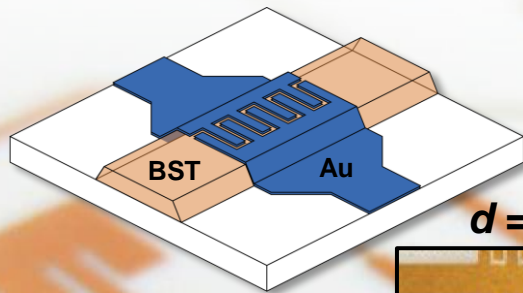
- Realisierte Komponenten
 - Steuerbare Gruppenantennen (*Phased-Array-Antennen*)
 - Phasenschieber
 - Steuerbare Hochfrequenzfilter

Auf siebgedruckten
BST-Dickschichten



Elektronisch schwenkbare *Phased-Array-Antenne* auf BST-Dickschicht, Sazegar et al., *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 59 (2011)

Bauteilentwurf am Beispiel einer elektronisch schwenkbaren *Phased-Array*-Antenne



$d = 5-10 \mu\text{m}$

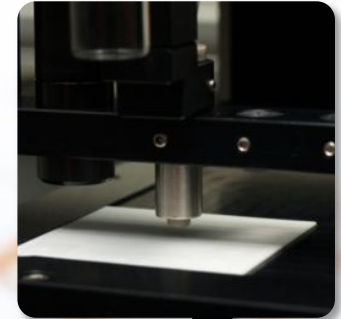
Koplanare
Metallisierung

Lithographisch strukturierter
Phasenschieber auf
tintenstrahlgedrucktem
Dielektrikum



Tintenstrahl Druck

Problem:
Strukturbreite $d > 30 \mu\text{m}$



Ansatz: Vertikales Layout, d. h.
Metal-Insulator-Metal (MIM)-Aufbau

BST-Dickschicht

(gedruckte)
Ag-Elektrode

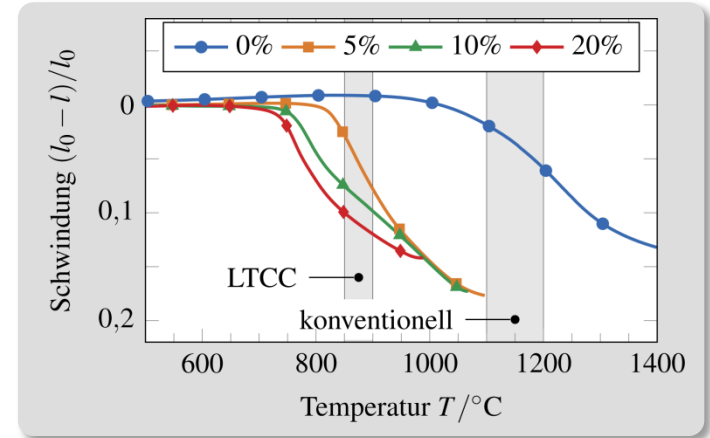
d

(gedruckte)
Ag-Elektrode

Elektrodenabstand: $d < 10 \mu\text{m}$

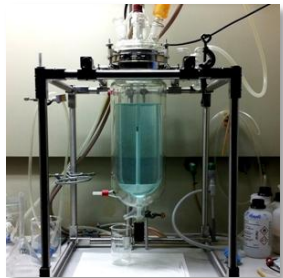
Entwicklung einer Komposittinte

- Materialzusammensetzung basiert auf Untersuchungen an siebgedruckten BST-Dickschichten für LTCC
- Zugabe der Sinterhilfsmittel erfolgt im Mahlprozess für eine homogene Verteilung

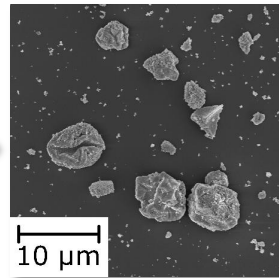


Schwindung von BST mit ZnO-B₂O₃-Additiv, Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 10 (2013)

+ ZnO
+ B₂O₃



Sol-Gel
Synthese



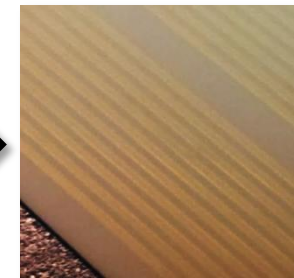
Sprühtrocknung
+ Kalzination



Mahlen +
Dispergieren



Tintenstrahl-
druck

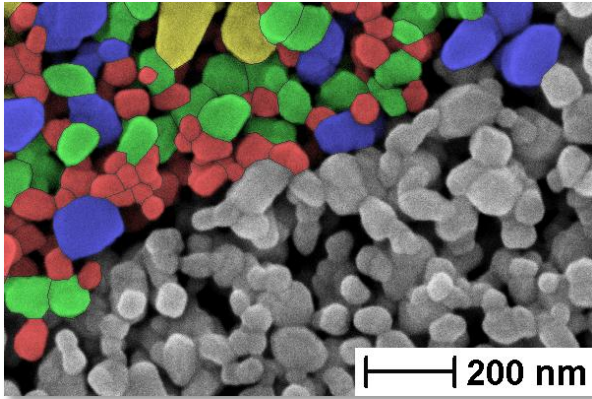


Sintern

Prozesskette für die Tintenaufbereitung und Tintenentwicklung, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* 96.7 (2013)

BST–ZnO–B₂O₃-Dickschichten

■ Mikrostruktur



Sinterbedingungen:

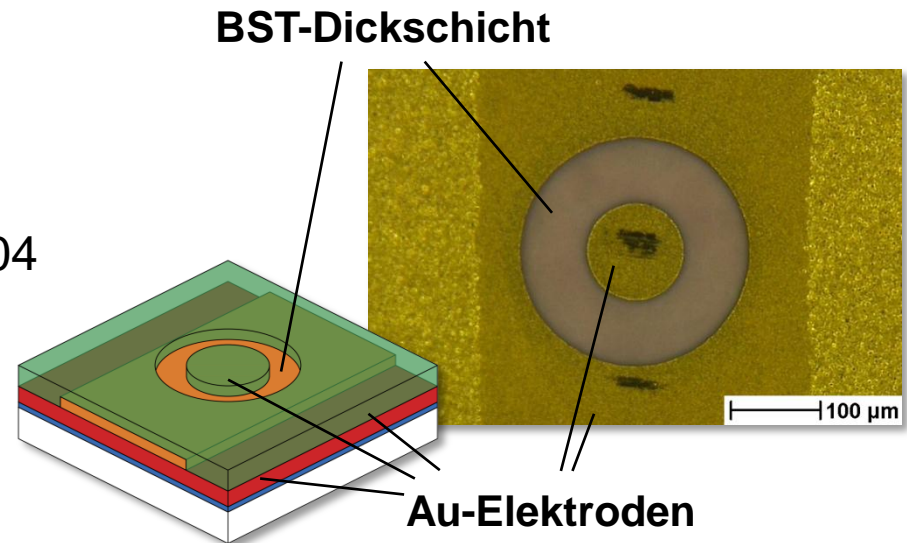
1h @ 850°C

Korngröße:

$d_{50} = 0,14 \mu\text{m}$

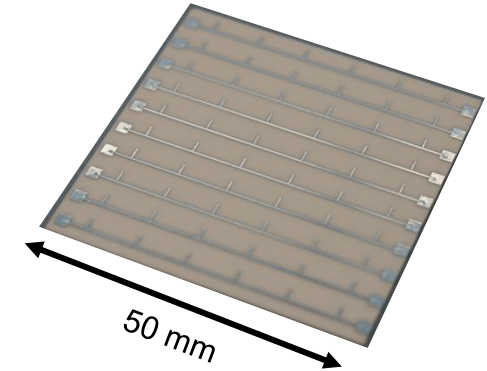
■ Eigenschaften bei $f = 3 \text{ GHz}$

- Relative Permittivität: $\epsilon_r = 130$
- Verlustfaktor: $\tan \delta = 0,04$
- Steuerbarkeit: $\tau = 41 \%$
(@ 20 V/ μm)



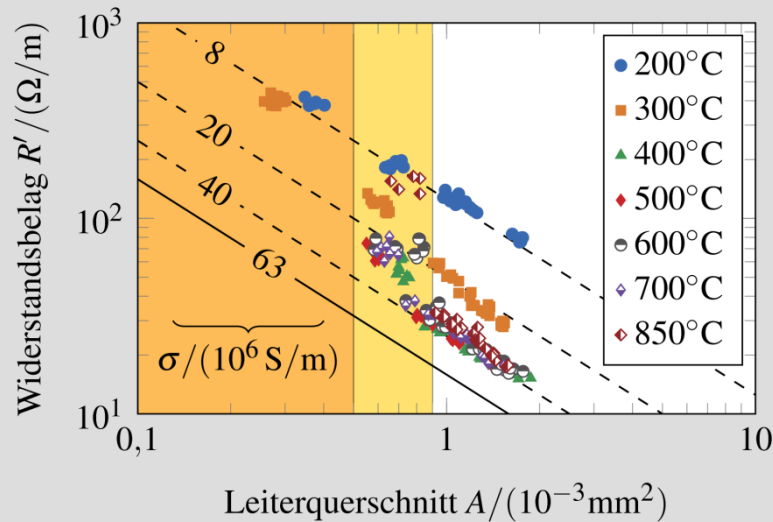
Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Leitfähigkeit der Elektroden

- *Problem:* Starke Sinteraktivität bei $T_S = 850^\circ\text{C}$
- *Untersuchung:* Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Schichtdicke und Sinter Temperatur



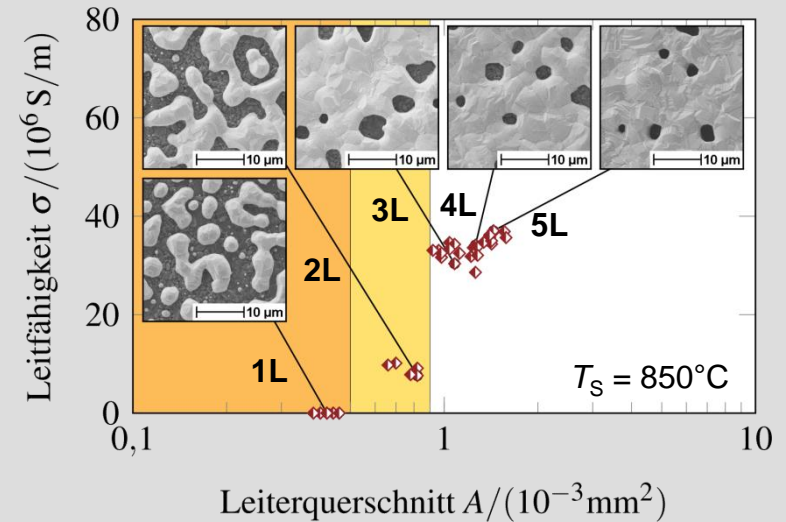
Widerstandsbelag

$$R' = R / l$$



Leitfähigkeit

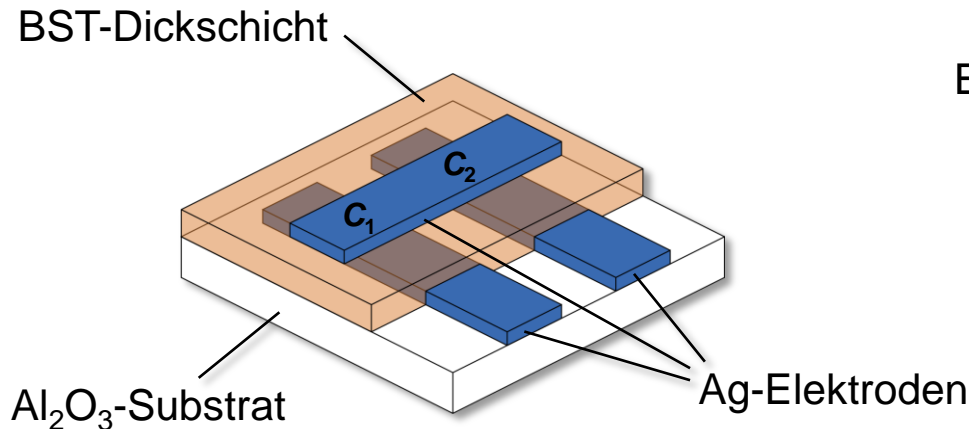
Linienbreite: $w \approx 400 \mu\text{m}$



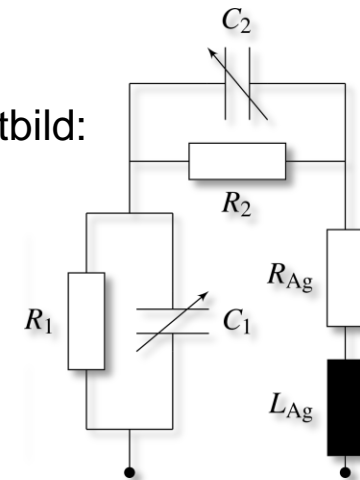
3 Lagen bzw. $h_{\text{Ag}} \approx 2 \mu\text{m}$ notwendig für eine gute Leitfähigkeit

Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Entwurf

- Drei-Lagen-Aufbau mit zwei Kapazitäten in Serie (π -Layout)

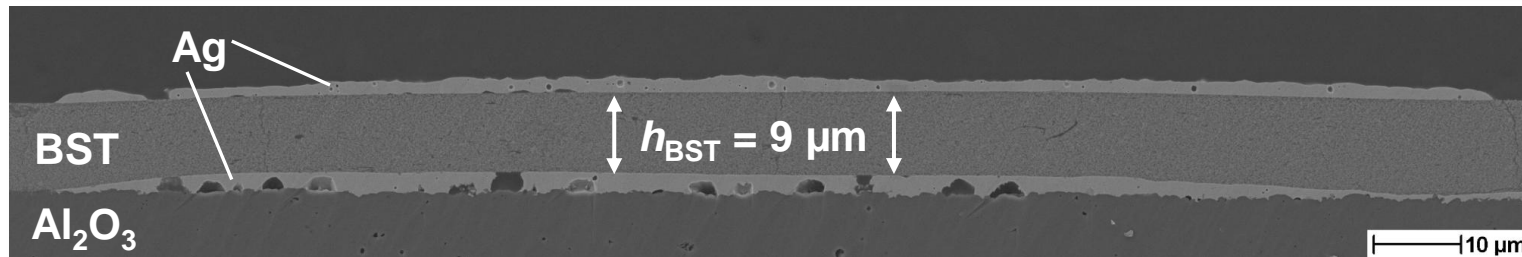
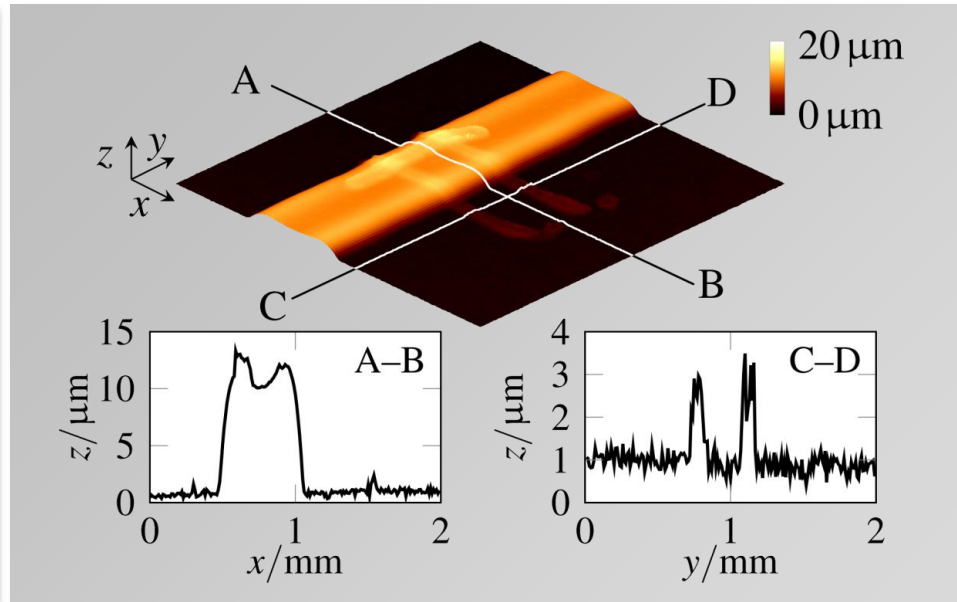
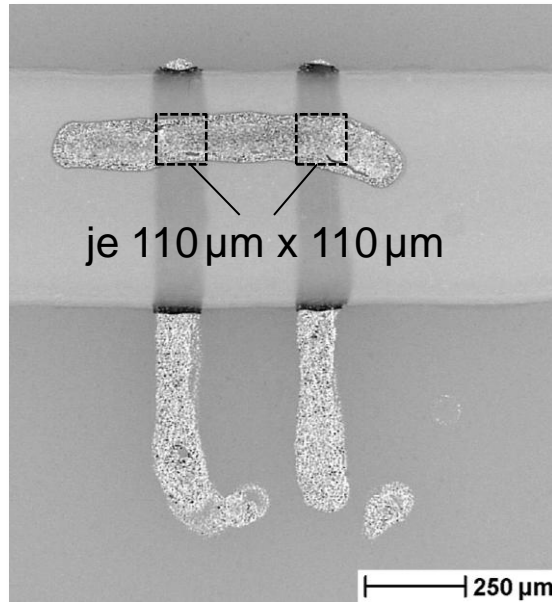


Ersatzschaltbild:



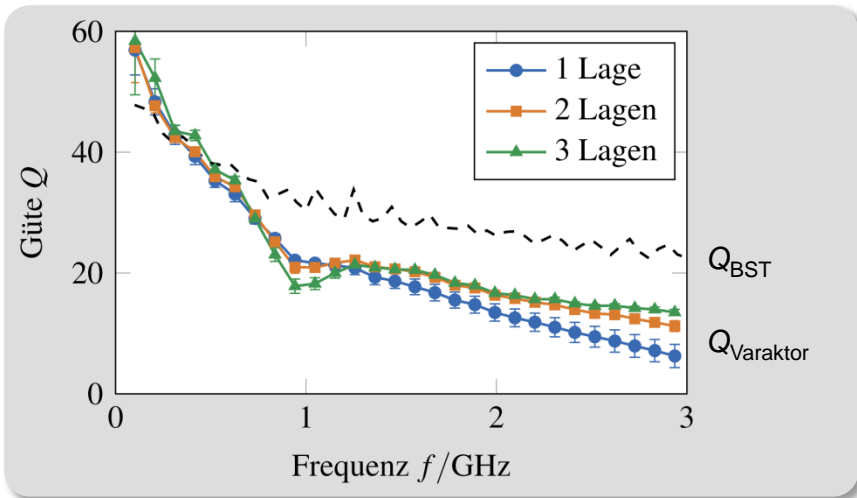
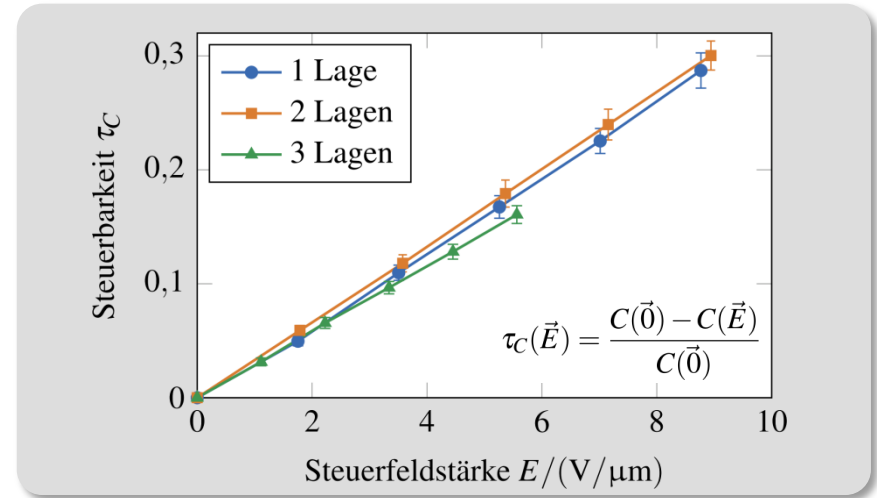
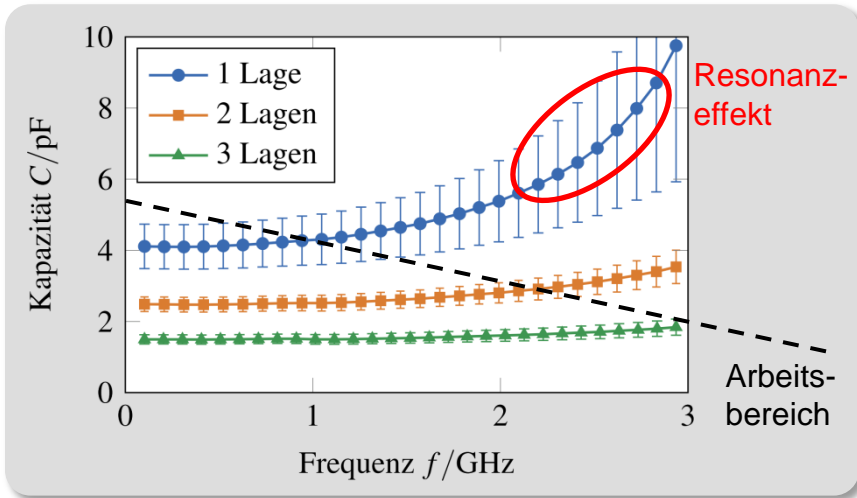
- Vorteile des gewählten π -Layouts:
 - Verringerte Kapazität durch Serienschaltung
 - Vermeidung von Elektrodendruck über Linienkanten hinweg
- Variierte Parameter: Druck von 1–3 Lagen BST
(entspricht 3–9 μm Schichtdicke)

Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Schichttopografie (3 Lagen BST)



- + BST-Dickschicht sehr homogen
- Elektrodenqualität gering (Kommerzielle Ag-Tinte für $T_S < 300^\circ\text{C}$ optimiert)

Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Eigenschaften

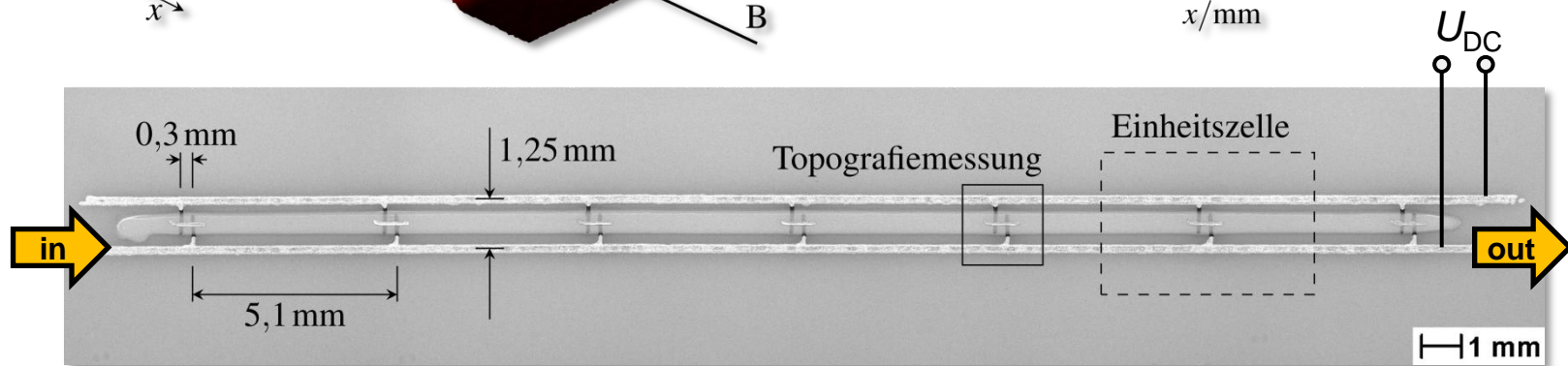
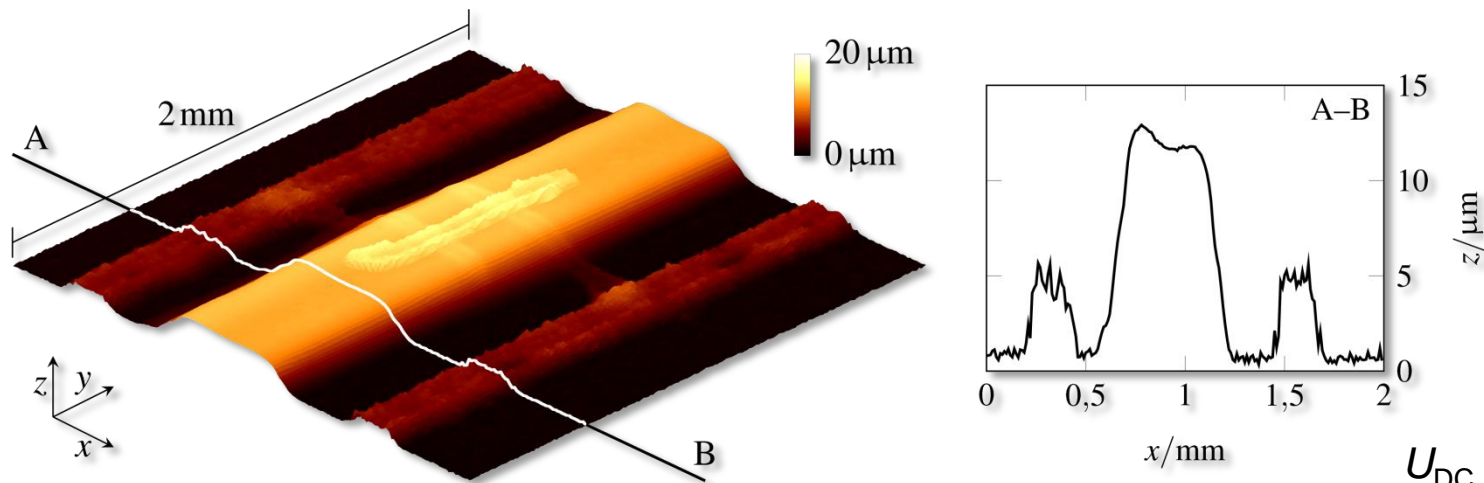


Eigenschaften:

- Kapazität: $C_0 = 1,5\text{--}4 \text{ pF}$
- Güte: $Q = 15\text{--}20$
(@ 2 GHz)
- Steuerbarkeit: $\tau_C = 14\text{--}17 \%$
(@ 5 V/ μm)

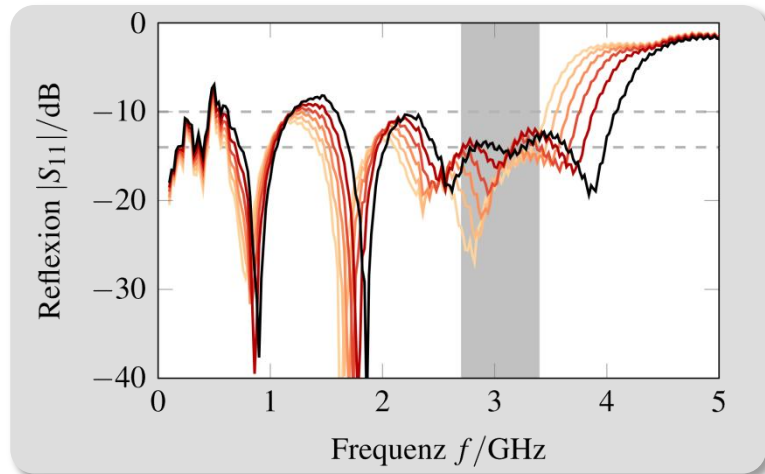
Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Aufbau und Topografie

- Arbeitsprinzip: Ein Signal wird entlang einer *transmission line* durch steuerbare Kapazitäten verzögert → Die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ kann dabei durch eine angelegte Gleichspannung gesteuert werden

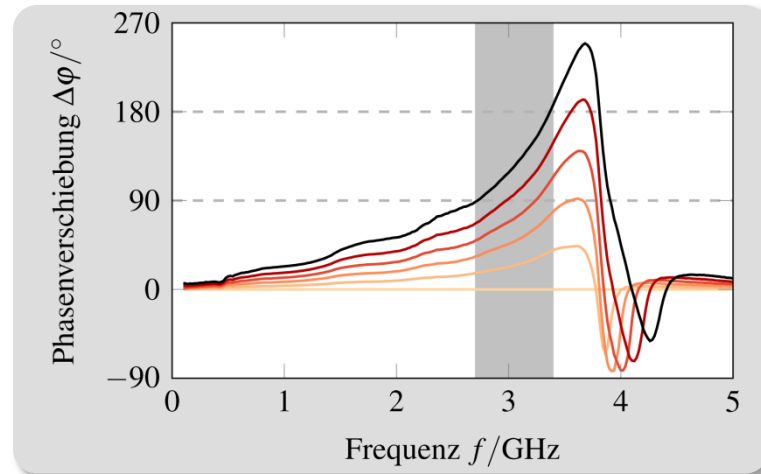


Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Eigenschaften

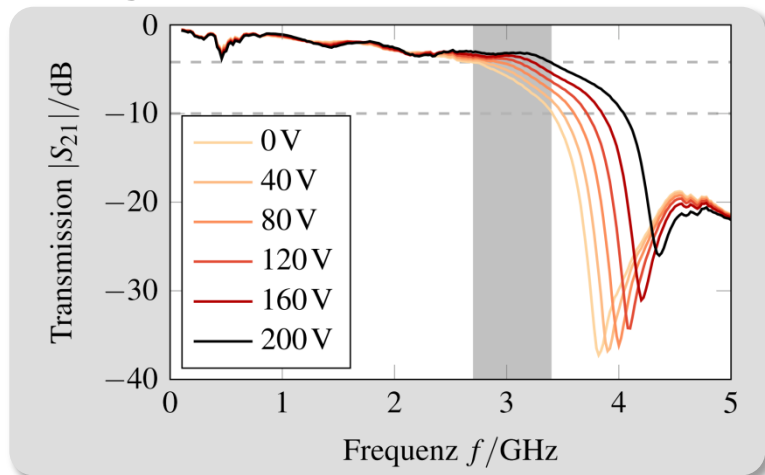
Reflexion



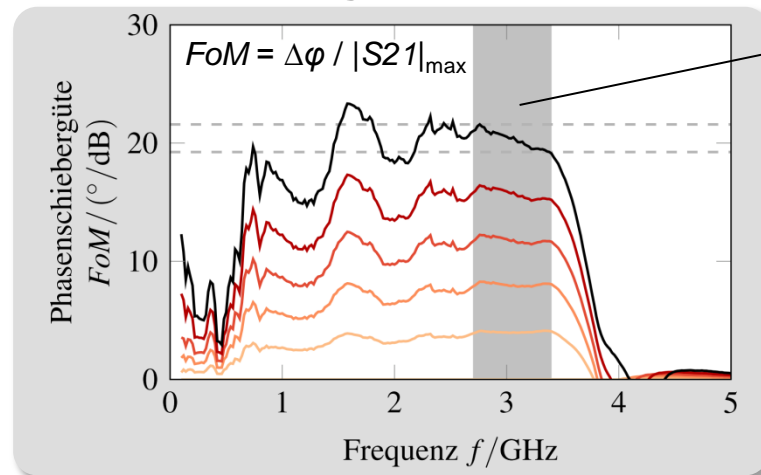
Phasenverschiebung



Einfügeverluste



Phasenschiebergüte



Arbeitsbereich



Zusammenfassung

- Entwicklung einer BST-Tintenzusammensetzung für Kostinerprozesse
 - Gleichmäßige Schichten durch optimierte Tintenzusammensetzung
 - Sinterung bei 850°C durch Zusatz von ZnO und B₂O₃ möglich
 - Eigenschaften vergleichbar mit konventionell gesinterten Schichten

- Druck von Mehrlagen-Varaktoren
 - Kosinterung mit gedruckten Elektroden erfolgreich
 - Elektrodenqualität gering
 - Erreichte Kapazitäten bis unter 2 pF → Einsatzfrequenz bis 3 GHz

- Druck eines S-Band-Phasenschiebers
 - Eignung des Prozesses für vollständig tintenstrahlgedruckte Mikrowellenkomponenten ✓

Vielen Dank.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

