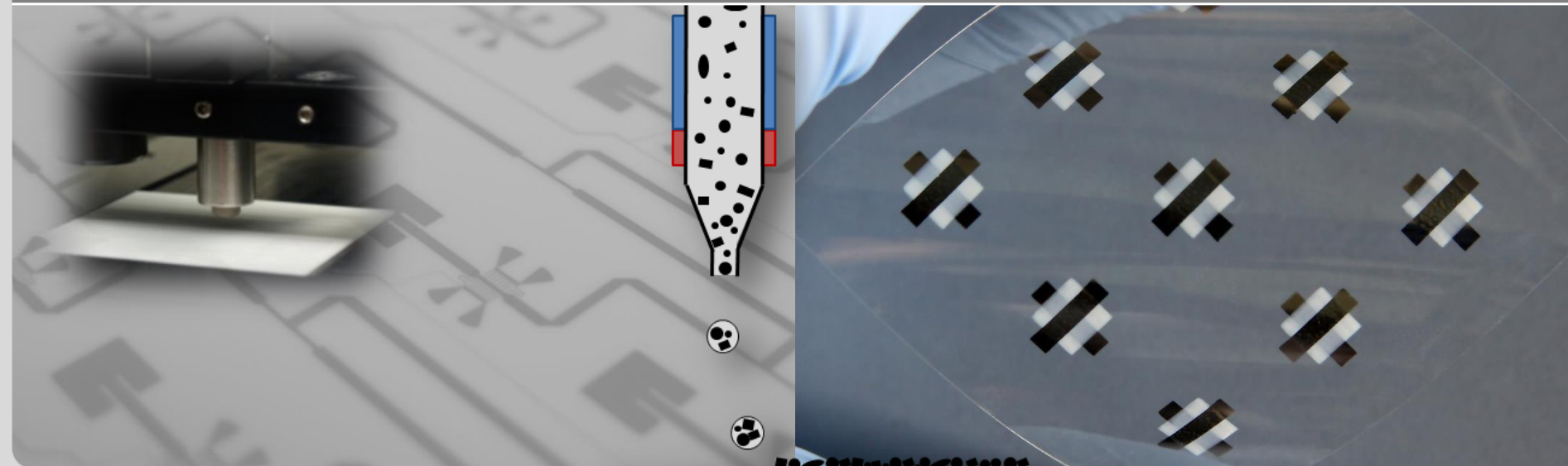


Herstellung von Keramik/Polymer Komposit-Dickschichten mittels Tintenstrahldruck

M. Mikolajek, J. R. Binder

Institut für Angewandte Materialien – Keramische Werkstoffe und Technologien

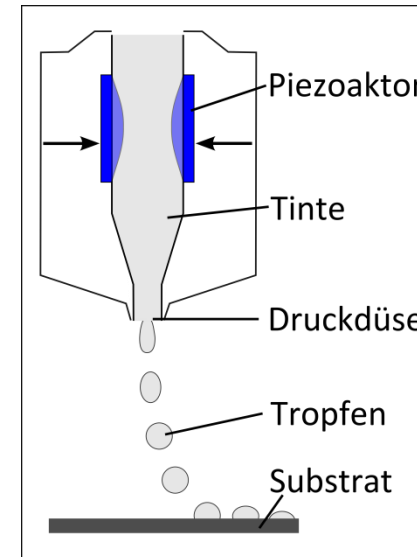


Der Tintenstrahldruck

Digitales Druckverfahren mit Ursprung im Grafikdruck

Merkmale	DoD-Tintenstrahldruck
Strukturierung	2D, 3D
Maske	keine
Auflösung	> 50 μm
Schichtdicke	0,1-10 μm
Geschwindigkeit	< 5 m/s
Materialien	Multikomponentendruck
Substrat	beliebig

Piezoelektrischer Drop-on-Demand (DoD) Tintenstrahldruck



ABER: Hohe Anforderungen an die verwendeten Tinten

- 1) Partikelgröße und Tintenstabilität
- 2) Fluidmechanische Eigenschaften
- 3) Trocknungsverhalten

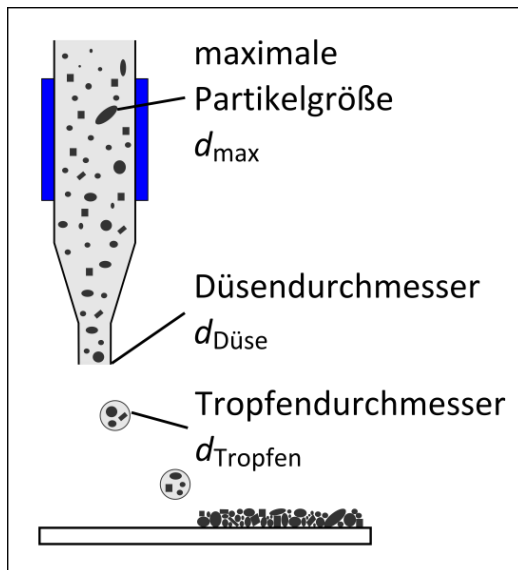
Anforderungen des Tintenstrahldrucks

Partikelgröße

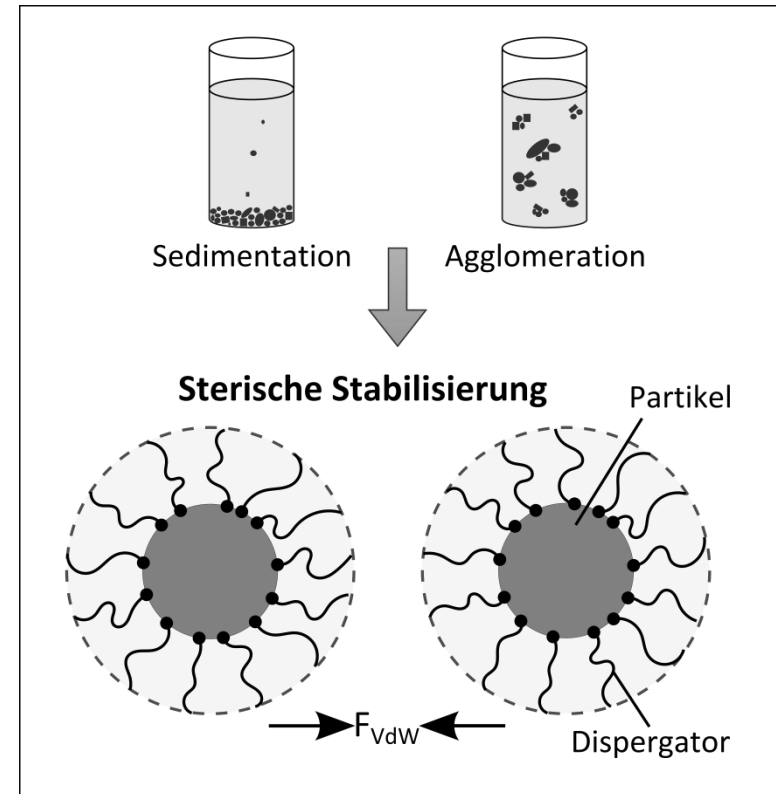
Düsendurchmesser üblicherweise 10-100 μm

Faustregel: $d_{100} \approx 0,01-0,05 \cdot d_{\text{Düse}}$

→ Partikelzerkleinerung oder Größenausschluss notwendig



Tintenstabilität



Grundvoraussetzungen für die Druckbarkeit einer Dispersion

Anforderungen Tintenstrahldruck

Fluidmechanische Eigenschaften

- Dichte ρ
- Viskosität η
- Oberflächenspannung σ

Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{v\rho a}{\eta} \quad \rightarrow \text{„Strömungsverhalten“}$$

Weber-Zahl:

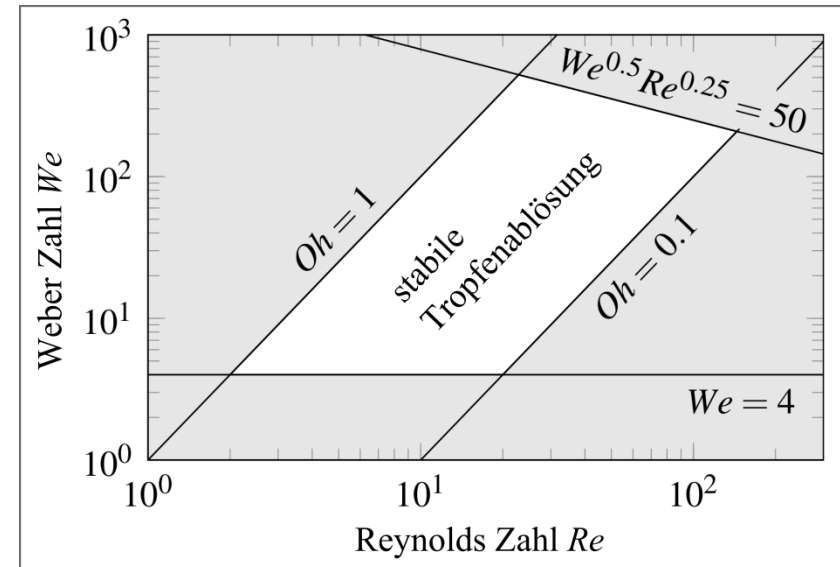
$$We = \frac{v^2\rho a}{\sigma} \quad \rightarrow \text{„Zerstäubungsverhalten“}$$

Ohnesorge-Zahl:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad \rightarrow \text{„Aussage zur Tropfenablösung“}$$

Tropfengeschwindigkeit $v_{Tropfen} = 1-10 \text{ m/s}$

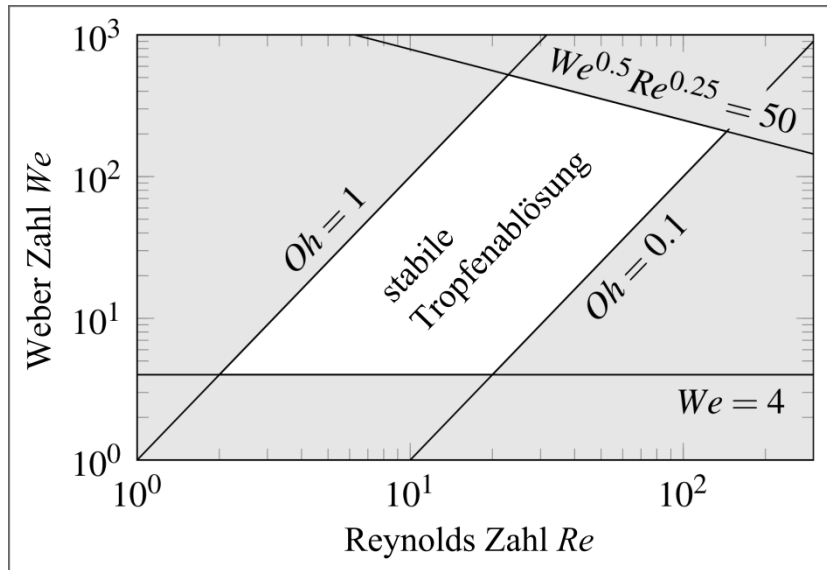
Düsendurchmesser $d_{Düse} = 10-100 \mu\text{m}$



Anforderungen Tintenstrahldruck

$We^{0,5}Re^{0,25} \geq 50$: E_{kin} zu groß
 → Spritzen bei Auftreffen

$Oh > 1$:
 Tinte zu hochviskos





$Oh < 0,1$:
 Tinte zu niedrigviskos



$We \leq 4$: F zum Überwinden von σ nicht ausreichend

$0,1 \leq \sqrt{\frac{Oh}{We}} \leq 1$
 $Oh = \frac{\sigma}{\rho v^2 l}$



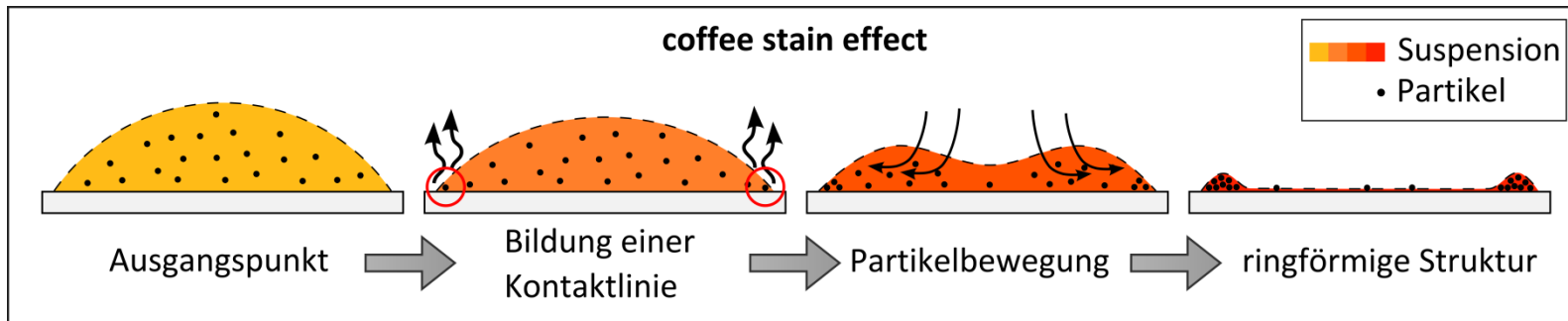
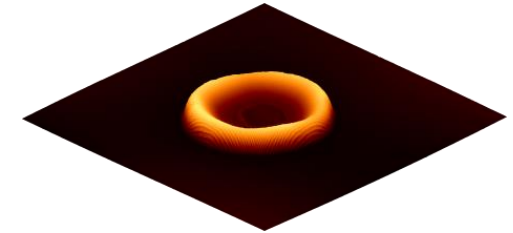
100 μ s 200 μ s 300 μ s 400 μ s 500 μ s

Anforderungen des Tintenstrahldrucks

Trocknungsverhalten: Coffee Stain Effect

3 Voraussetzungen:

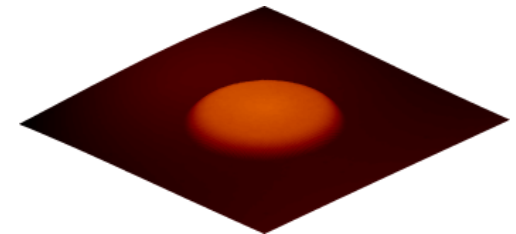
1. Kontaktwinkel > 0
2. Kontaktlinie wird festgehalten
3. Trocknung durch Verdampfung



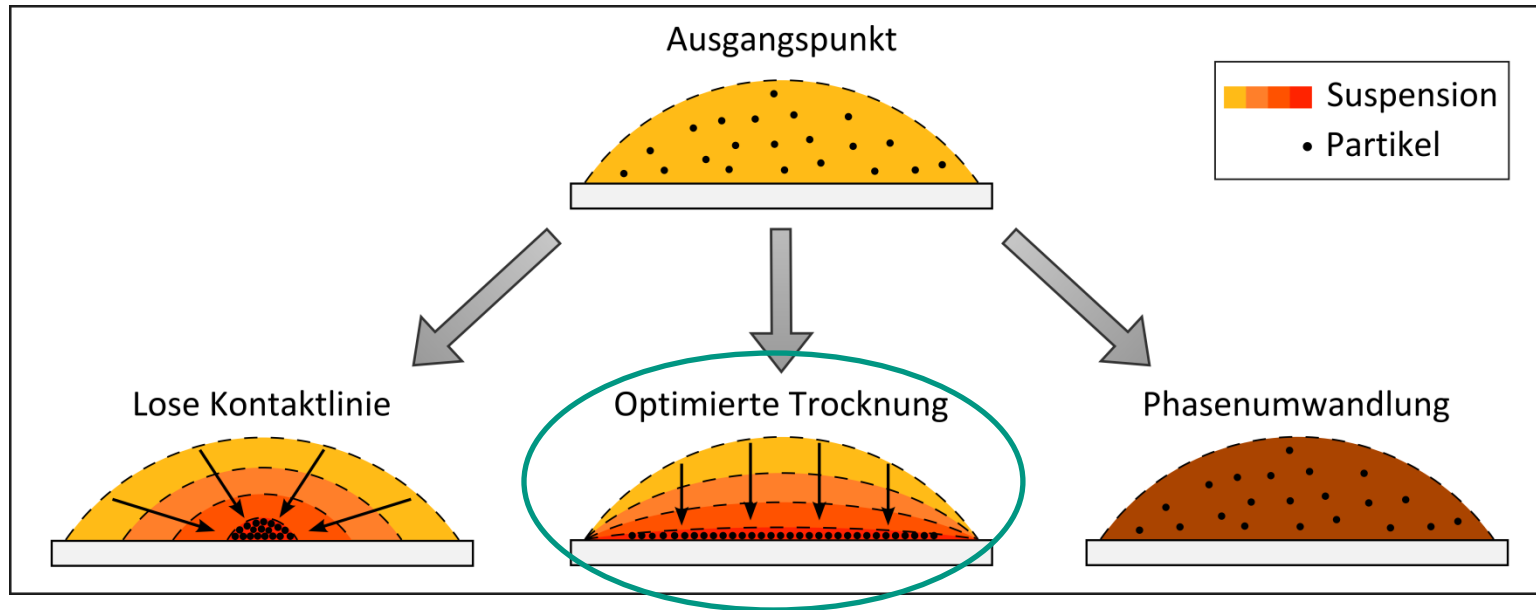
Ziel: Homogene Topografie speziell für Multilagendruck

Partikuläre Systeme zeigen jedoch häufig CSE

→ Tintenentwicklung zur Optimierung des Trocknungsverhaltens



Lösungsansätze: Coffee Stain Effect



- Erzeugung einer Strömung von Außen nach Innen durch Lösemittelgemische
→ Marangoni-Effekt
- ➔ • Eigener Ansatz: Schnelle Viskositätserhöhung auf Substrat soll Partikelbewegung unterdrücken

Motivation

Basis:

Tintenstrahldruck keramischer Dielektrika

Optimierung der Trocknung keramischer Tinten

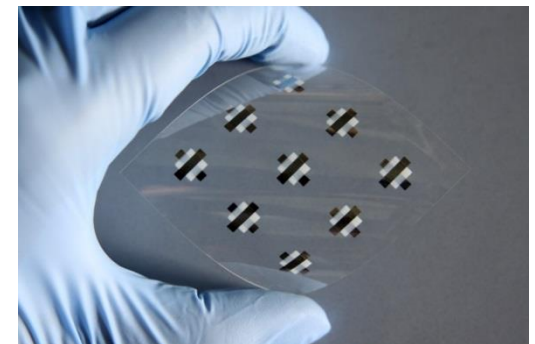
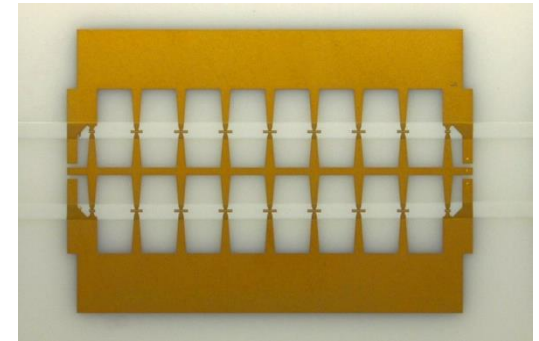
Idee:

Herstellung kompositer Dickschichten für flexible Substrate

- Tintenstrahldruck als flexibles Fertigungsverfahren
- Erhöhte Permittivität durch Keramik
- Verbesserung der mechanischen Stabilität durch Polymer
- Wegfall der Hochtemperaturbehandlung

Bauteile:

Metal-Insulator-Metal (MIM) Kondensatoren

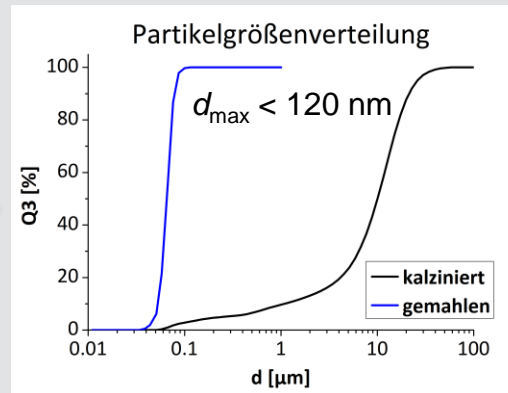


Tintenentwicklung

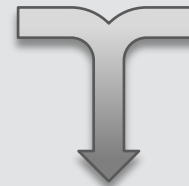
BST Dispersion



10 Vol.-% BST
in Butyldiglycol

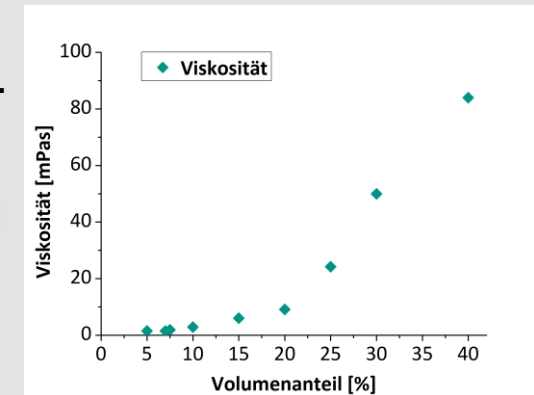


BST/PMMA-
Tinte



$0,1 \leq Oh \leq 0,4$

PMMA Lösung in Butanon



Variable Komposittinten durch Verwendung verschiedener Vorlösungen

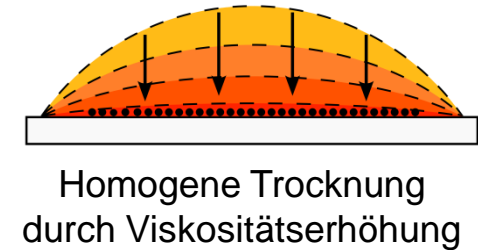
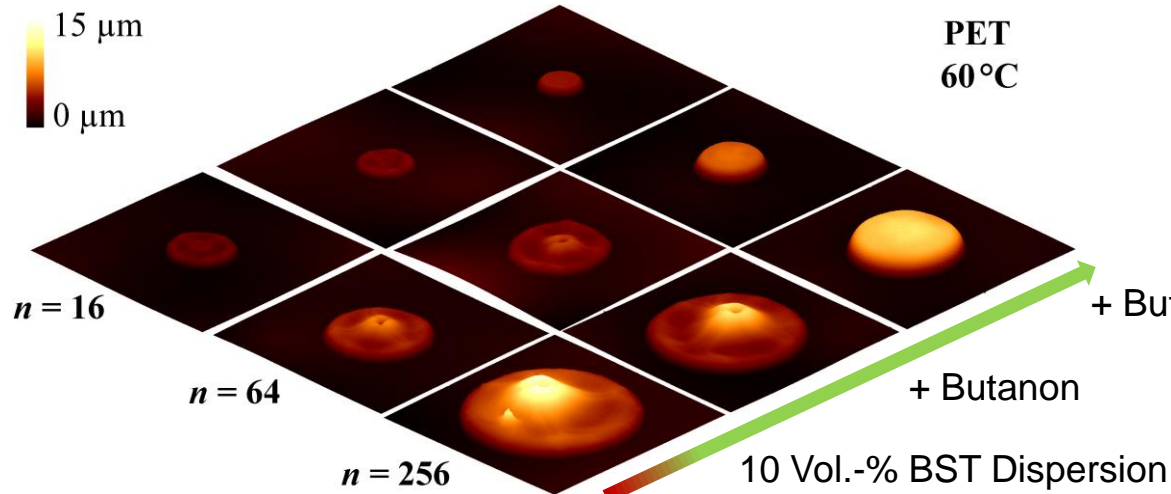
- BST/PMMA-Verhältnis
- Lösemittelzusammensetzung
- Feststoffgehalt



- 1) Partikelgröße und Tintenstabilität ✓
- 2) Fluidmechanische Eigenschaften ✓
- 3) Trocknungsverhalten

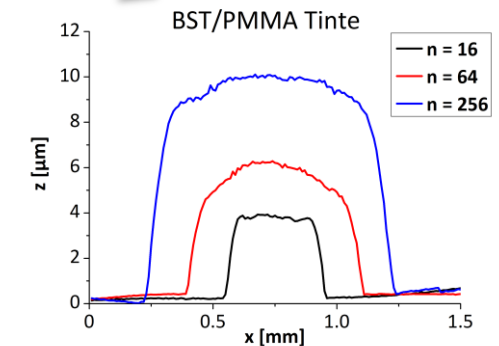
Tintenentwicklung

Ziel: Homogene Tropfenstruktur nach Trocknung



Einflussfaktoren:

- Trocknungstemperatur
- Lösemittelverhältnis von Butyldiglycol und Butanon
- Feststoffgehalt
- Kompositzusammensetzung
- Substrat / Kontaktwinkel θ

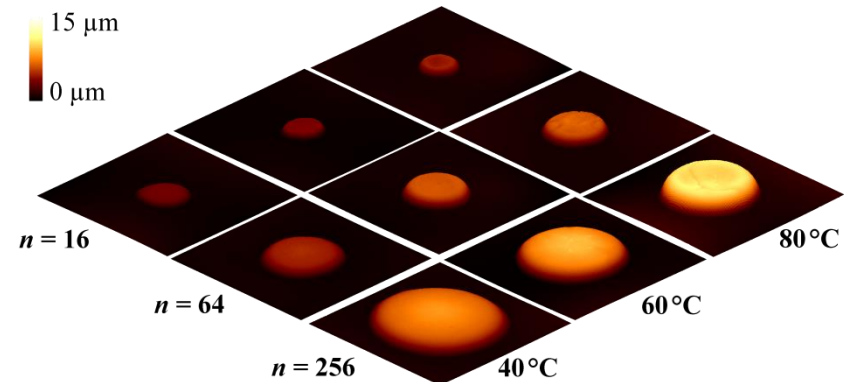
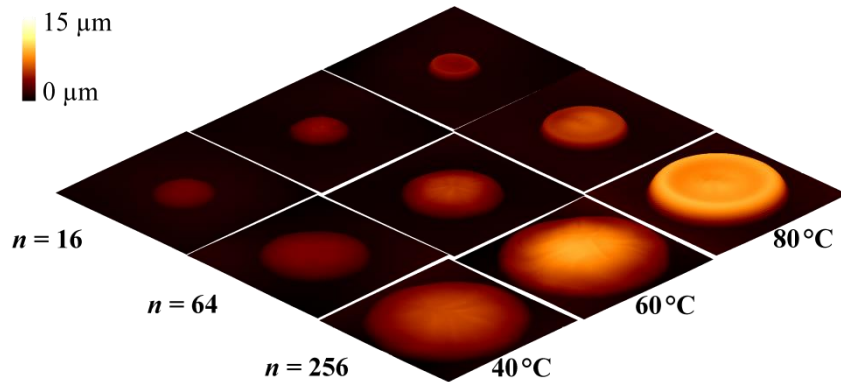


Sehr gute Schichttopografie!

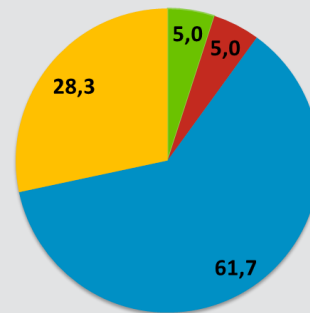
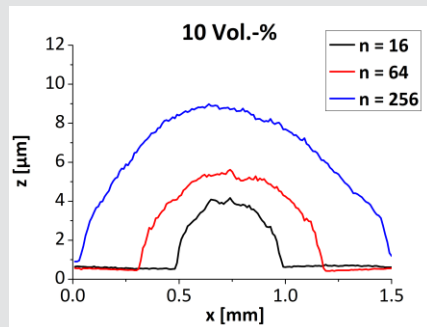
Trocknungsverhalten: Einflussfaktoren

Lösemittelverhältnis

Feststoffgehalt und Kompositzusammensetzung unverändert

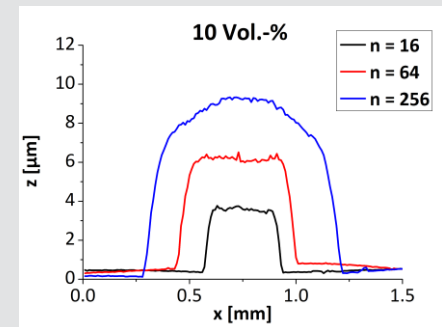
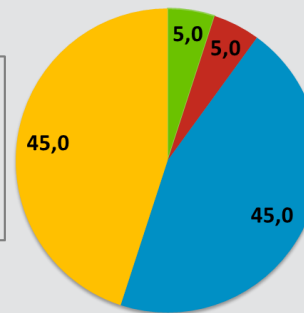


Höherer Butanonanteil in Tinte



- BST
- PMMA
- BDG
- Butanon

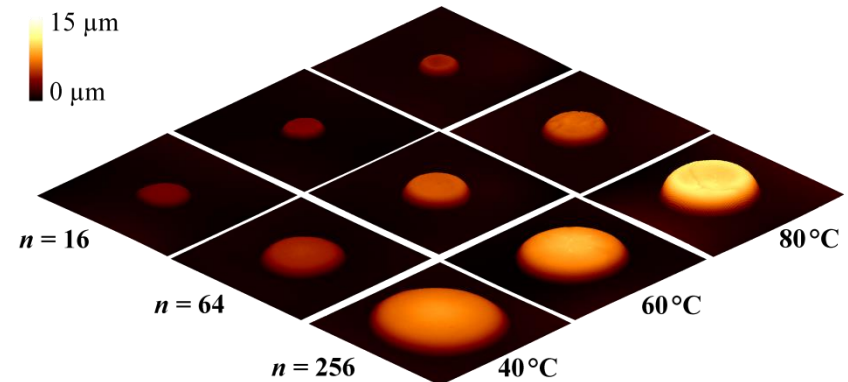
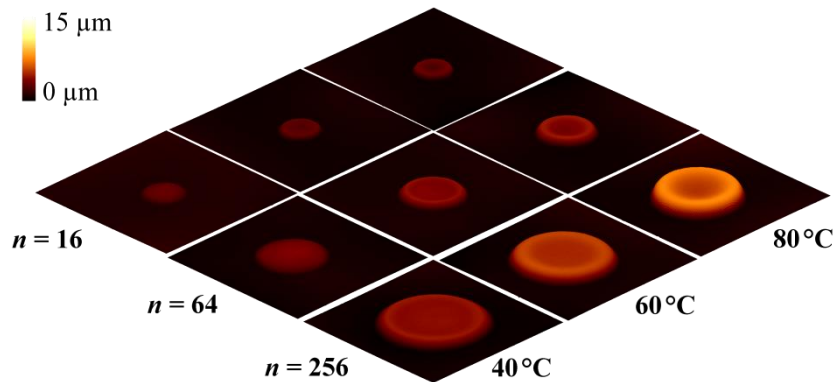
60°C



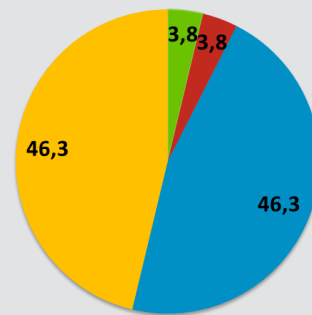
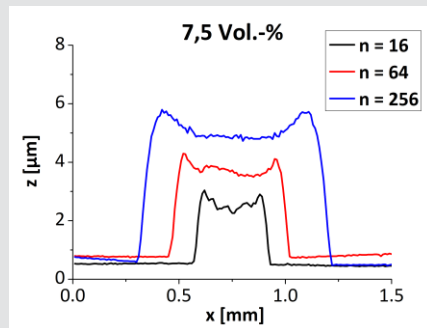
Trocknungsverhalten: Einflussfaktoren

Feststoffanteil

Lösemittel- und Kompositzusammensetzung unverändert

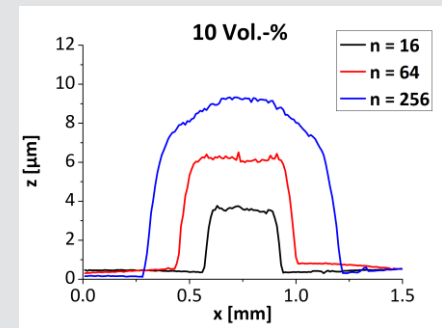
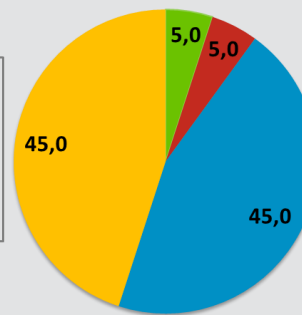


Höherer Feststoffgehalt in Tinte



- BST
- PMMA
- BDG
- Butanon

60°C



Tintenentwicklung

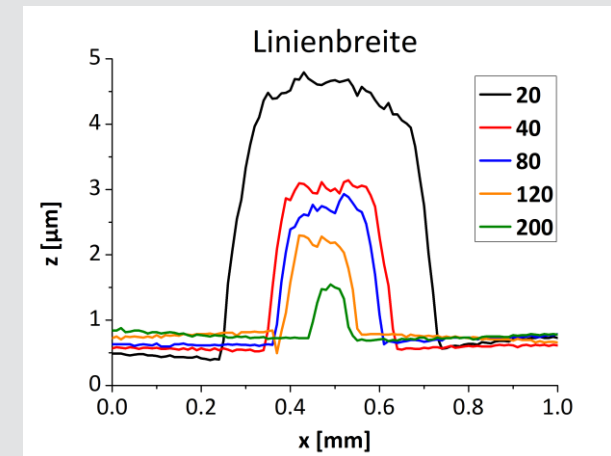
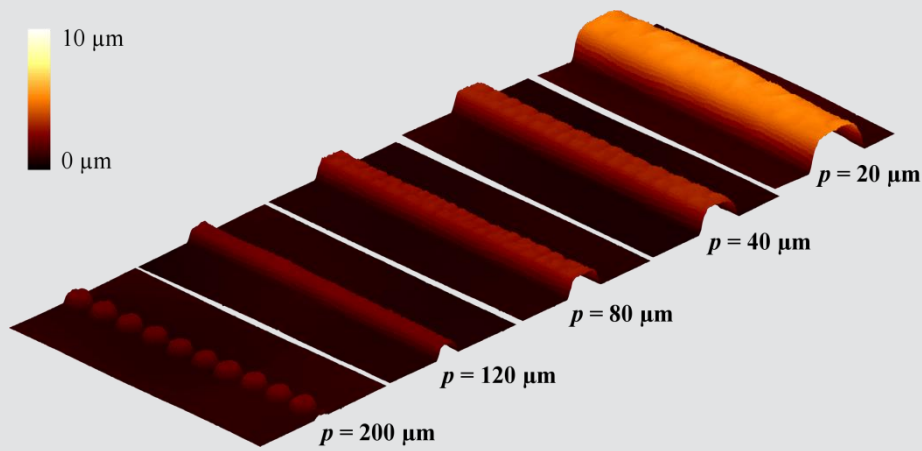
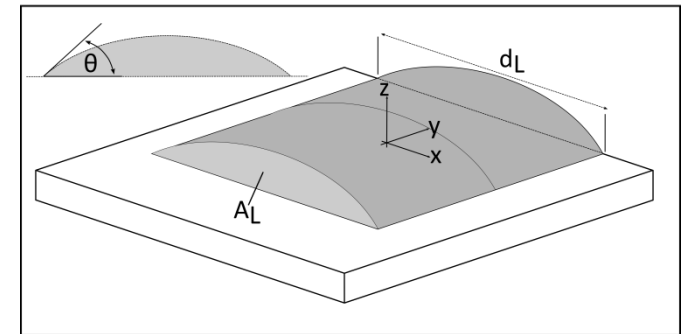
Linienbreite

Linie ist kleinste gedruckte Struktur

Strukturauflösung maßgeblich abhängig von

- Kontaktwinkel θ
- Düsendurchmesser \rightarrow Tropfengröße d_0
- Tropfenabstand p

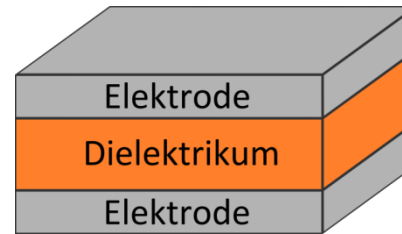
$$d_L = d_0 \sqrt{\frac{2\pi d_0}{3p (\theta / \sin^2 \theta - 1 / \tan \theta)}}$$



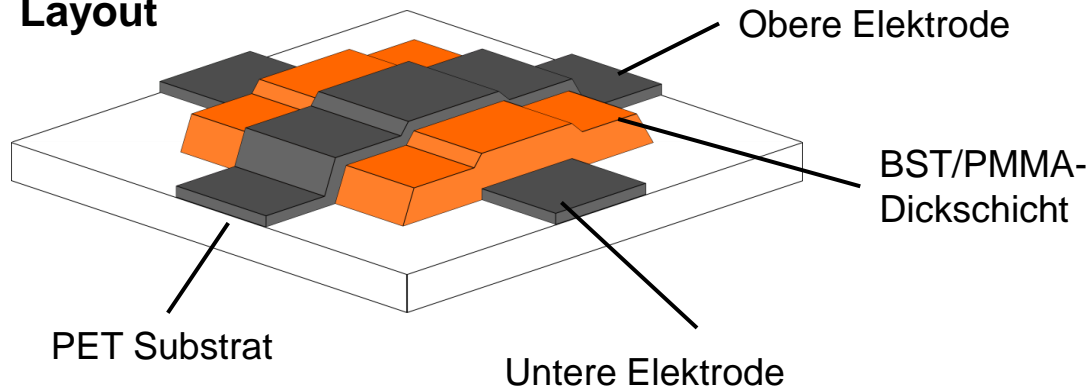
Herstellung gedruckter Bauteile

Plattenkondensator

- + schnelle und günstige Herstellung
- + flexibles Layout
- Multilagen-Druck

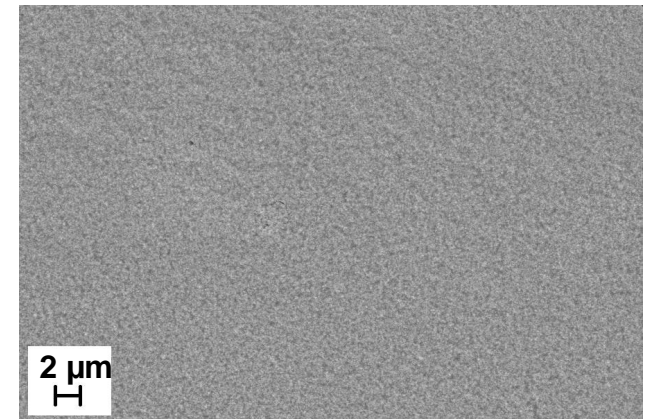


Layout

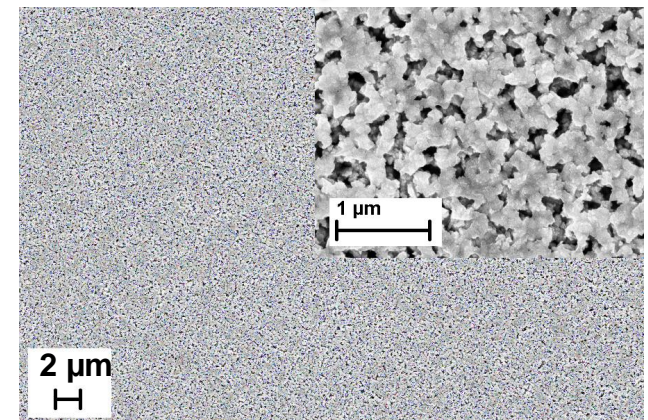


- Kommerzielle Silbertinte für Polymerfolien
→ 100 – 150°C Temperaturbehandlung

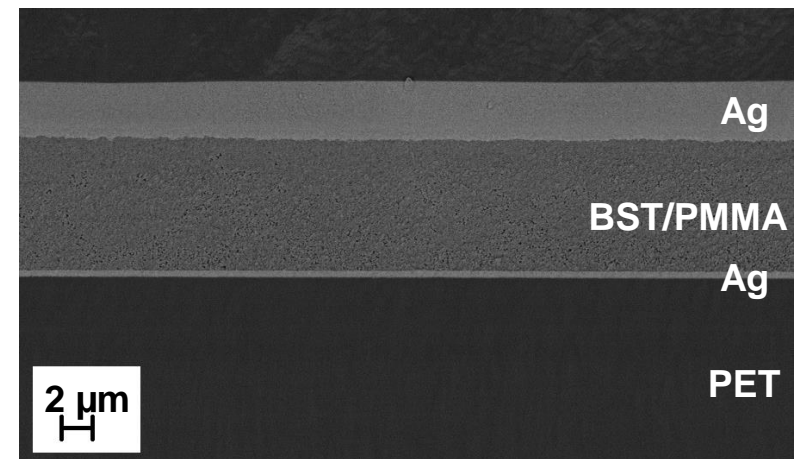
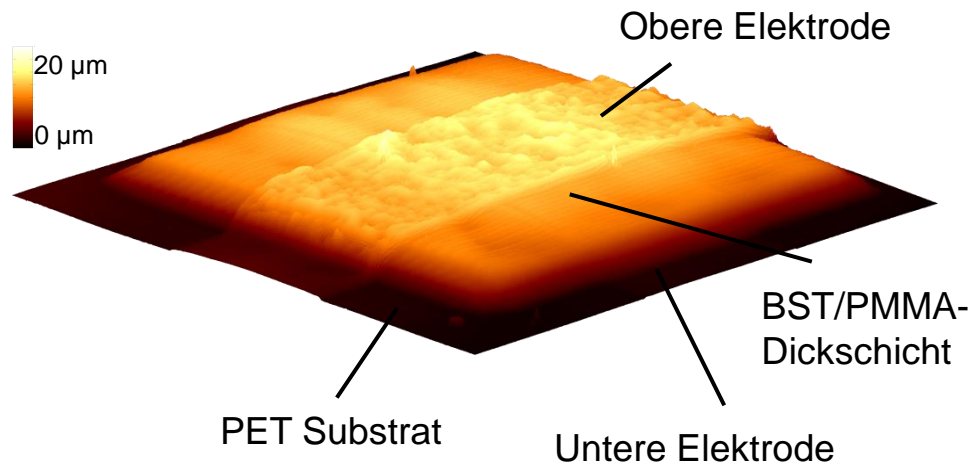
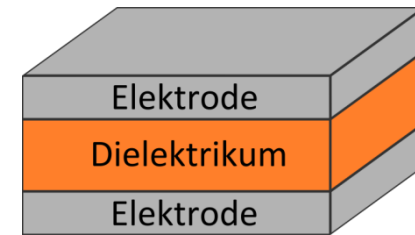
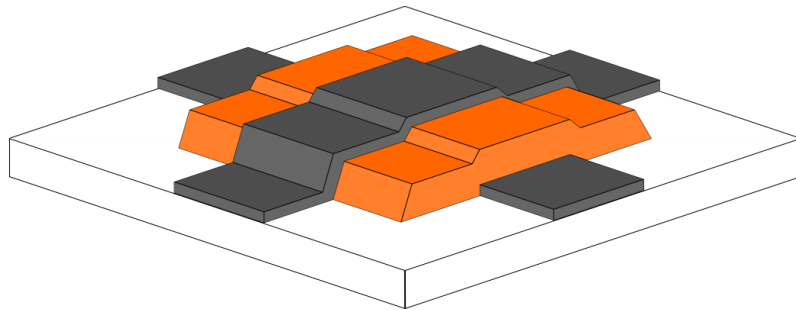
50:50 BST/PMMA



↓ 1h 120°C



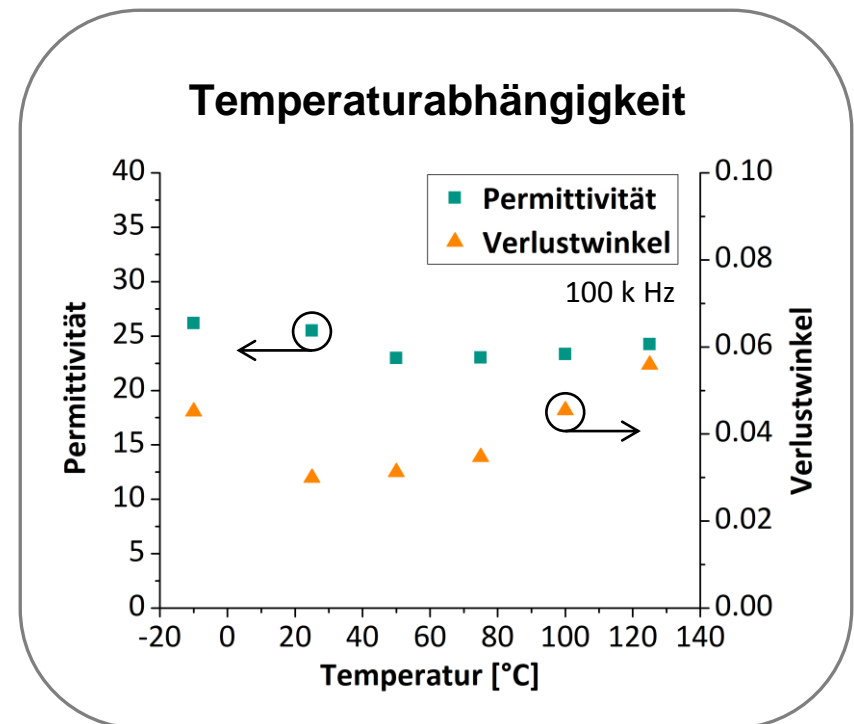
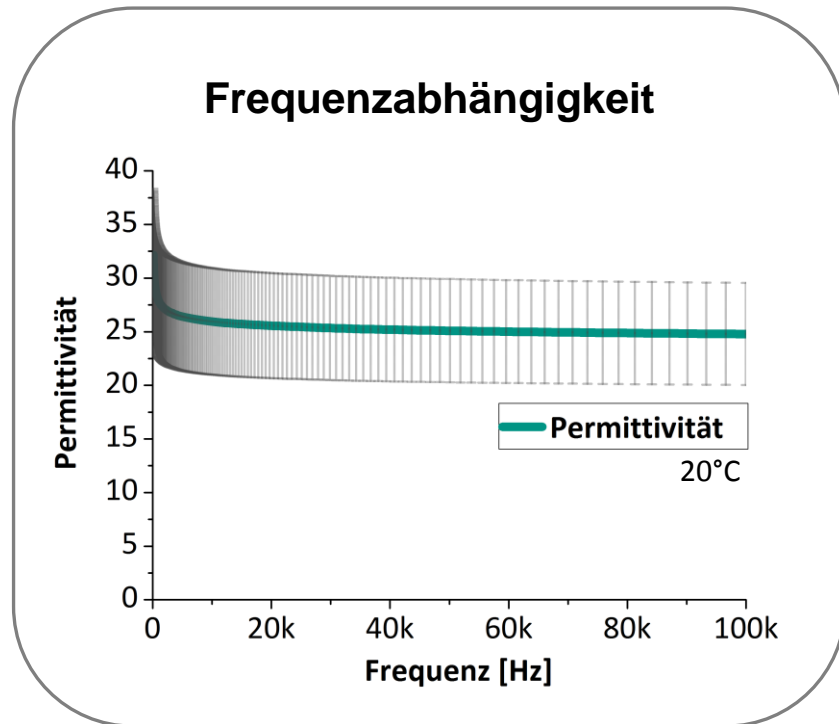
Herstellung gedruckter Bauteile



Dielektrische Charakterisierung

Impedanzspektroskopie

BST:PMMA 50:50

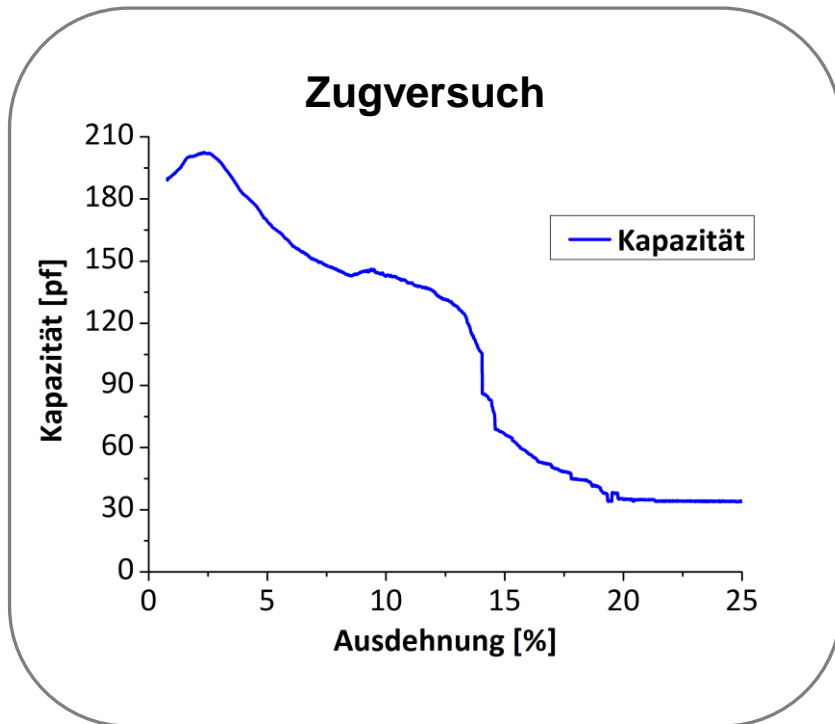
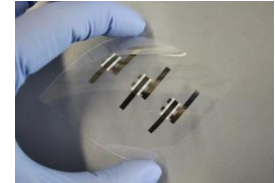


Permittivität PMMA $\epsilon_r \approx 3$

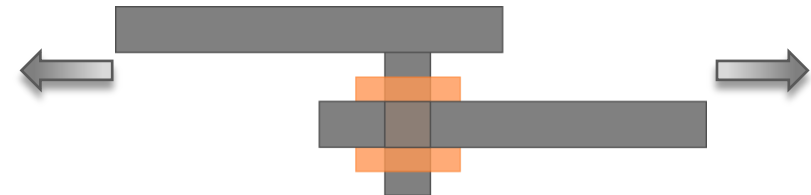
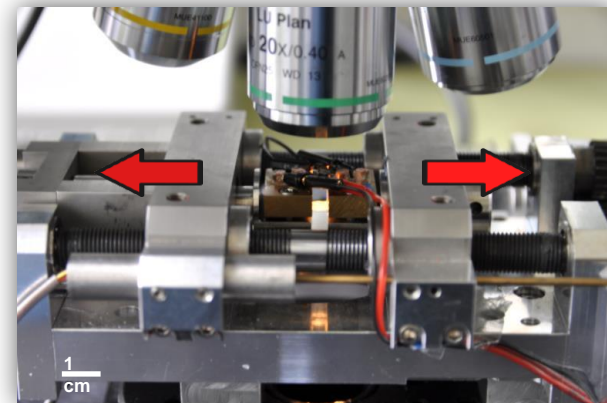
Mechanische Charakterisierung

Zugdehnungsversuche*

BST:PMMA 50:50



Belastbarkeit bis ca. 12 % Ausdehnung



*N. Mishra, P. Gruber, KIT, IAM-WBM

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Die erfolgreiche Entwicklung kompositer BST/PMMA-Tinten
- Untersuchung des Trocknungsverhaltens
- Optimierung der Tintenzusammensetzung für homogene Dickschichten
- Herstellung vollständig gedruckter MIM-Kondensatoren
- Charakterisierung der dielektrischen Eigenschaften tintenstrahlgedruckter BST/PMMA-Kompositschichten

Ausblick

- Erhöhung der Kapazität
 - Permittivität der keramischen Komponente
 - Dünnere dielektrische Schichten
- Verbesserung der mechanischen Zuverlässigkeit
 - Optimierung der polymeren Komponente

Vielen Dank.