

Gedruckte Varaktoren für die Mikrowellentechnik

C. Kohler^{1,2}, A. Friederich^{1,2}, M. Nikfalazar², A. Wiens², R. Jakoby² und J.R. Binder¹

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)

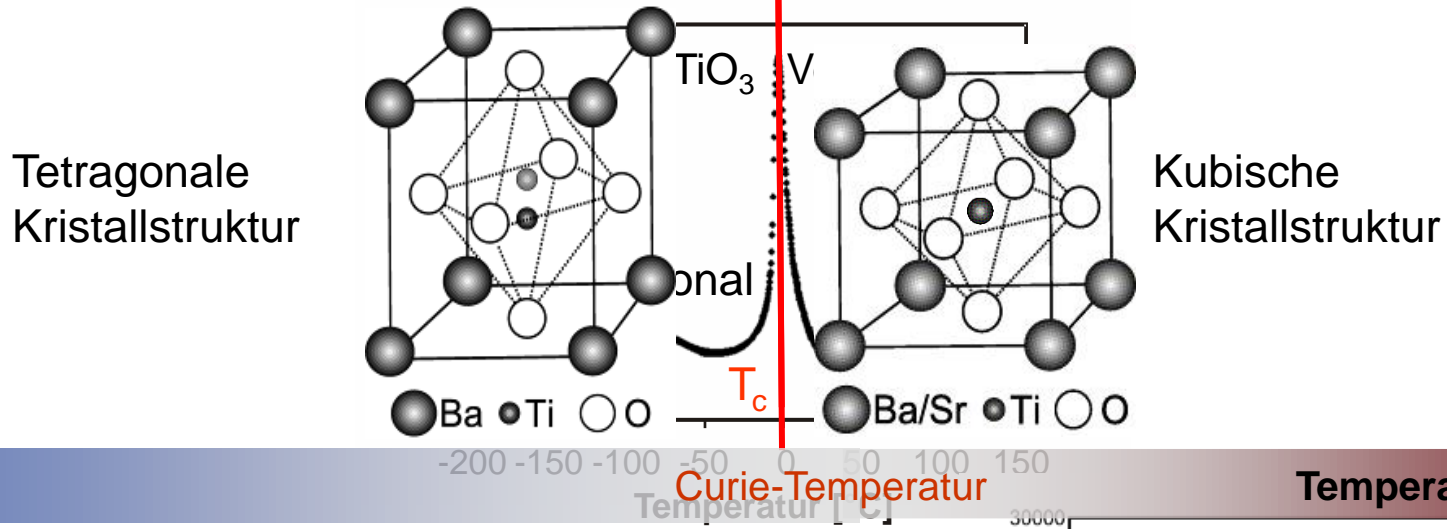
Gliederung

- Barium-Strontium-Titanat (BST)
- Konzept gedruckter Varaktoren
- Materialentwicklung BST-ZnO-B₂O₃-Komposite
- Vollständig **siebgedruckte** Varaktoren und Phasenschieber
- Vollständig **tintenstrahlgedruckte** Varaktoren und Phasenschieber
- Zusammenfassung und Ausblick

System $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$ (BST)

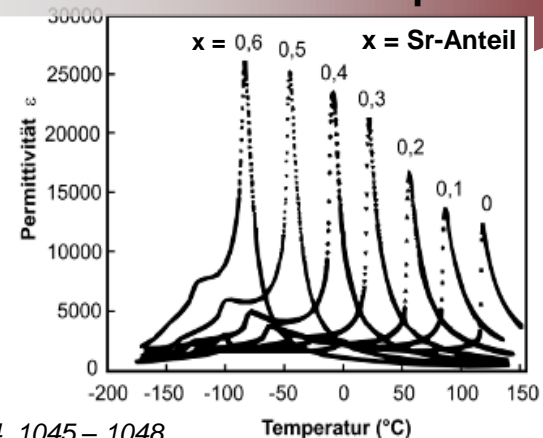
Ferroelektrische Phase

Paraelektrische Phase



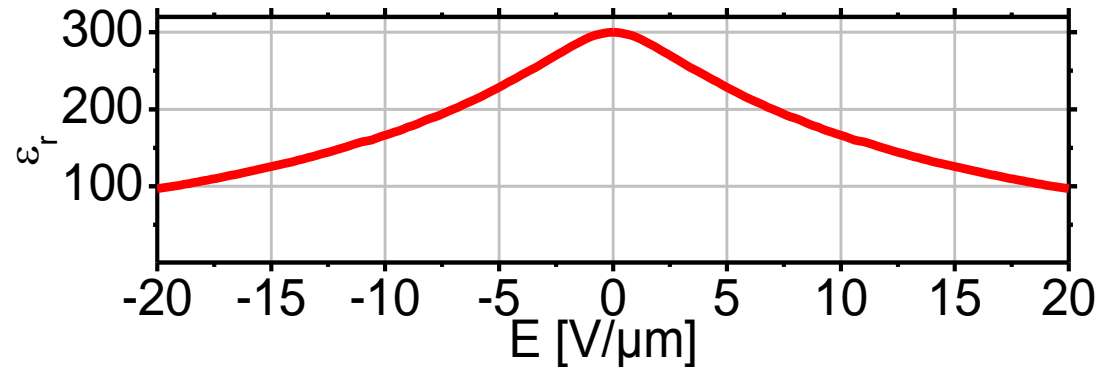
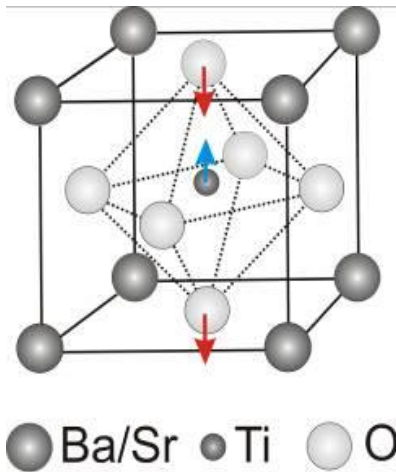
Für Mikrowellenanwendungen:

- Verwendung der paraelektrische Phase
- Anwendung bei RT $\rightarrow Ba_{0,6}Sr_{0,4}TiO_3$



Jeon, J., *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2004, 24, 1045– 1048

Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ als steuerbares Dielektrikum



BST zeigt eine nicht-lineare Abhängigkeit der Permittivität von einem E-Feld

Auslenkung des Ti⁴⁺-Ions durch ein äußeres elektrisches Feld

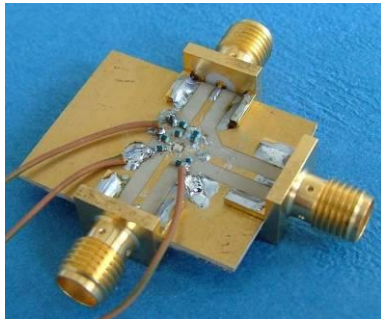
- *Leistungslose Steuerung*
- *Kontinuierlich steuerbar*
- *Ansteuerung im ns-Bereich*

Dielektrische Steuerbarkeit

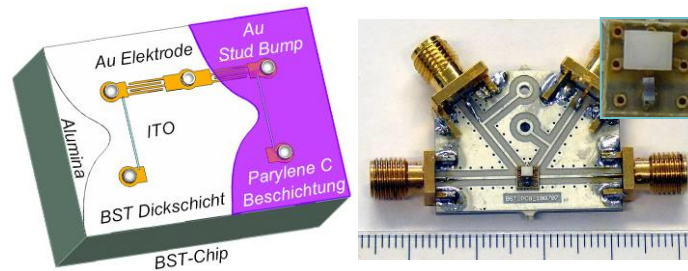
$$\tau_{\varepsilon}(\mathbf{E}) = \frac{\varepsilon_r(\mathbf{E}=0) - \varepsilon_r(\mathbf{E})}{\varepsilon_r(\mathbf{E}=0)}$$

BST-Dickschicht basierte Mikrowellenbauteile

Steuerbarer Filter

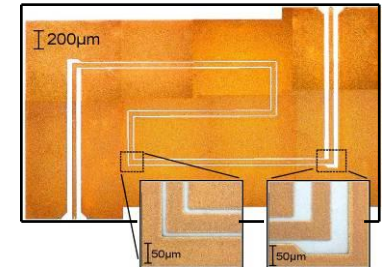


Steuerbares Anpassnetzwerk

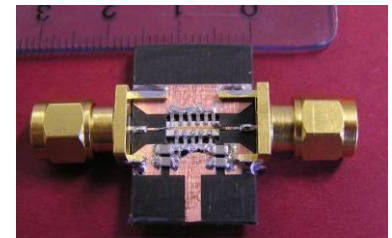


Phasenschieber

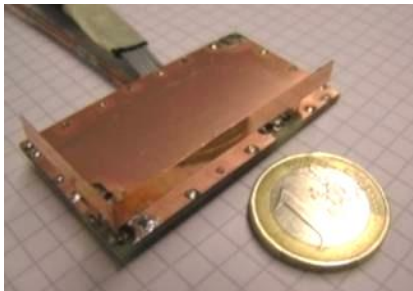
CPW basierter Phasenschieber



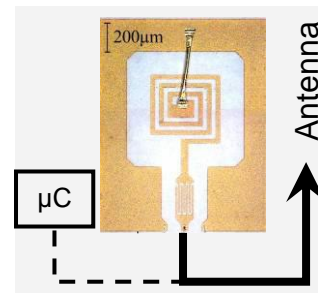
Left-handed phase shifter



Multibandantenne



RF-ID Modulator



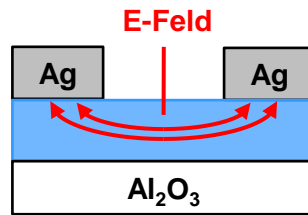
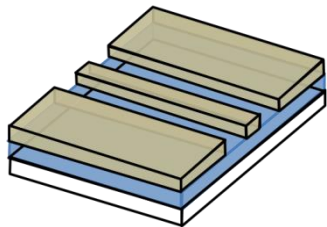
Institut für Mikrowellentechnik, Technische Universität Darmstadt

<http://www.mwe.tu-darmstadt.de/de/fachgebiete/mikrowellentechnik/forschung/ferroelectrics/ferroelectrics.html>

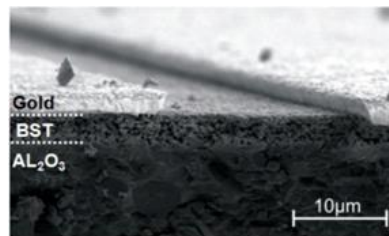
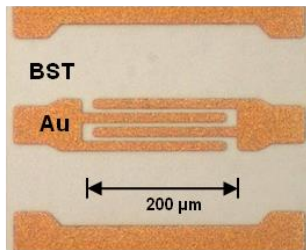
Konzept Varaktoren (Steuerbare Kondensatoren)

Bisher:

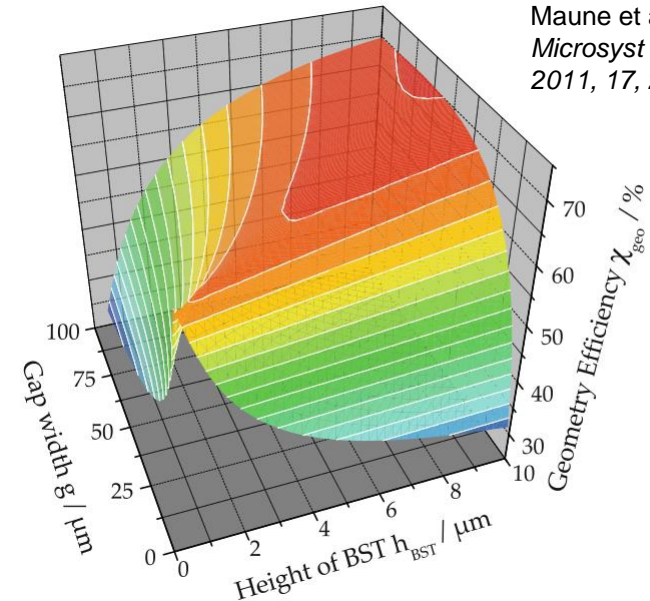
- Planare Strukturen
- Lithographische Prozessierung der Elektroden **nach** Sintern von BST



■ BST □ Ag □ Al₂O₃



→ Realisierung in Form eines Interdigital-Kondensators



Maune et al.,
Microsyst Technol.,
2011, 17, 213–224

Geometrieeffizienz

$$\chi_{geo} = \frac{\text{Steuerbarkeit (IDC)}}{\text{Steuerbarkeit (Material)}}$$

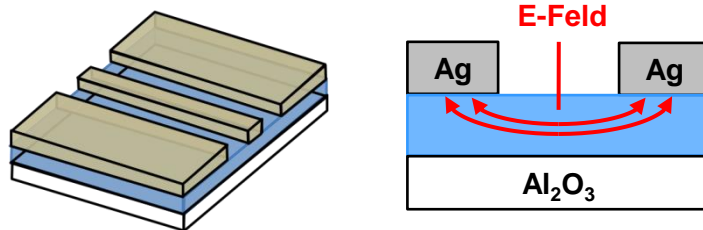
→ Abhängig von Schlitzbreite IDC, Höhe BST

→ Bei 10 μm Schlitzbreite Optimum $\chi_{geo} = 73\%$

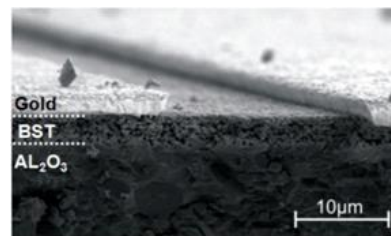
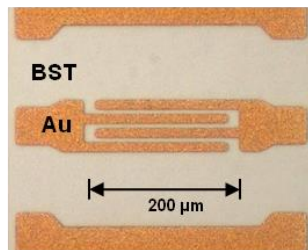
Konzept Varaktoren (Steuerbare Kondensatoren)

Bisher:

- Planare Strukturen
- Lithographische Prozessierung der Elektroden **nach** Sintern von BST



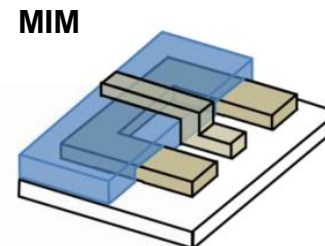
■ BST □ Ag □ Al₂O₃



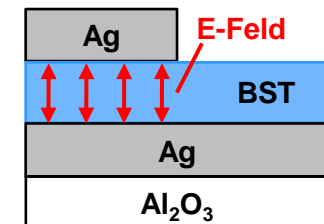
→ Realisierung in Form eines Interdigital-Kondensators

Neuer Ansatz:

- MIM-(Metall-Isolator-Metall) Anordnung
- Multilagendruck von BST und Elektroden mit anschließendem Kosintern (850-900°C)



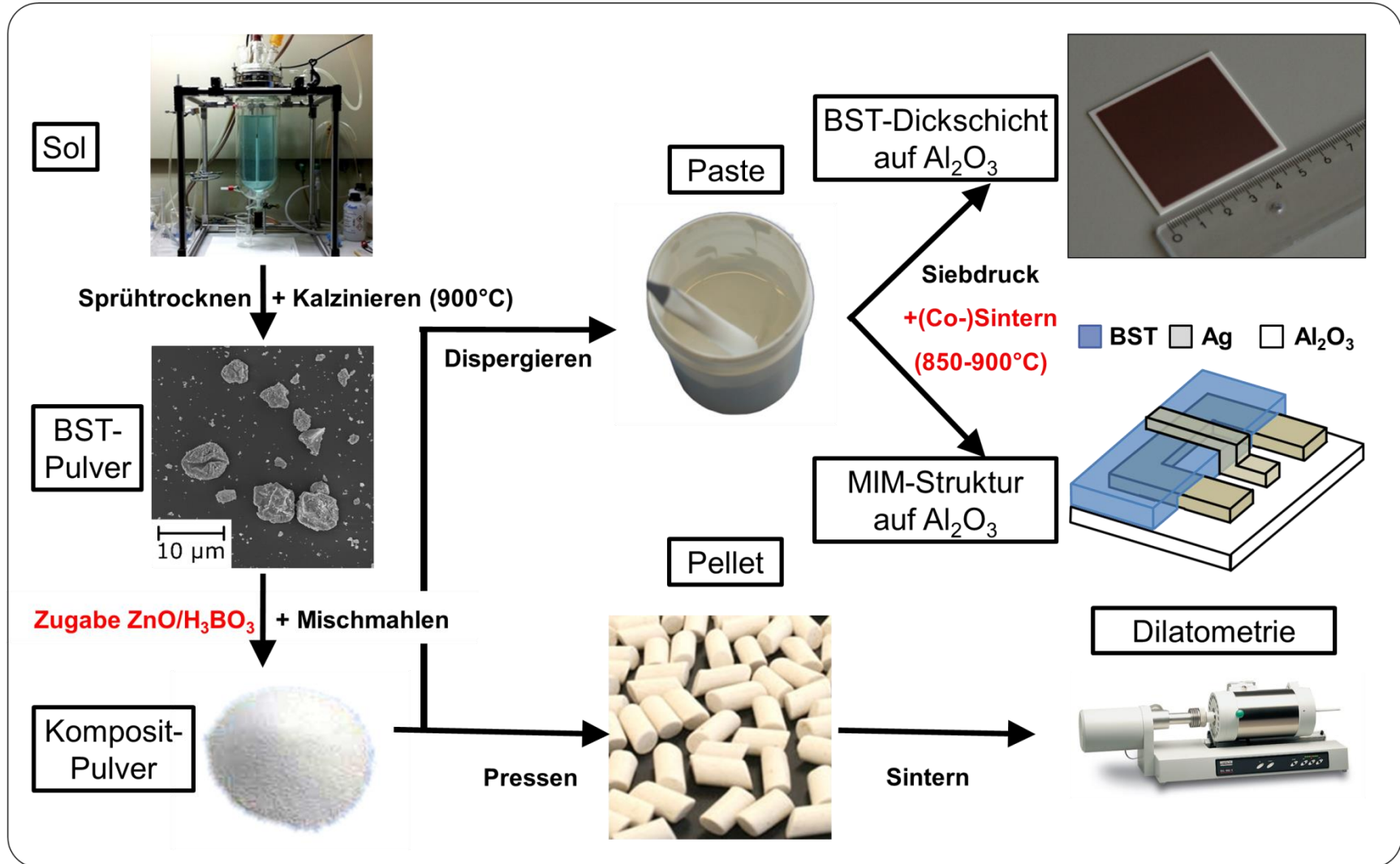
■ BST □ Ag □ Al₂O₃



- + höhere Steuerbarkeitseffizienz
- + geringere Spannungen notwendig
- reine BST-Dickschicht zu hohe Sinter Temperatur (1150-1200°C)
- bisher nur mit Pt o.ä. als untere Elektrode möglich → teuer, schlechte Leitfähigkeit

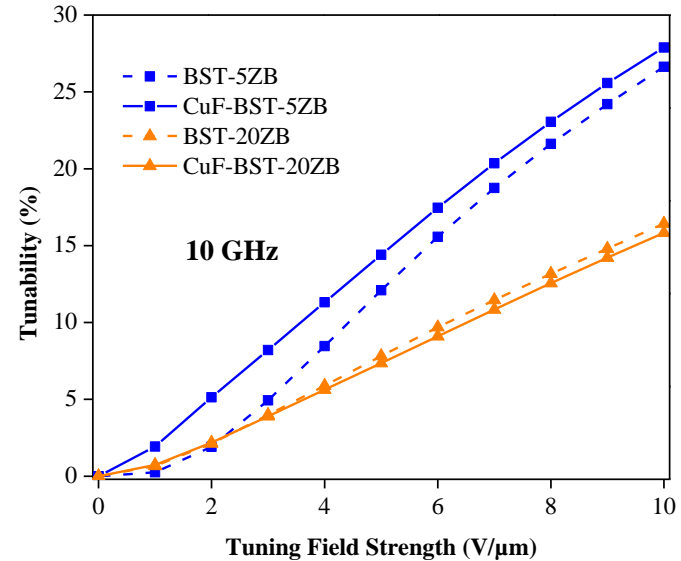
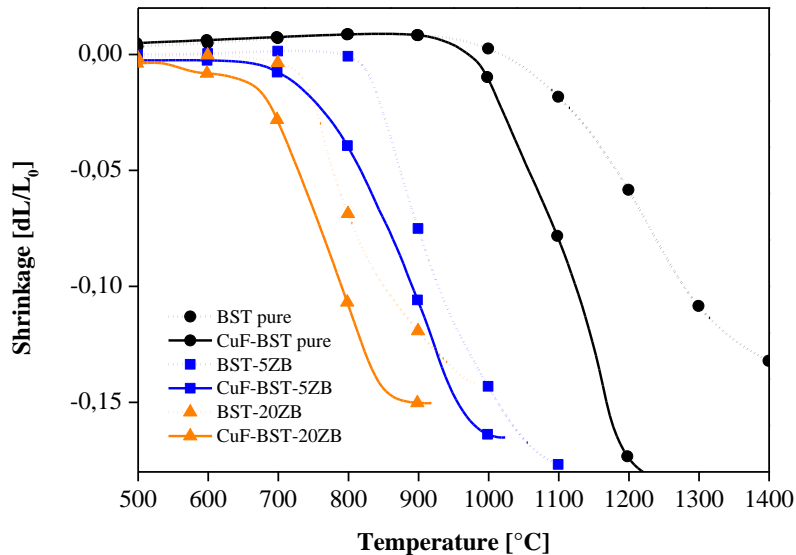
→ Ziel: Entwicklung niedrig-sinternder BST-Komposit

Entwicklung von BST-ZnO-B₂O₃-Kompositen



Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

Ergebnisse – BST-ZnO-B₂O₃-Komposite



→ Drastische Herabsetzung Sinterterperatur

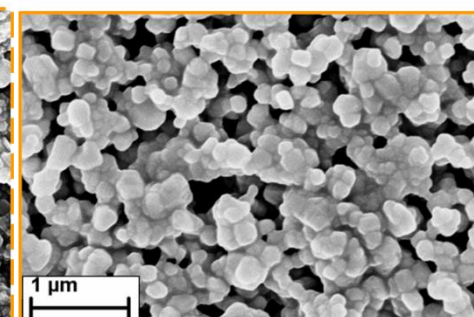
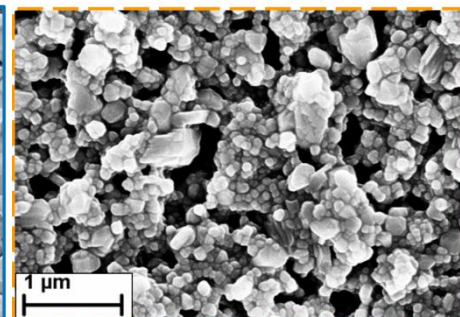
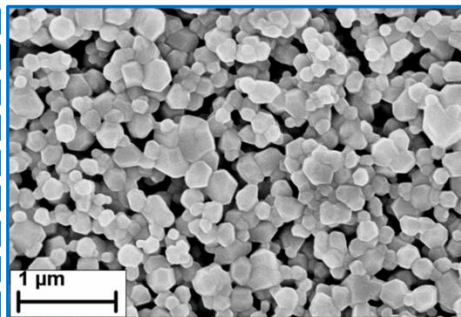
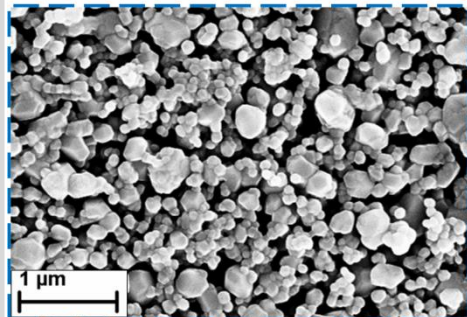
→ Wahrung guter dielektrischer Eigenschaften

BST-5ZB

CuF-BST-5ZB

BST-20ZB

CuF-BST-20ZB



→ Abhängigkeit der Mikrostruktur von Zusatz ZnO-B₂O₃ sowie Cu-F- Dotierung von BST

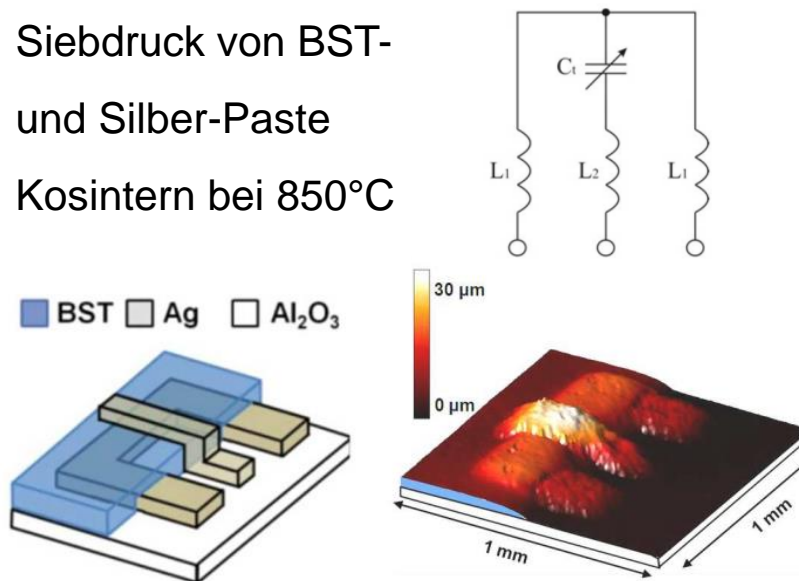
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209

Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

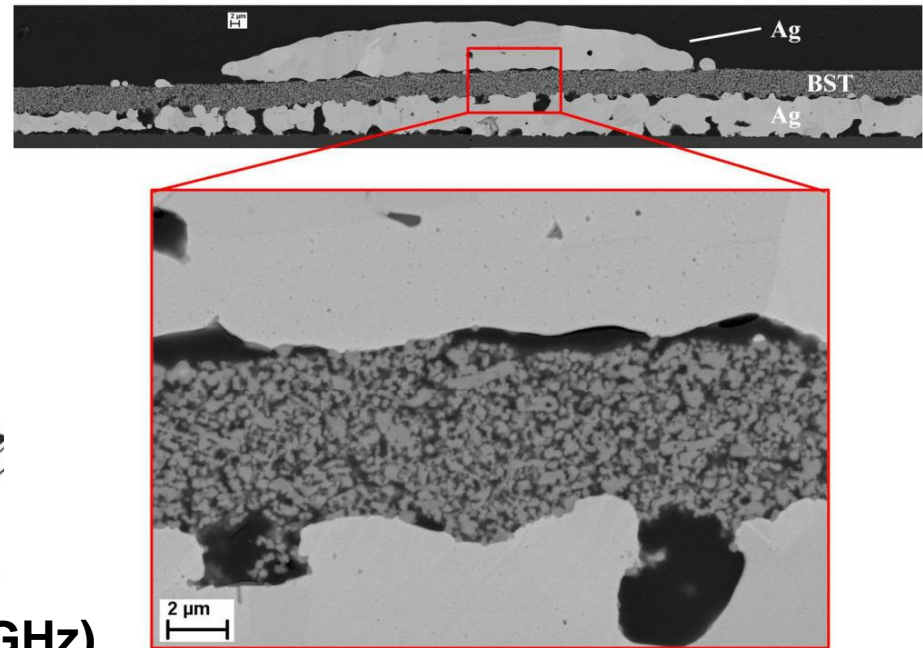
MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

Konzept und Realisierung

- Siebdruck von BST- und Silber-Paste
- Kosintern bei 850°C



Querschnitt



Dielektrische Eigenschaften (3 GHz)

Testing structure	Capacitance (pF)	Relative permittivity	Quality factor (1/tan δ)	Tunability (%) (at 10 V/μm)	Applied tuning voltage (V)
CPW ¹	-	214	38	28.6	200
MIM ²	2.9	197	25	37.8	60

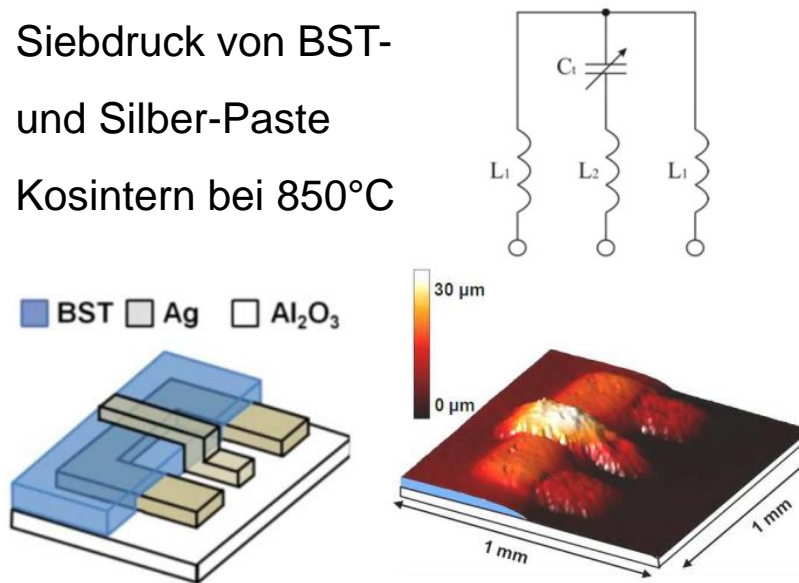
¹) CPW with gap width of 20 μm ²) MIM varactor with 6 μm electrode distance

Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

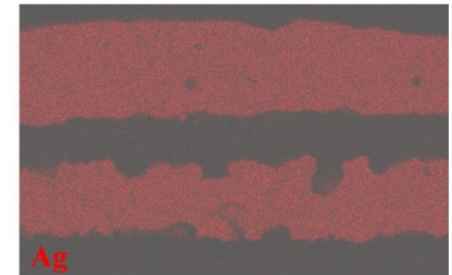
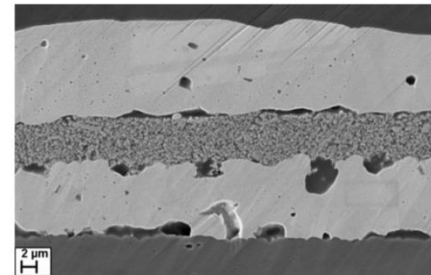
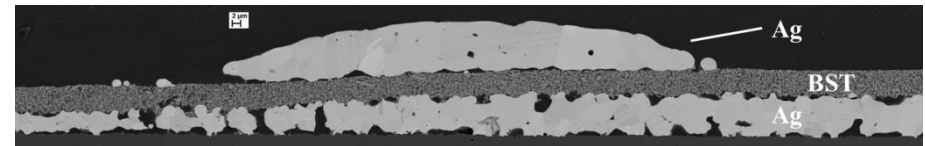
MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

Konzept und Realisierung

- Siebdruck von BST- und Silber-Paste
- Kosintern bei 850°C



Querschnitt (EDX)



Dielektrische Eigenschaften (3 GHz)

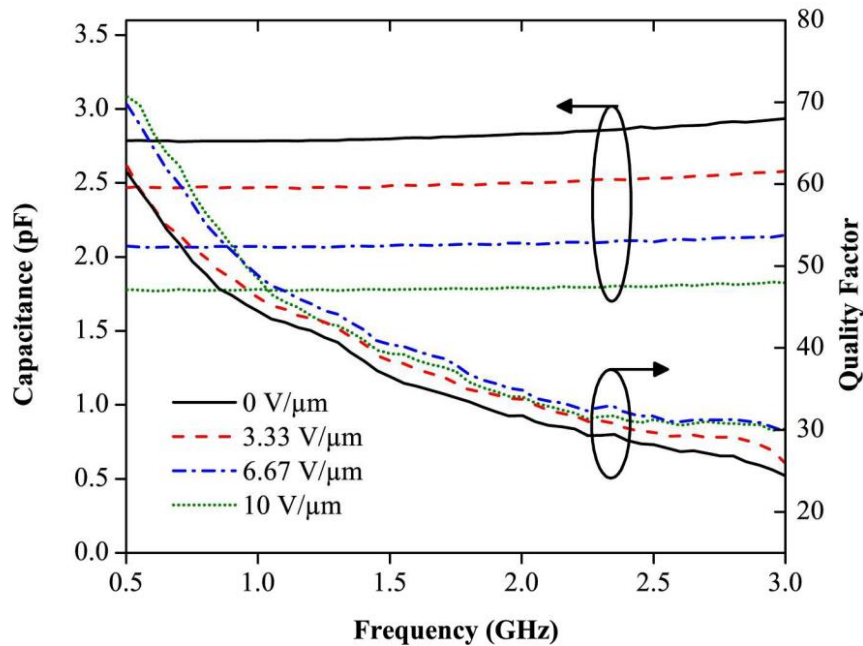
Testing structure	Capacitance (pF)	Relative permittivity	Quality factor (1/tan δ)	Tunability (%) (at 10 V/μm)	Applied tuning voltage (V)
CPW ¹	-	214	38	28.6	200
MIM ²	2.9	197	25	37.8	60

¹) CPW with gap width of 20 μm ²) MIM varactor with 6 μm electrode distance

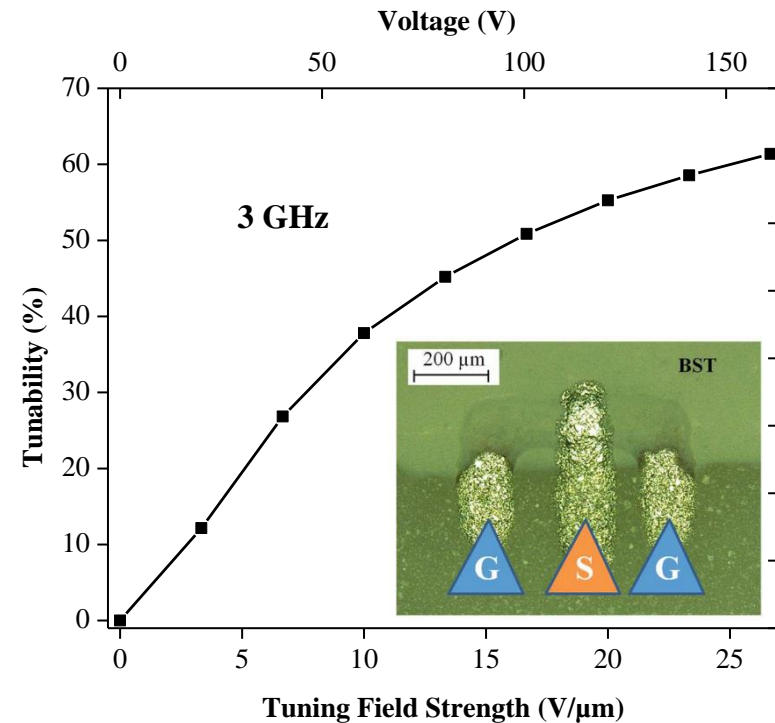
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

MIM-Varaktor - Herstellung & Charakterisierung

Kapazität/Q-Faktor



Steuerbarkeit

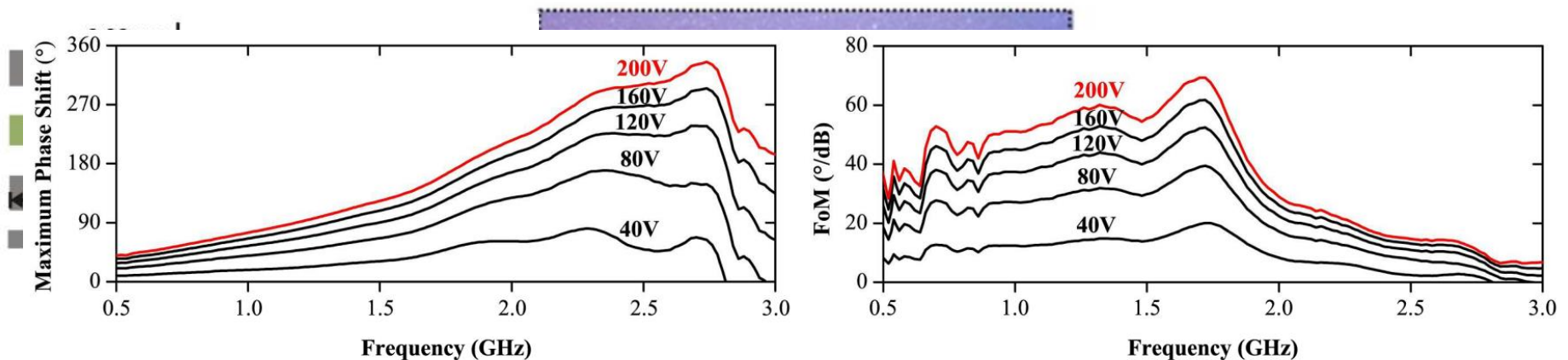


Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

Vollständig siebgedruckter Phasenschieber

Konzept und Realisierung

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



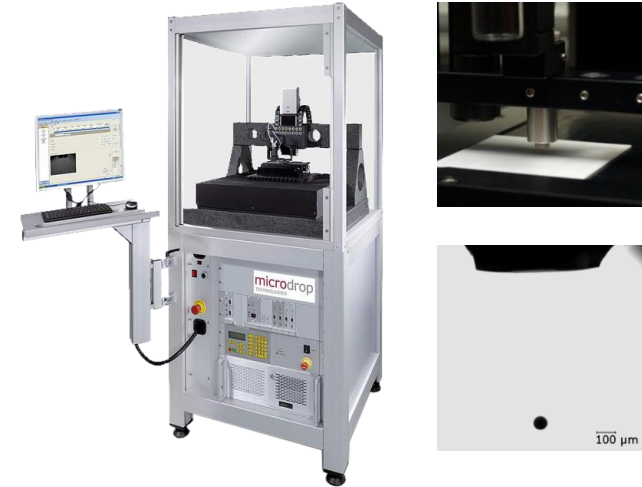
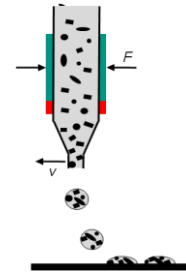
Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2013, 10, (S1) E200-209
 Kohler et al., *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2014, doi: 10.1111/ijac.12276

Transfer auf Tintenstrahldruck

- Drucksystem Autodrop Professional, Microdrop
 - Druckkopf Eindüsenkopf, 100 µm Durchmesser

Tintenanforderungen

- Partikelgröße: $d_{\text{Partikel,max}} \ll d_{\text{Kapillare}}$
- Stabilität:
 - Sedimentation vernachlässigbar klein
 - keine Agglomeration im Prozess



- Fluidmechanik

- Reynoldszahl:

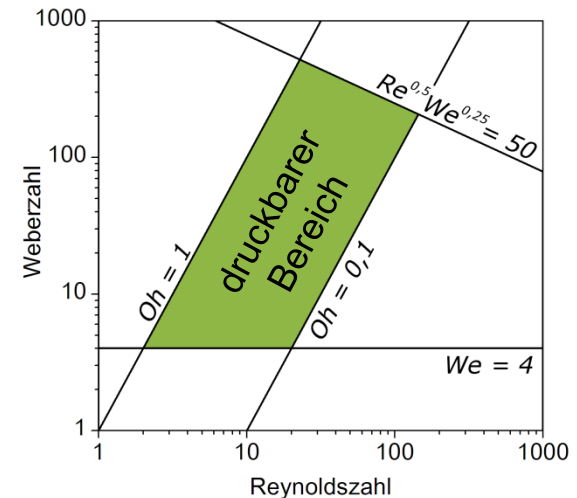
$$Re = \frac{v \rho a}{\eta} \quad \text{„Trägheit/Zähigkeit“}$$

- Weberzahl:

$$We = \frac{v^2 \rho a}{\gamma} \quad \text{„Trägheit/Oberflächenk.“}$$

- Ohnesorgezahl:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{(\gamma \rho a)^{1/2}}$$



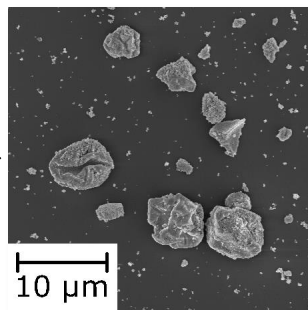
Ausgangspunkt

- Etablierte Siebdruck-Prozesskette am IAM-WPT vorhanden (Paul, Zhou, Kohler)
- **Problem:**
Die Dispersionen erfüllen nicht die Partikelgrößen-Anforderungen des Tintenstrahldrucks

etablierte Prozesskette für den Siebdruck



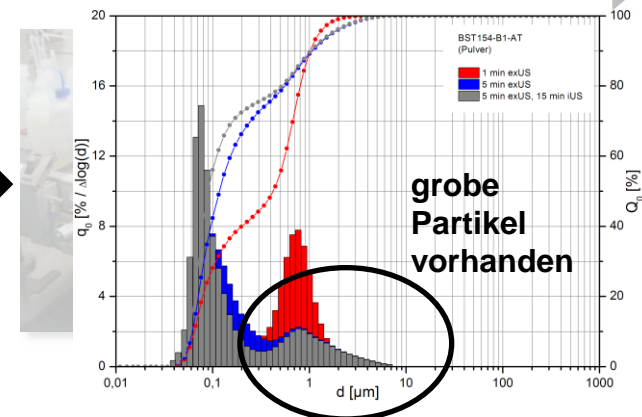
Sol-Gel
Synthese



Sprühtrocknung
+ Kalzination

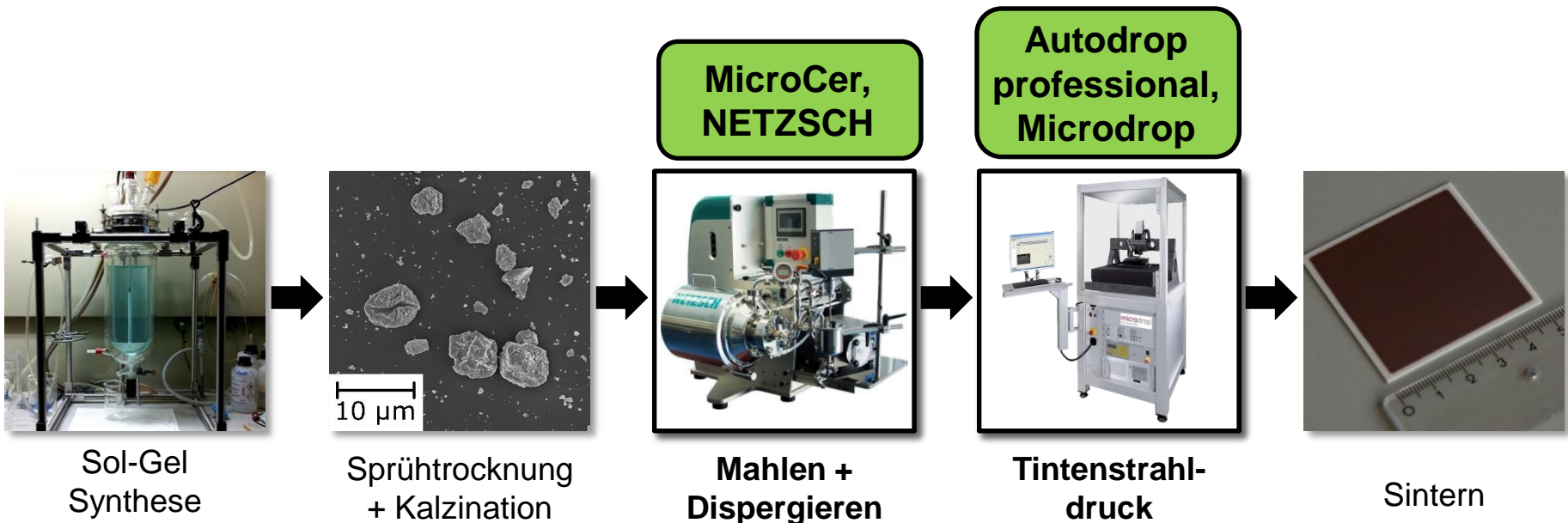


Mahlen +
Dispergieren

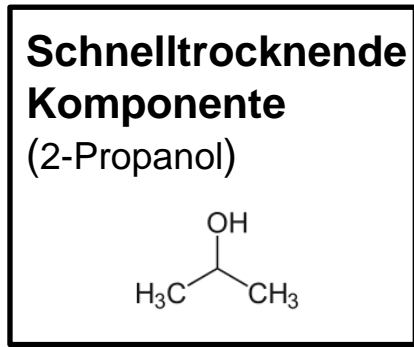
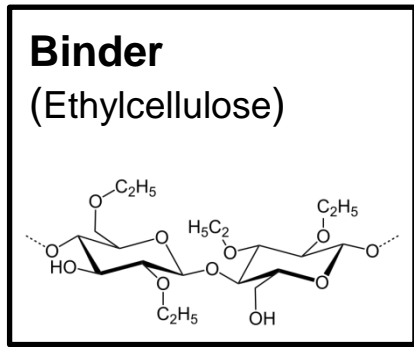
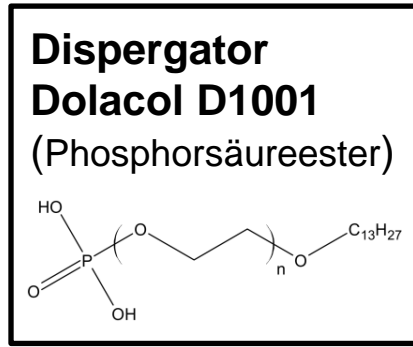
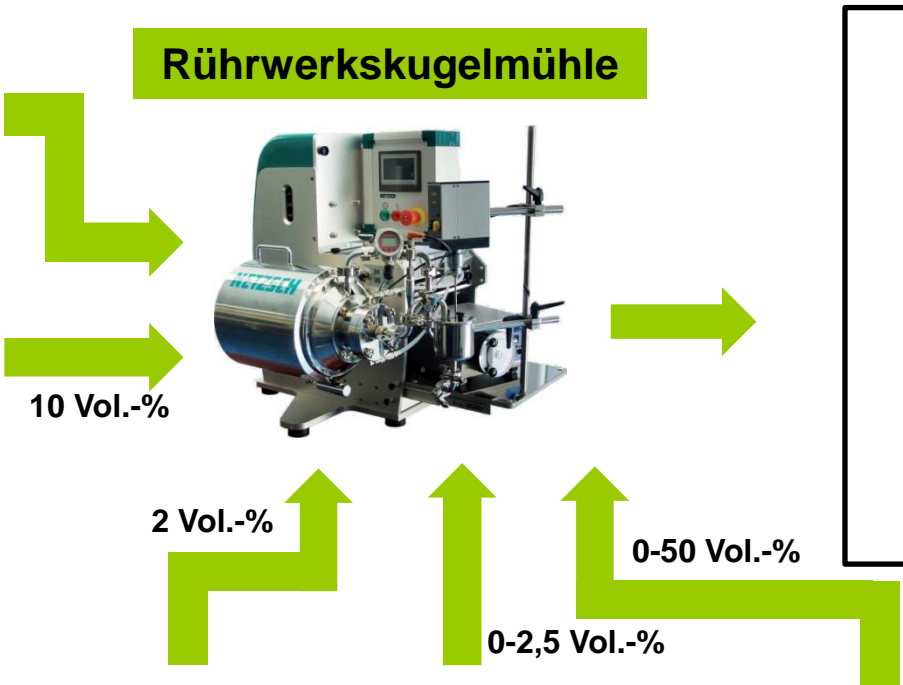
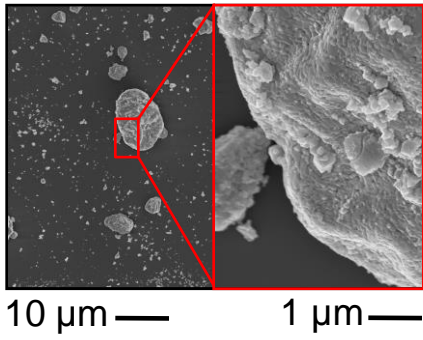
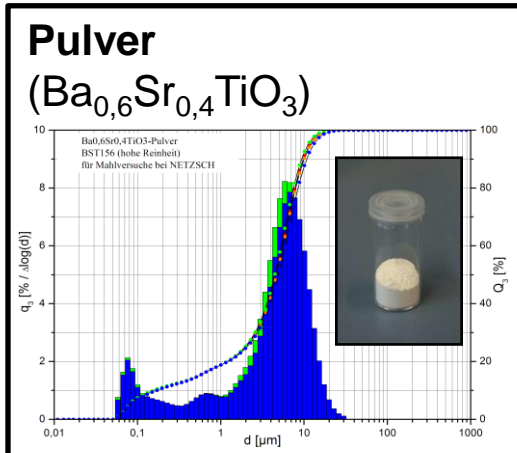
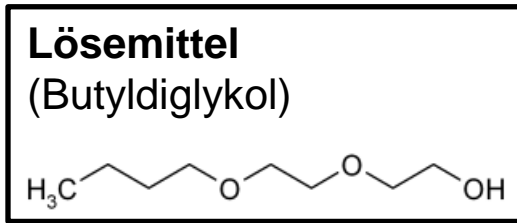


Vorgehensweise

- Auswahl eines geeigneten Mahlprozesses
→ Rührwerkskugelmühle
- Entwicklung von geeigneten Tintenzusammensetzungen



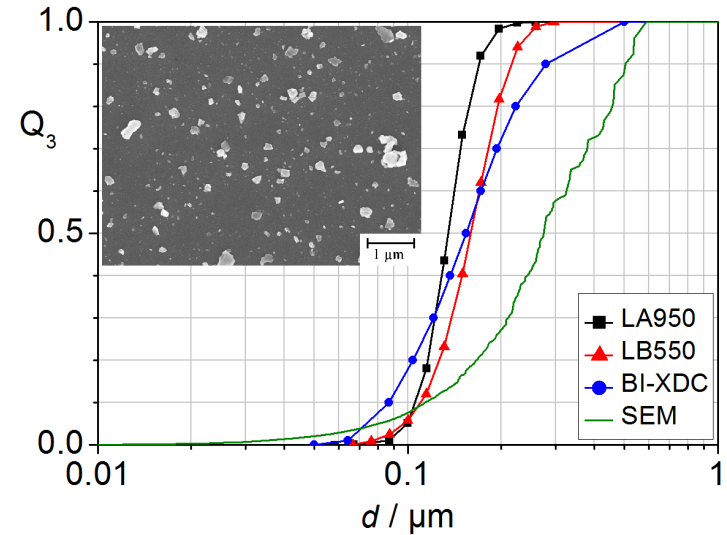
Tintenherstellung



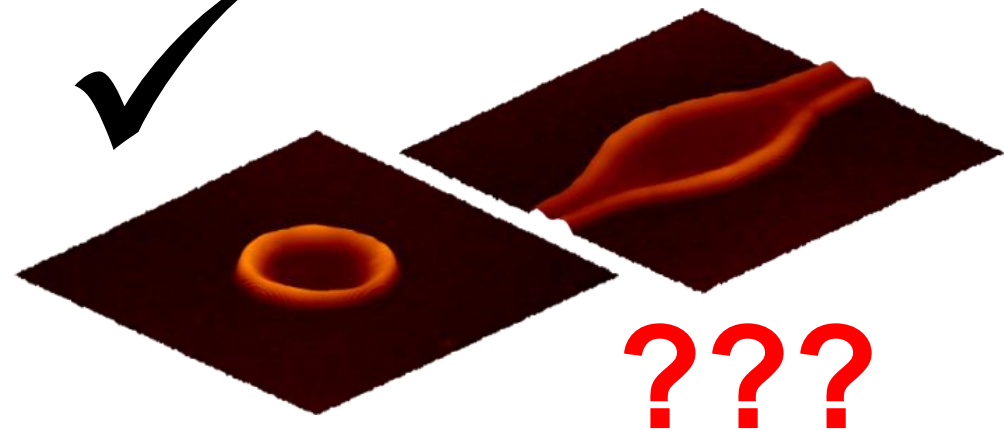
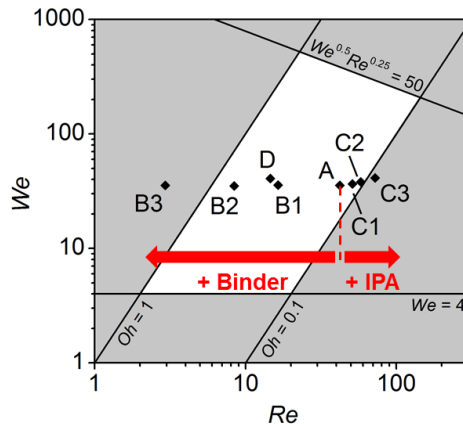
(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

Tinten-Eigenschaften

- Partikelgröße
 - $d_{50} = 150\text{--}300\text{ nm}$
 - $d_{\text{max}} < 1\ \mu\text{m}$
- Stabilität
 - keine Sedimentation erkennbar (über Monate)



- Fluidmechanische Eigenschaften

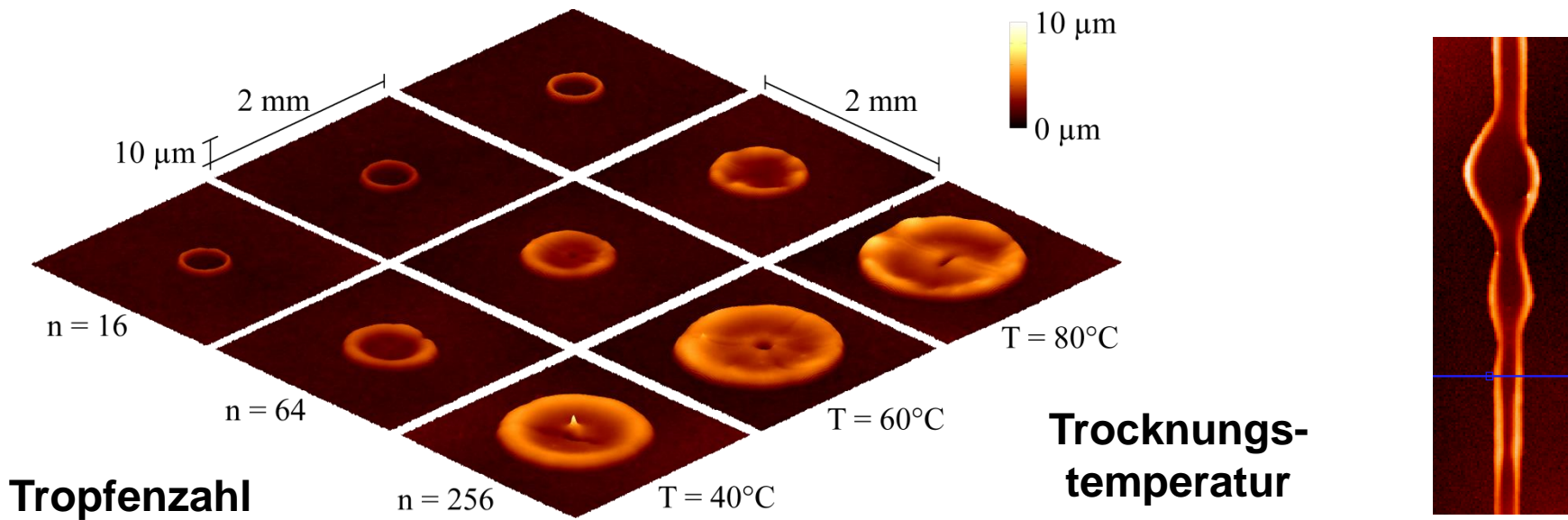


(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

Druckversuche

Ausgangstinte (nur Lösemittel, Pulver und Dispergator)

- Druck von punktförmigen Strukturen mit verschiedenem Volumen
- Variation der Trocknungstemperatur zwischen 40°C und 80°C

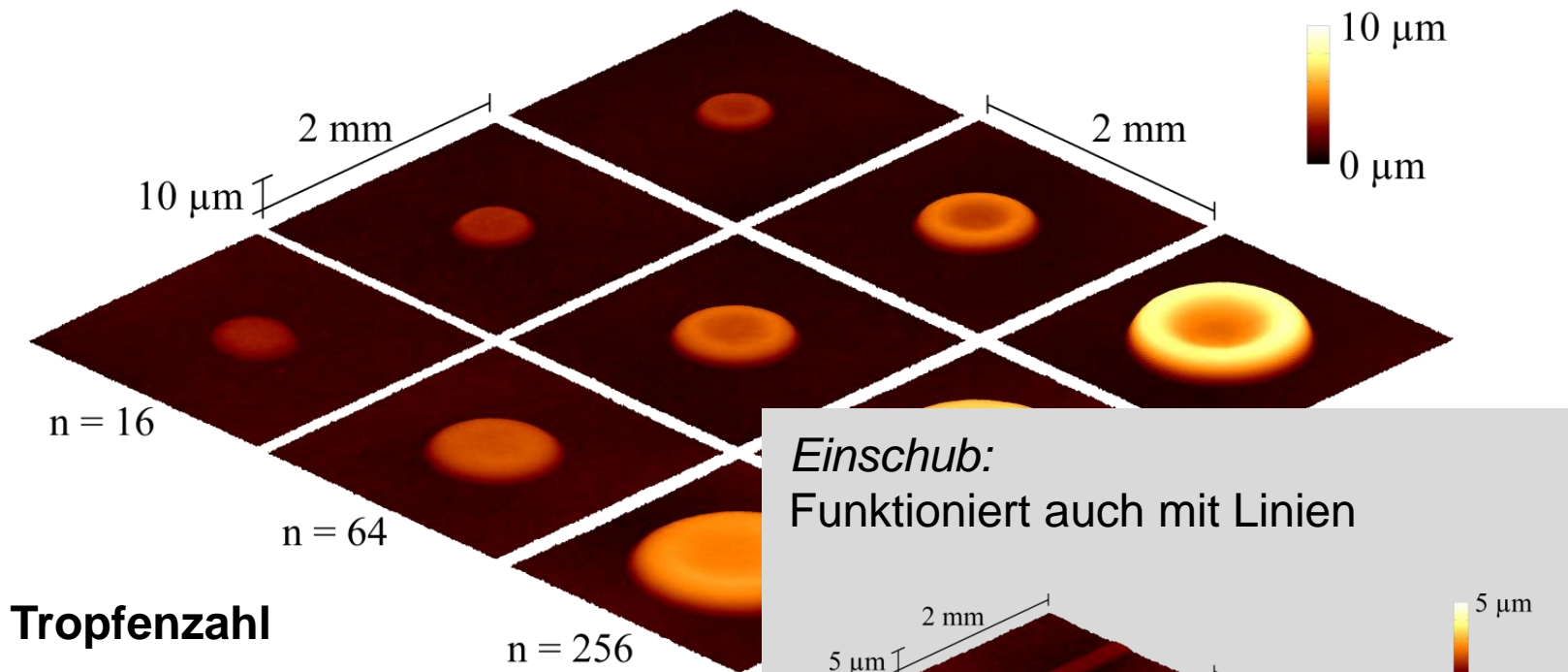


→ sehr ungleichmäßige Topographie (Punkte und Linien)

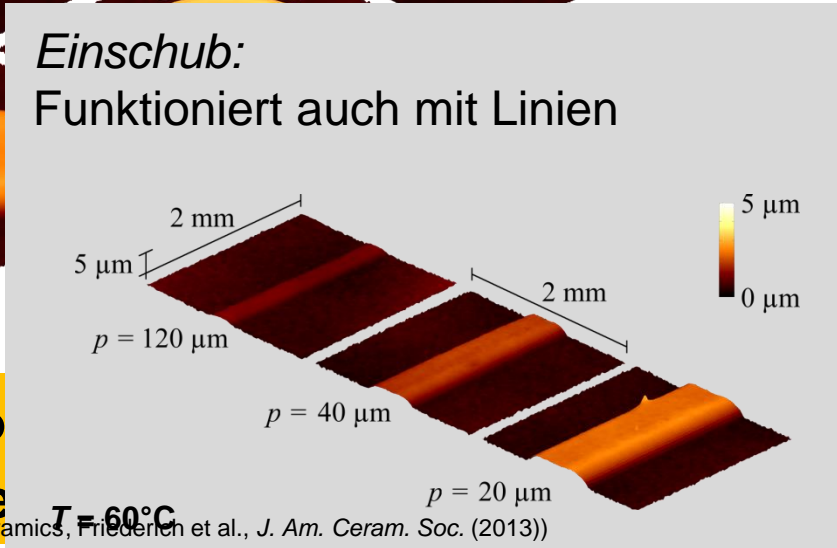
(Rheological control of the coffee stain effect for inkjet printing of ceramics, Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* (2013))

Optimierte Tintenzusammensetzung

Zugabe von 1 Vol.-% Binder und 49 Vol.-% IPA

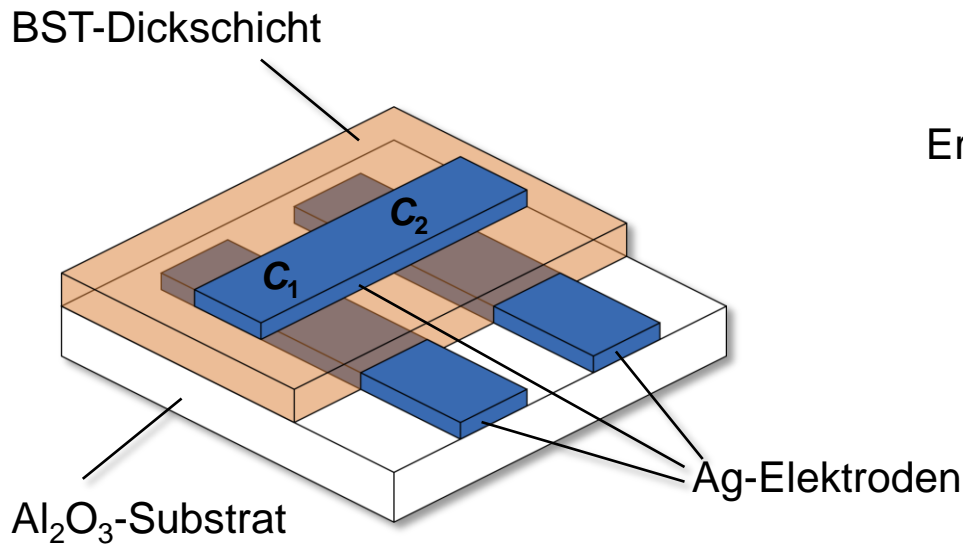


Tropfenzahl

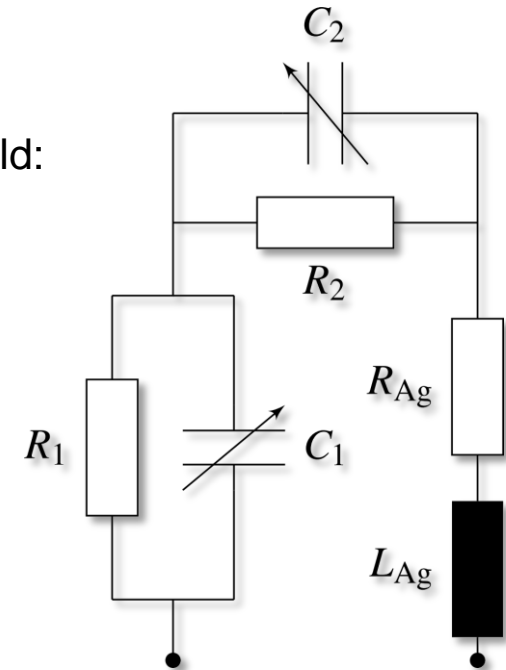


→ Übergang von „Tropfenfo
→ Konturoptimum durch Te

Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Entwurf



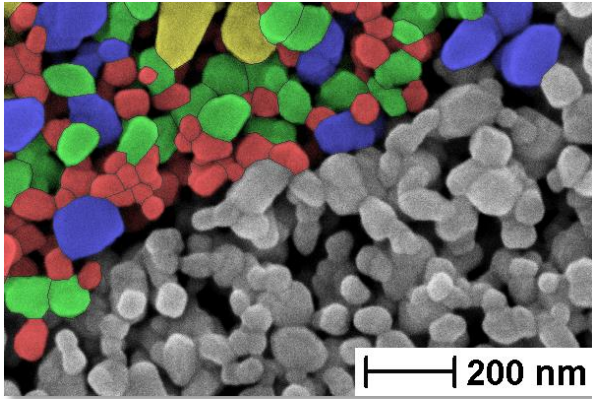
Ersatzschaltbild:



- 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)

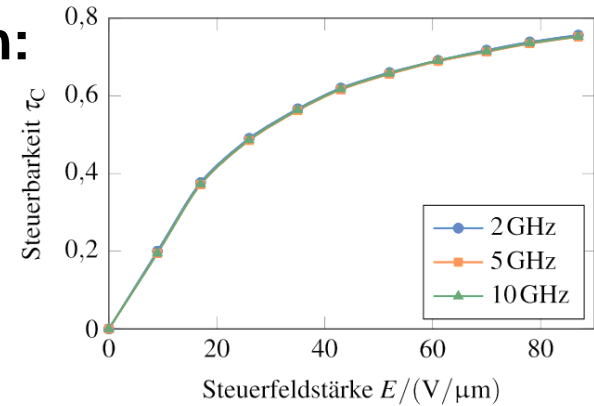
BST-ZnO-B₂O₃-Dickschichten mittels Tintenstrahldruck

- Mikrostruktur



Sinterbedingungen:
1h @ 850°C

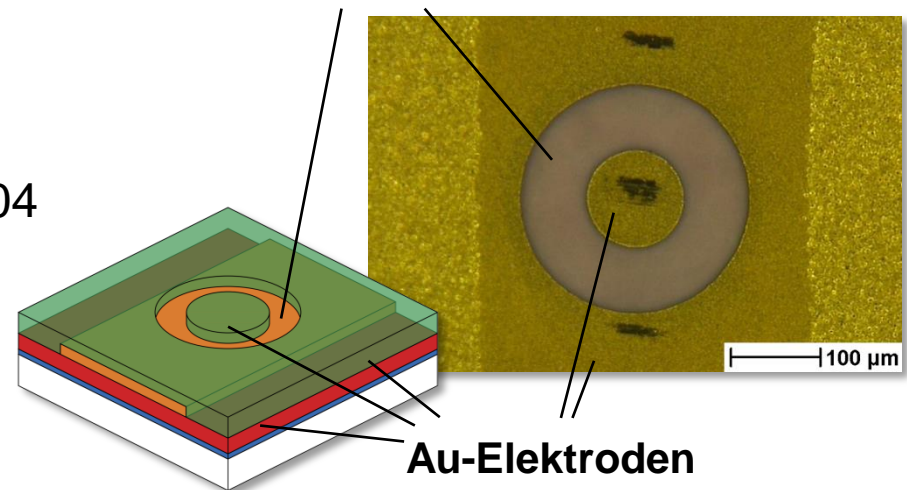
Korngröße:
 $d_{50} = 0,14 \mu\text{m}$



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

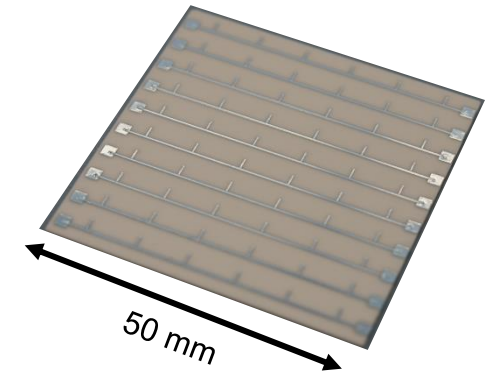
- Relative Permittivität: $\epsilon_r = 130$
- Verlustfaktor: $\tan \delta = 0,04$
- Steuerbarkeit: $\tau = 41 \%$
(@ 20 V/ μm)

BST-Dickschicht



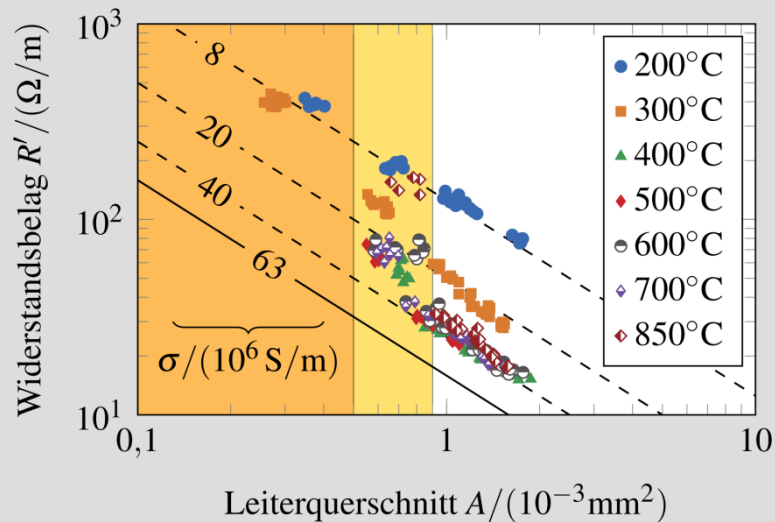
Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Leitfähigkeit der Elektroden

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



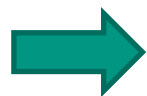
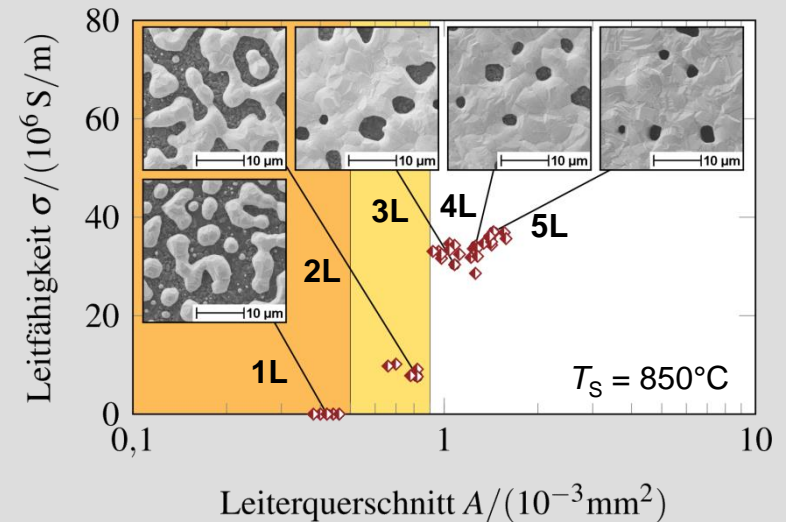
Widerstandsbelag

$$R' = R / l$$



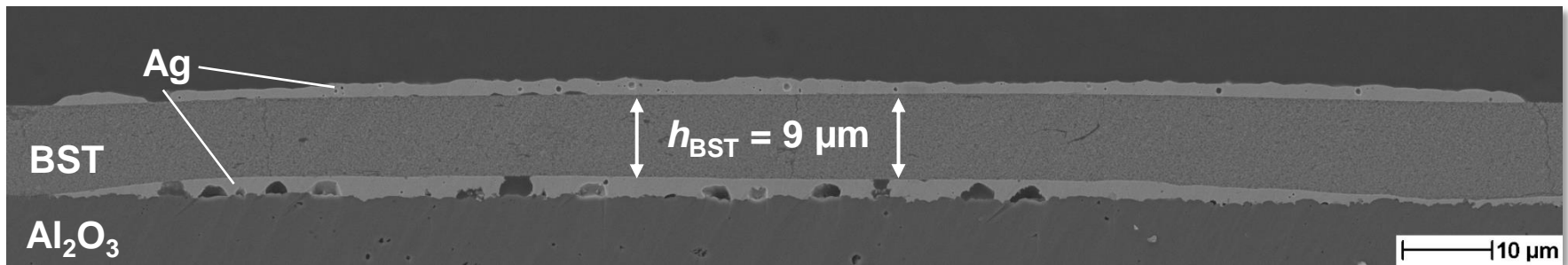
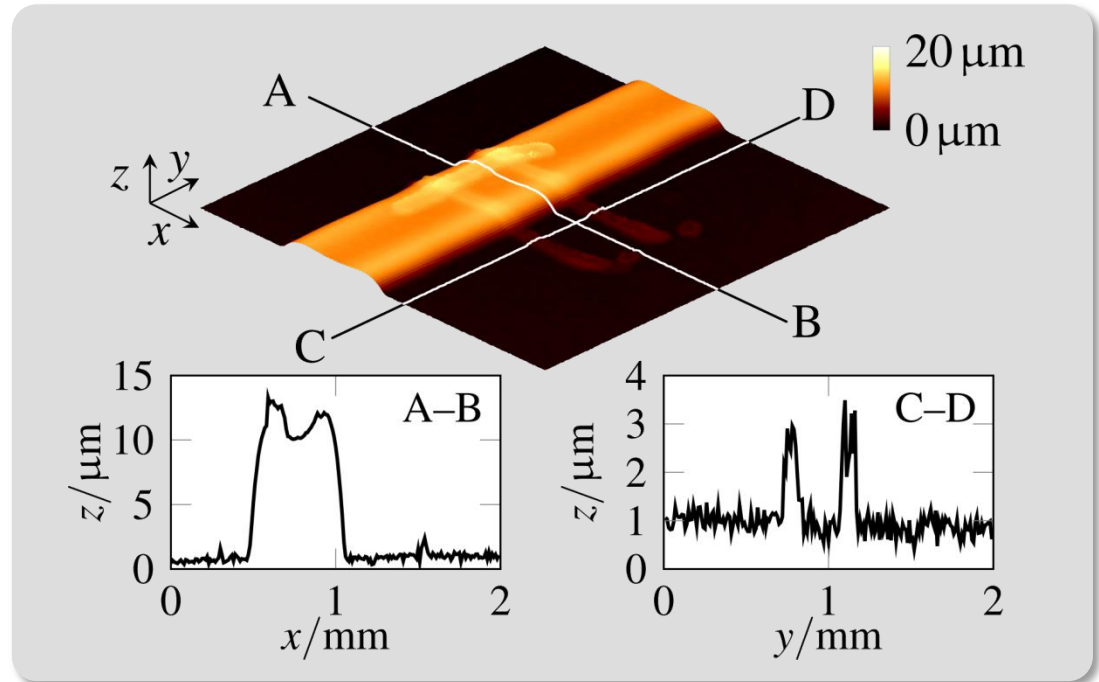
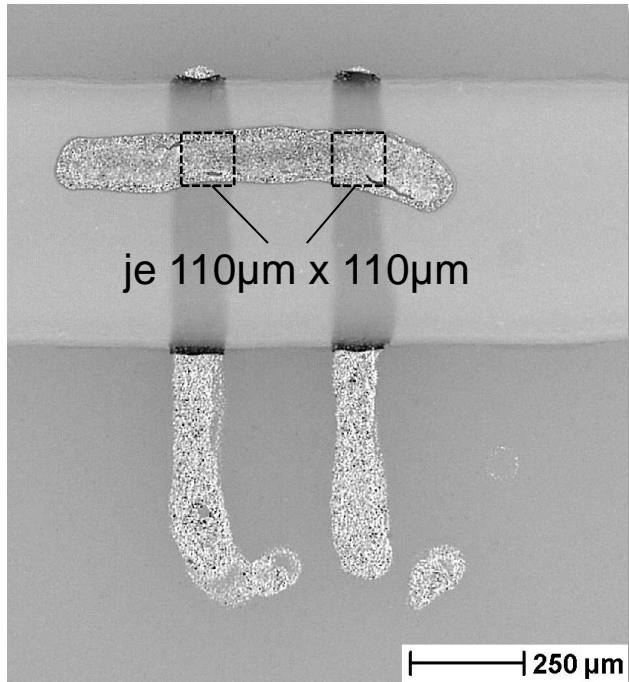
Leitfähigkeit

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

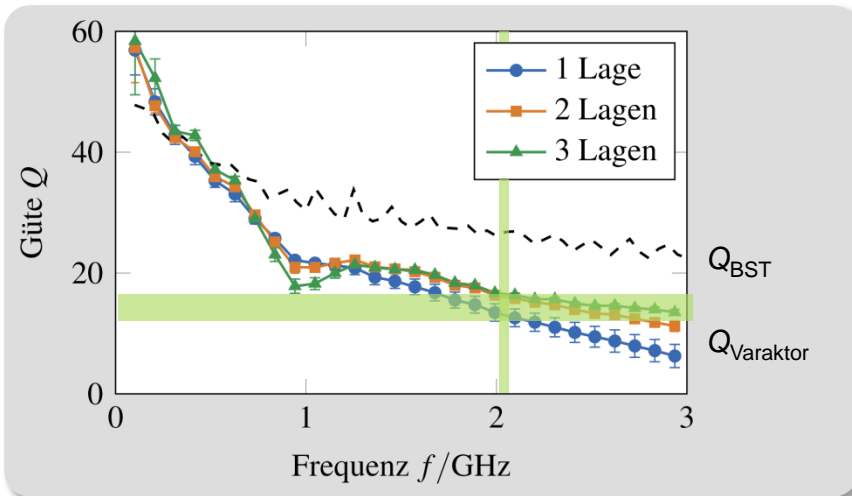
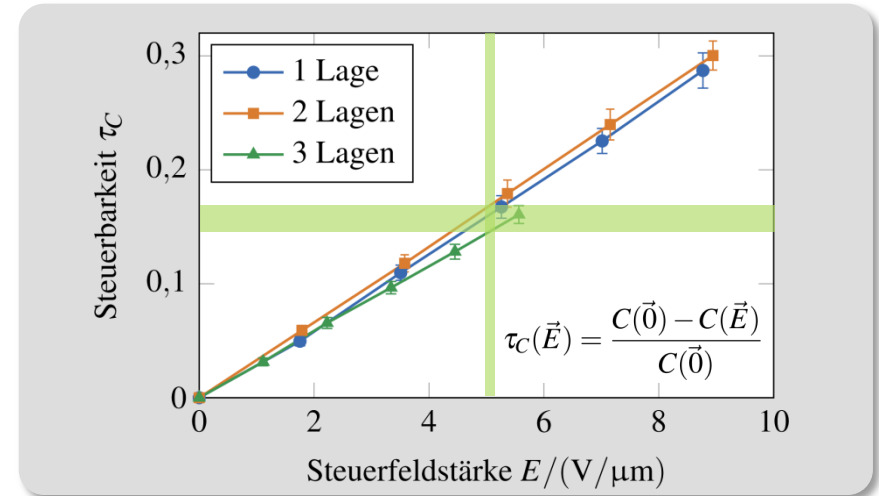
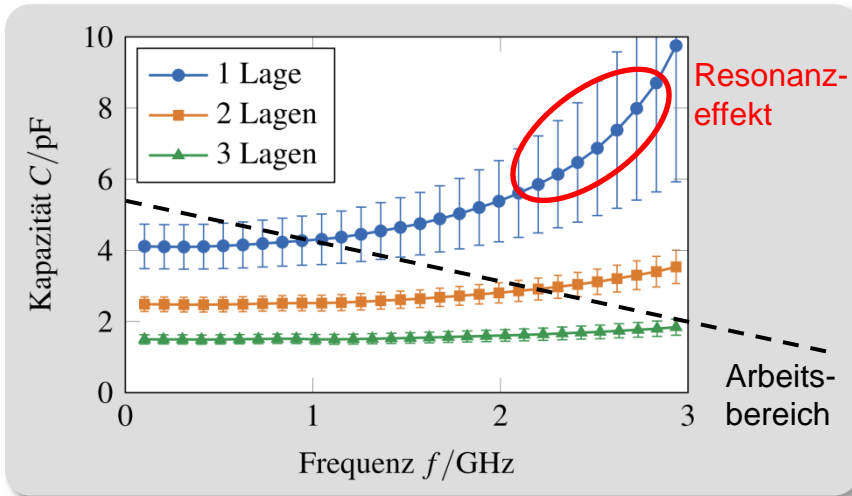


3 Lagen bzw. $h_{\text{Ag}} \approx 2 \mu\text{m}$ notwendig für eine gute Leitfähigkeit

Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Schichttopografie



Vollständig gedruckte MIM-Varaktoren: Eigenschaften

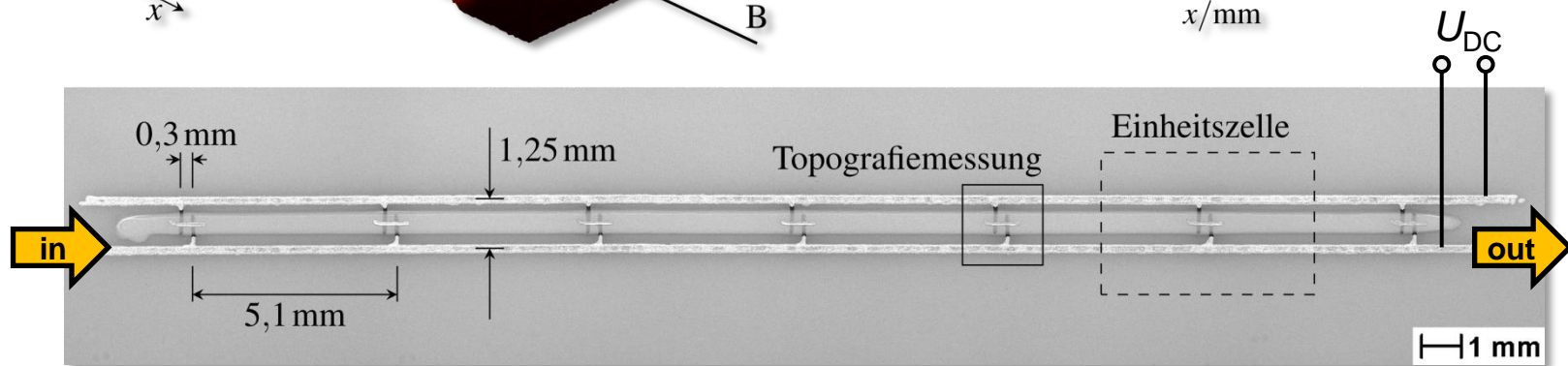
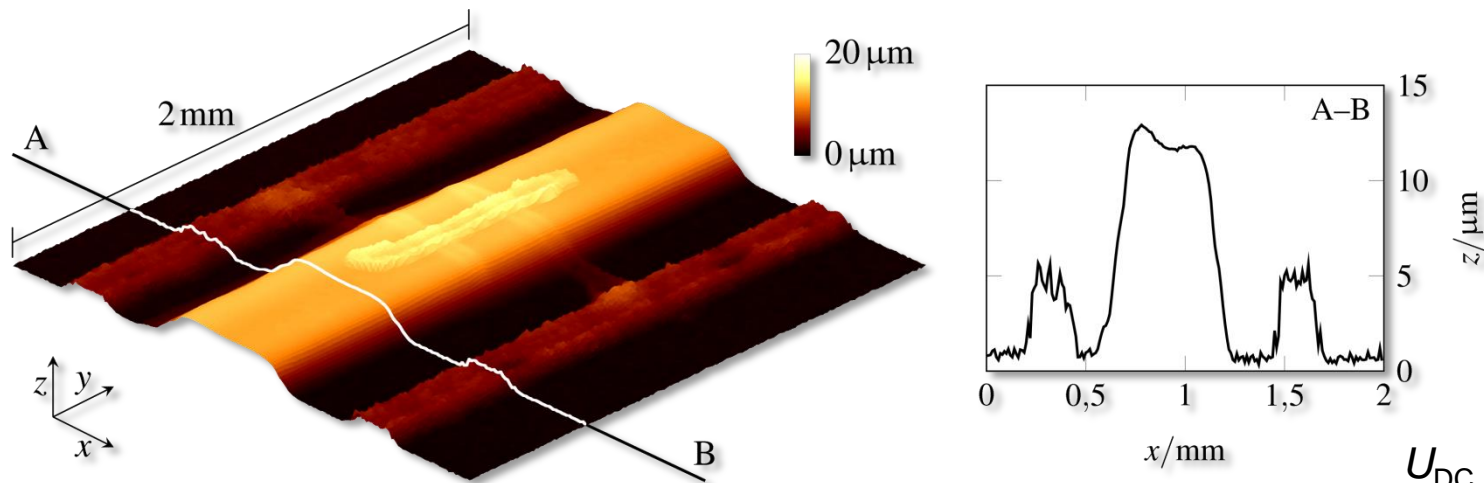


Eigenschaften:

- 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)

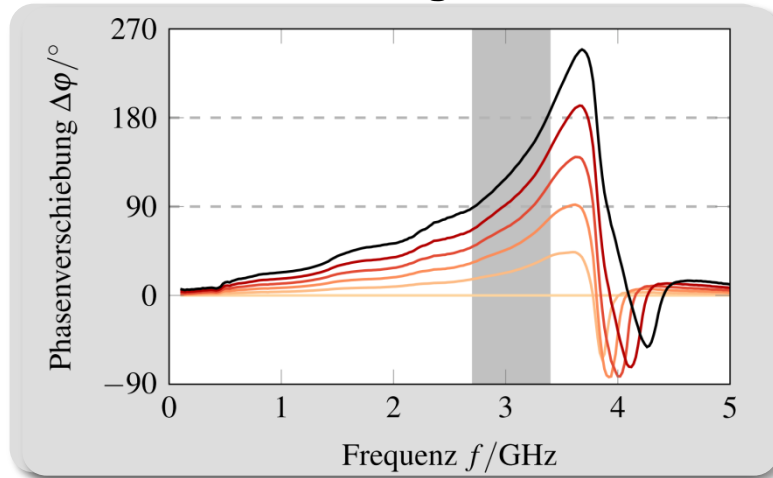
Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Aufbau und Topografie

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

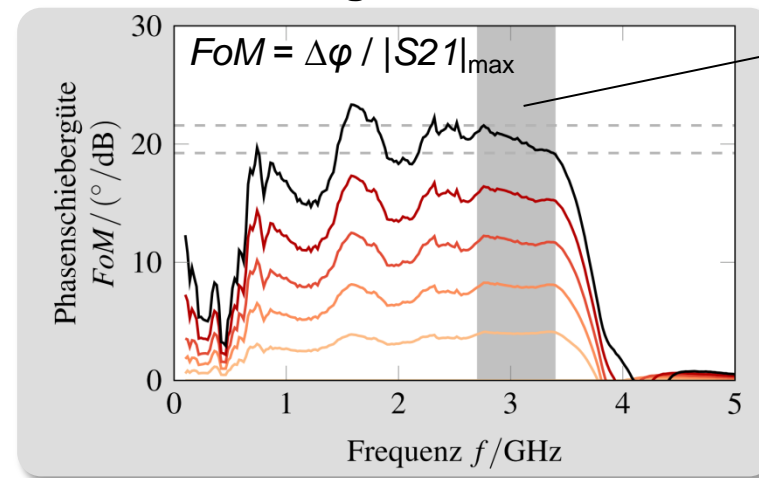


Vollständig gedruckter S-Band-Phasenschieber: Eigenschaften und Einordnung Literatur

Phasenverschiebung



Phasenschiebergüte



Arbeitsbereich

Vollständig gedruckte L-/S-Band-Phasenschieber

Quelle	Methode	Dielektrikum	Elektroden	Varaktortyp	Sintertemperatur (°C)	f (GHz)	$\Delta\phi_{\max}$ (°)	FoM (°/dB)	V_{\max} (V)
Hu (2005)	Siebdruck	BST-MgO	Ag	Koplanar	1300	2,5	49	20	100
Hu (2006)	Siebdruck	BST-MgO	Ag, Pt	MIM	1260	2,5	63	21	100
Palukuru	Siebdruck	BST-Li ₂ O	Ag	MIM	900 (cofired)	3	20	15	200
Kohler	Siebdruck	BST-ZnO-B ₂ O ₃	Ag	MIM	850 (cofired)	1,75	158	70	200
Friederich	Ink-Jet	BST-ZnO-B ₂ O ₃	Ag	MIM	850 (cofired)	3,4	180	19,1	200

Zusammenfassung

- **Varaktorenarten – Vorteile des MIM-Aufbaus gegenüber planarem Aufbau**
- **Materialentwicklung BST-ZnO-B₂O₃-Komposite**
 - Herabsetzung der Sinteremperatur
 - Wahrung der dielektrischen Eigenschaften
 - Herstellung vollständig-siebgedruckter MIM-Varaktoren und Phasenschiebern
- **Transfer auf Tintenstrahldruck**
 - Prozessentwicklung
 - Optimierung Tintenzusammensetzung
 - Herstellung vollständig gedruckter Bauteile

Ausblick

- Siebdruck LTCC
- Ink-Jet-Printing Flexible Elektronik