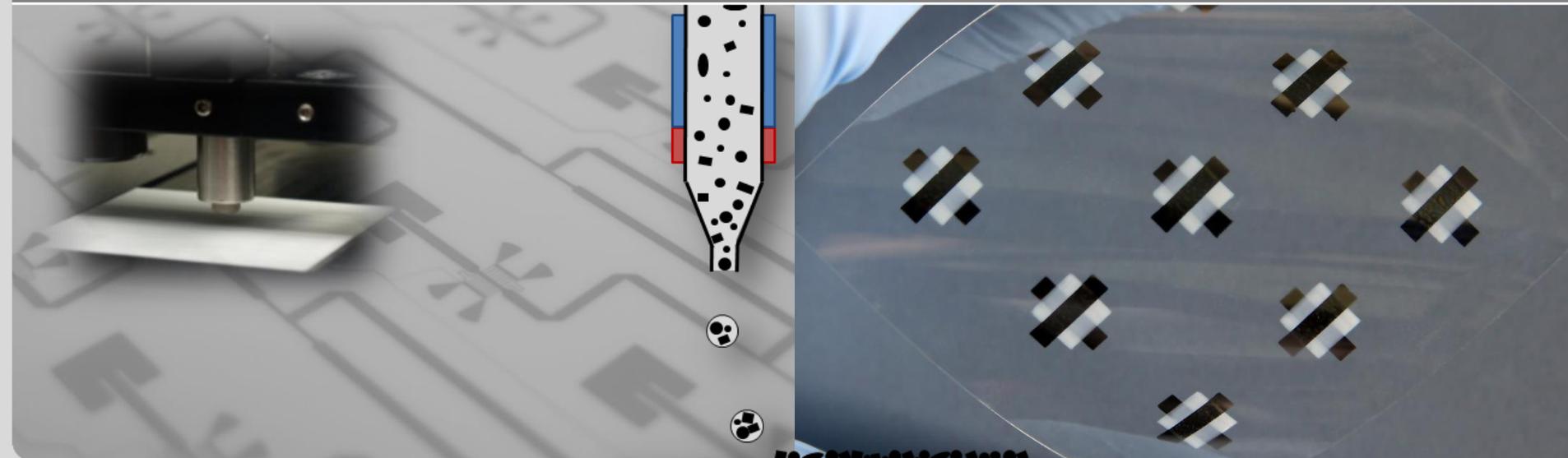


Anforderungen an keramische Suspensionen für den funktionalen Tintenstrahldruck

M. Mikolajek, A. Friederich, W. Bauer, J. R. Binder

Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffprozesstechnik

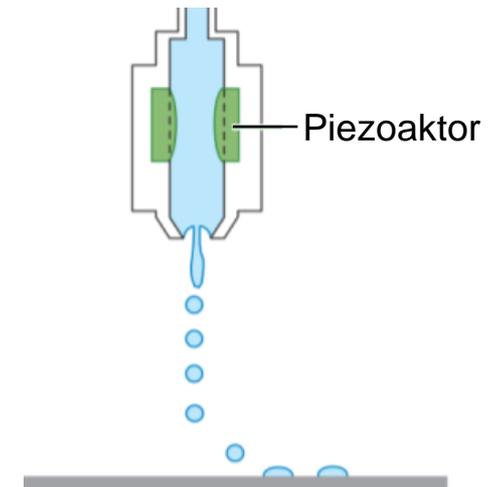


Der Tintenstrahldruck

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)
Fluidmechanischen
Eigenschaften

(3)
Trocknungsverhalten

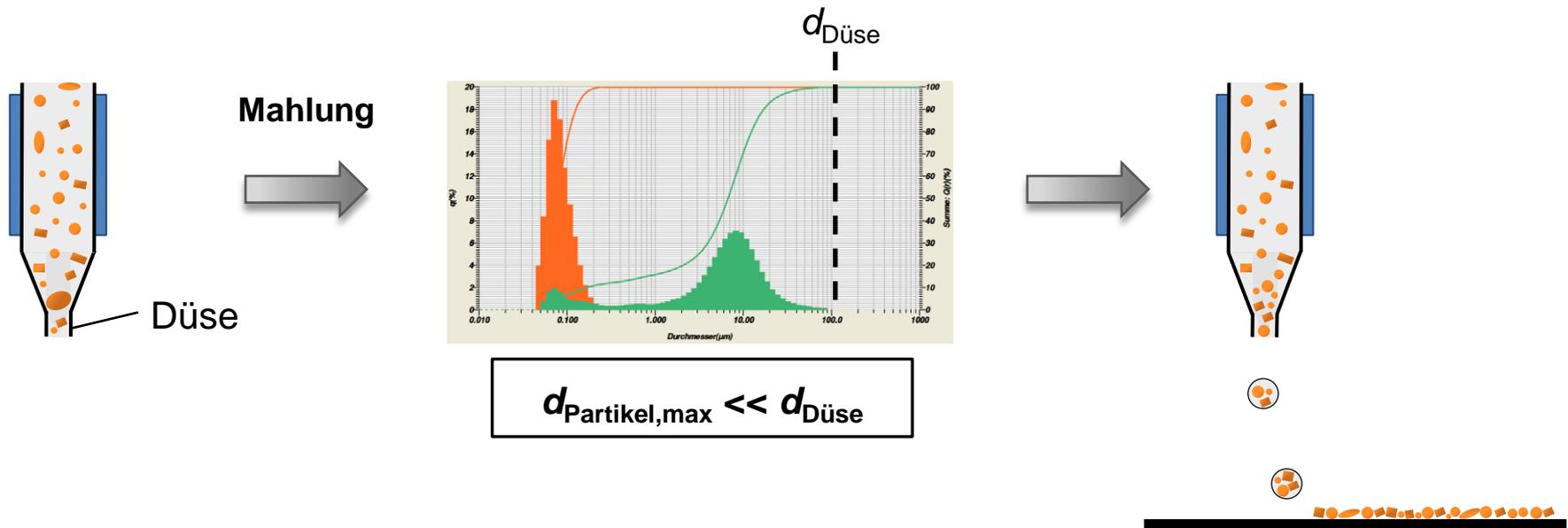
Partikelgröße und Tintenstabilität

Partikelgröße

Düsendurchmesser üblicherweise 10-100 μm

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

→ Partikelzerkleinerung oder Größenausschluss notwendig

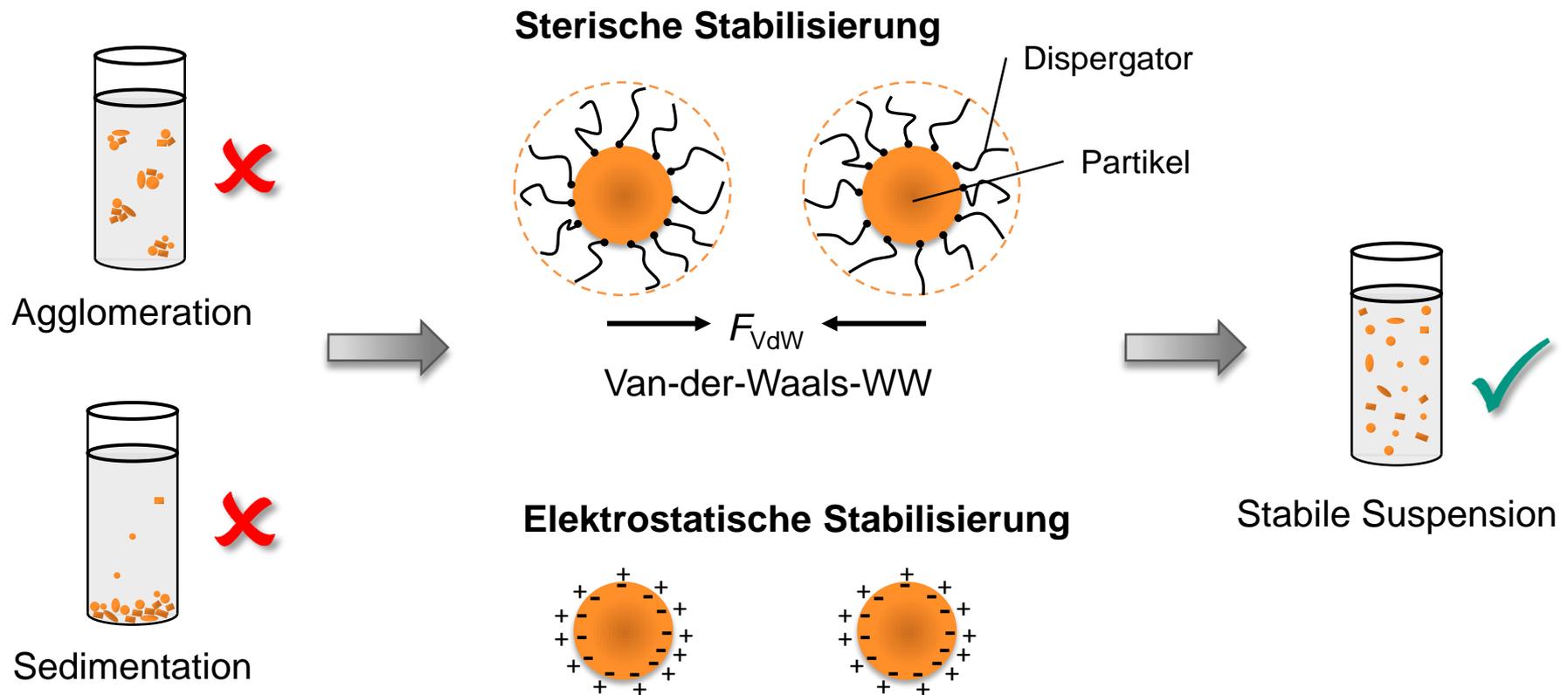


→ Partikelgröße beeinflusst zudem Stabilität und Fluidmechanik der Suspension

Partikelgröße und Tintenstabilität

Tintenstabilität

Keramische Suspensionen neigen zu Agglomeration und Sedimentation



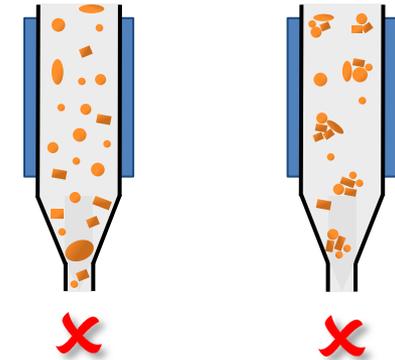
Partikelgröße und Tintenstabilität

Partikelgröße

- Synthese von Keramikpartikeln entsprechender Größe
- Mahlprozess zur gezielten Zerkleinerung der Partikel

Tintenstabilität

- Auswahl eines geeigneten Lösemittels
- Additive/Dispergatoren oftmals für Stabilität benötigt

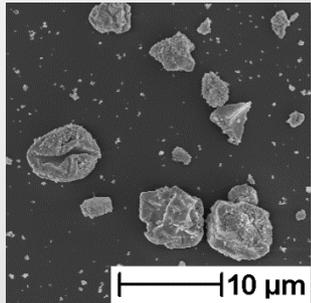


**Sorgfältige Auswahl der Tintenkomponenten
und Einstellung der Partikelgröße nötig**



Tintenentwicklung für $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ -Pulver

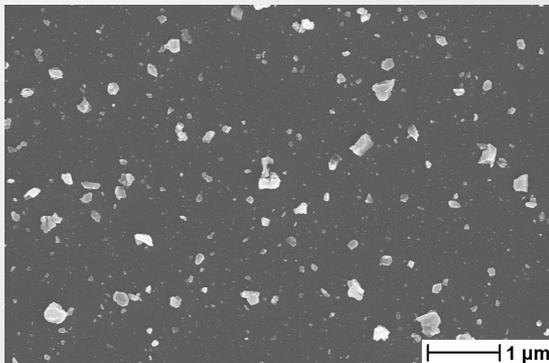
Kalziniertes BST-Pulver



Mahlen & Dispergieren

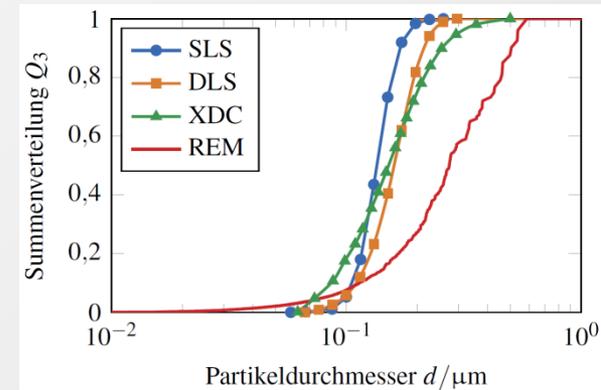


REM Aufnahme

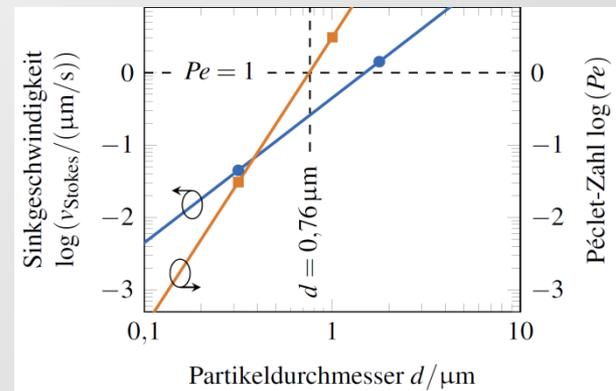


$d_{50} \approx 140 \text{ nm}$
 $d_{100} \approx 500 \text{ nm}$

Partikelgrößenverteilung



Stabilität der Suspension



*A. Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013)

Fluidmechanische Eigenschaften

Charakteristische Größen der Tinten

- Dichte ρ
- Viskosität η
- Oberflächenspannung σ

Wichtige dimensionslose Kennzahlen zur Beschreibung der Fluideigenschaften:

- **Reynolds-Zahl:** $Re = \frac{v\rho a}{\eta}$ → „Strömungsverhalten“
- **Weber-Zahl:** $We = \frac{v^2\rho a}{\sigma}$ → „Zerstäubungsverhalten“
- **Ohnesorge-Zahl:** $Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}$ → „Aussage zur Tropfenablösung“

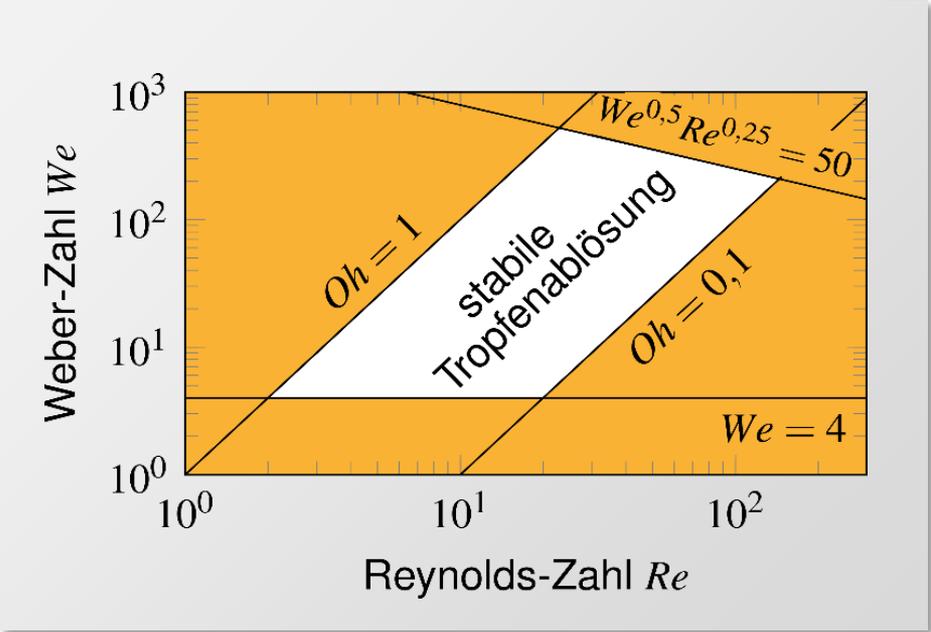
Tropfengeschwindigkeit $v_{Tropfen} = 1-10 \text{ m/s}$

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

Fluidmechanische Eigenschaften

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

$Oh > 1$:
 Tinte zu hochviskos



$Oh < 0,1$:
 Tinte zu niedrigviskos

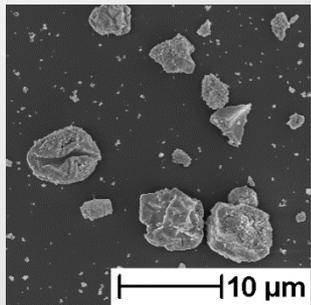
$We \leq 4$: F zum Überwinden von σ nicht ausreichend

$0,1 \leq Oh \leq 1$

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

Tintenentwicklung für (Ba,Sr)TiO₃-Pulver

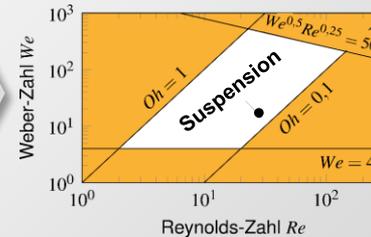
Kalziniertes BST-Pulver



Mahlen & Dispergieren



BST-Suspension



Druck



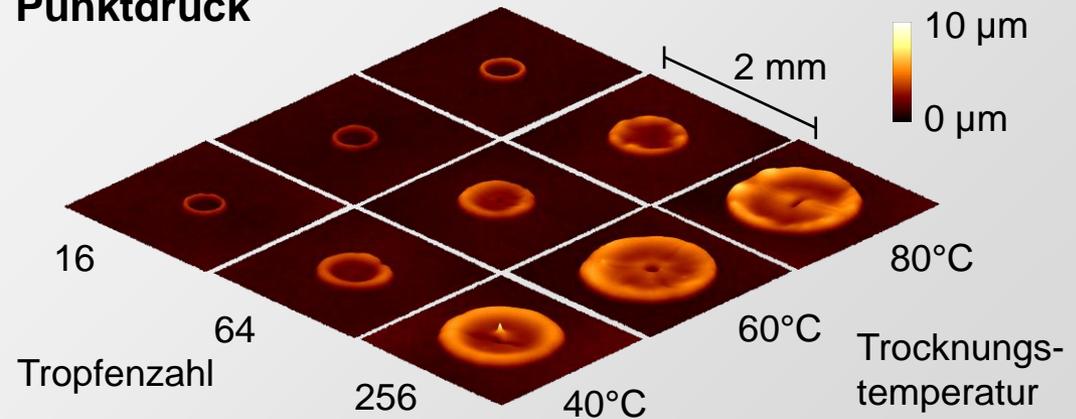
Suspension



$\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$
 $\eta = 8,4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
 $\sigma = 30 \text{ mN/m}$
 $Oh = 0,14$

➔ Druckbare Suspension

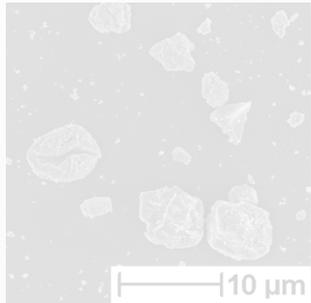
Punktdruck



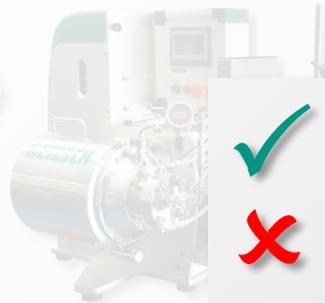
*A. Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013)

Tintenentwicklung für (Ba,Sr)TiO₃-Pulver

Kalziniertes
BST-Pulver



Mahlen &
Dispergieren



BST-Suspension



Druck



Druckbarkeit gegeben



Trocknungsverhalten nicht optimiert

Suspension



$$\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$$

$$\eta = 8,4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

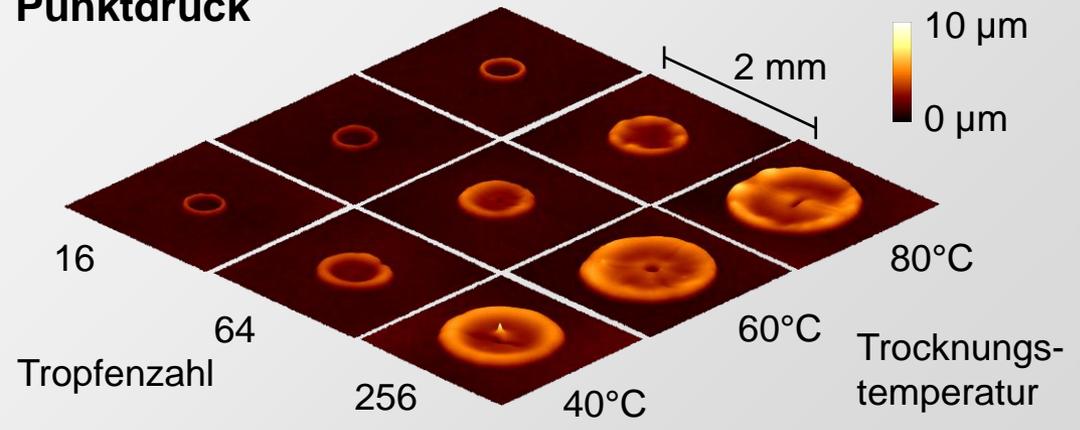
$$\sigma = 30 \text{ mN/m}$$

$$Oh = 0,14$$



Druckbare Suspension

Punktdruck

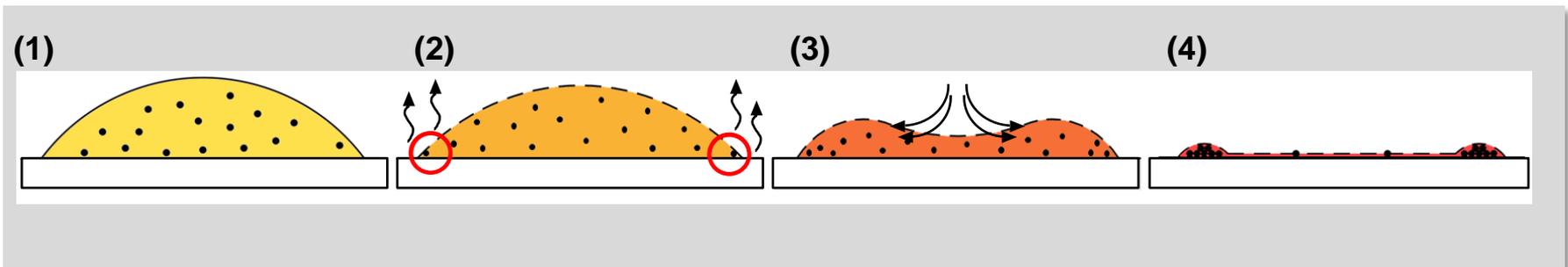
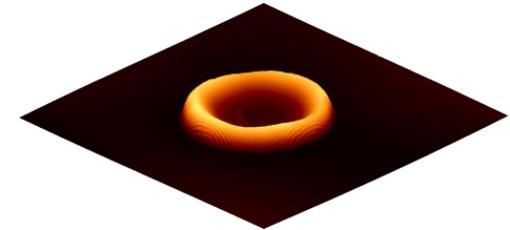


*A. Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013)

Coffee Stain Effect

3 Voraussetzungen:

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

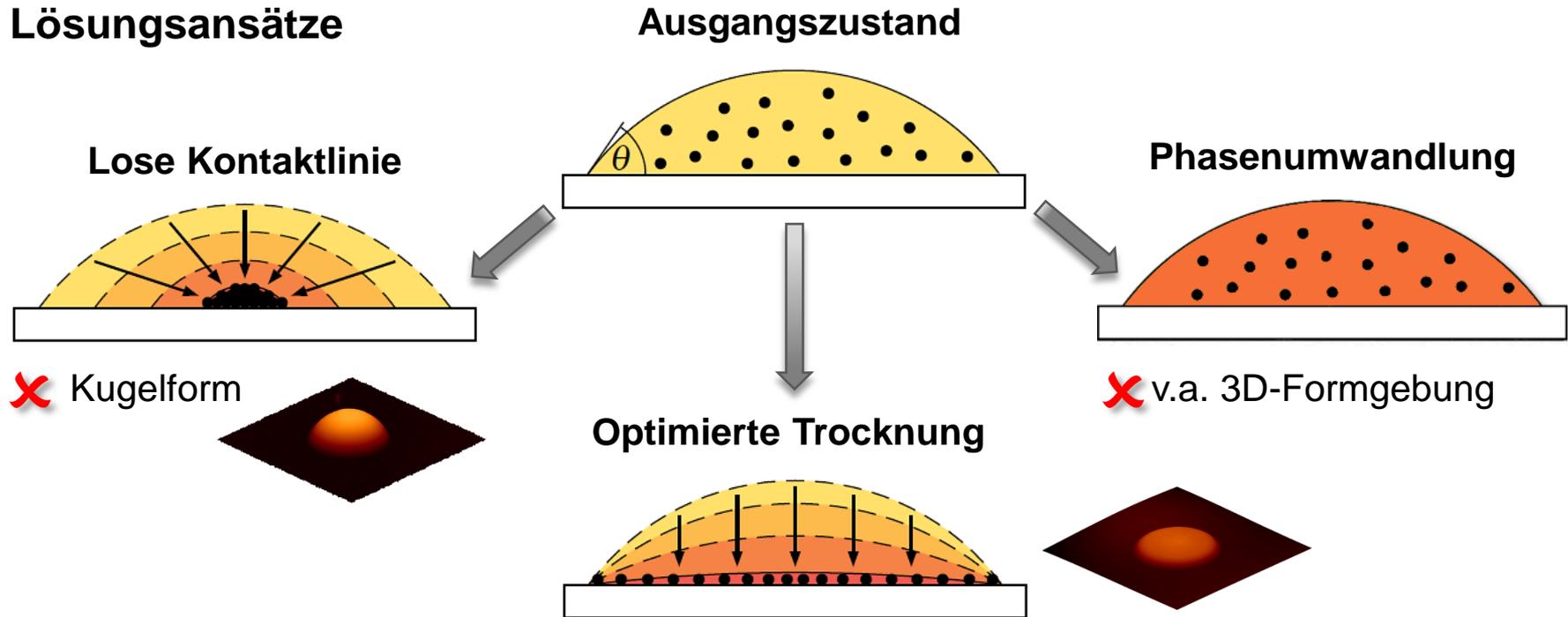


- (1) Homogener Tropfen auf Substrat
- (2) Lösemittel verdampft, Partikel am Rand bewirken *contact line pinning*
- (3) Verdampfung am Rand erfolgt schneller \rightarrow Ausgleichsstrom
- (4) Partikel wandern an den Rand und bilden eine Ringstruktur



Trocknungsverhalten

Lösungsansätze

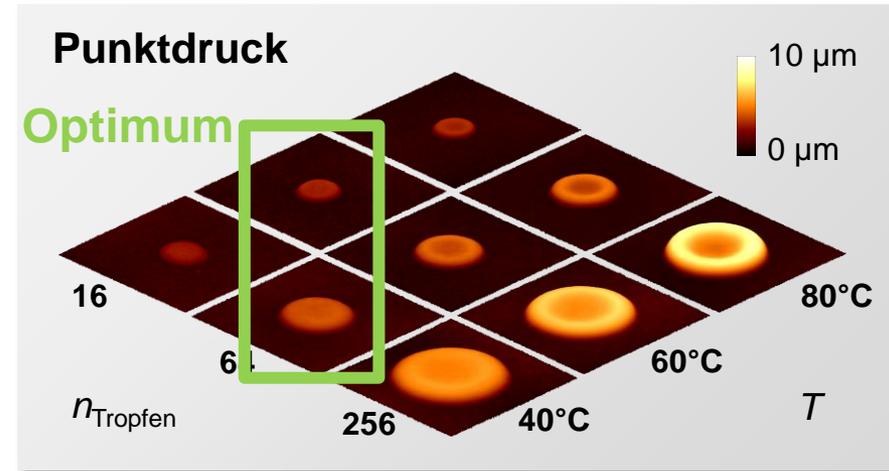
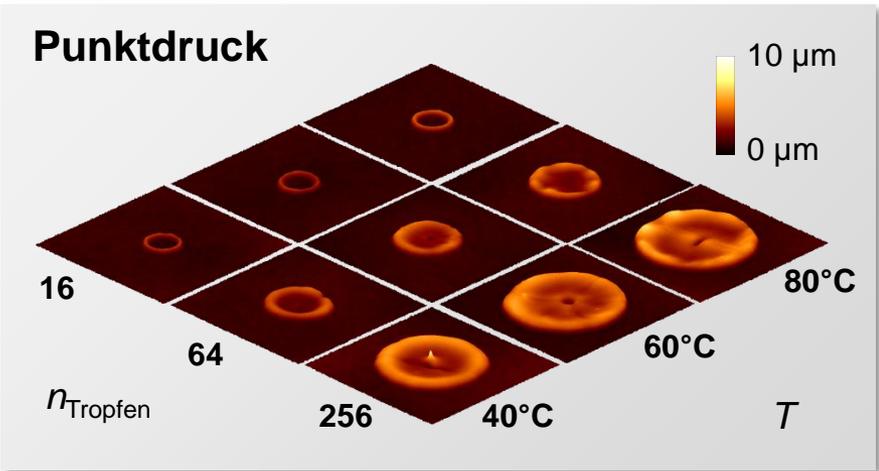
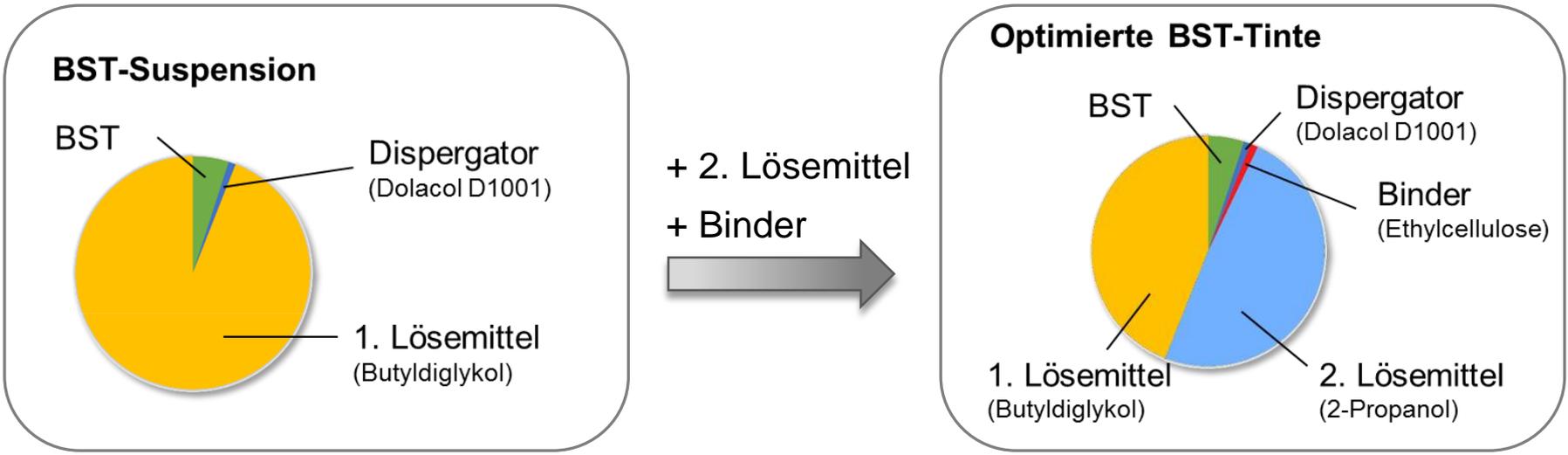


- Erzeugung einer Strömung von Außen nach Innen durch Lösemittelgemische
→ Marangoni-Effekt

- Eigener Ansatz: Schnelle Viskositätserhöhung auf Substrat soll Partikelbewegung unterdrücken

✓ Gut geeignet für Tintenstrahldruck

Optimierte Trocknung der BST-Tinte



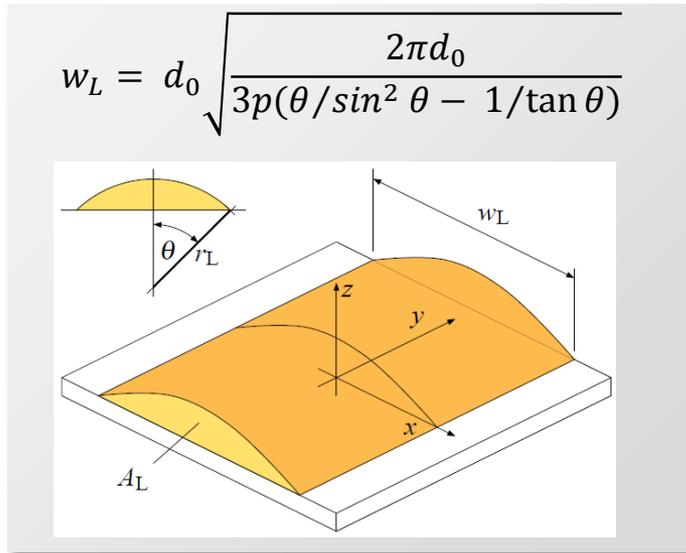
*A. Friederich et al., *J. Am. Ceram. Soc.* 96 (2013)

Strukturauflösung

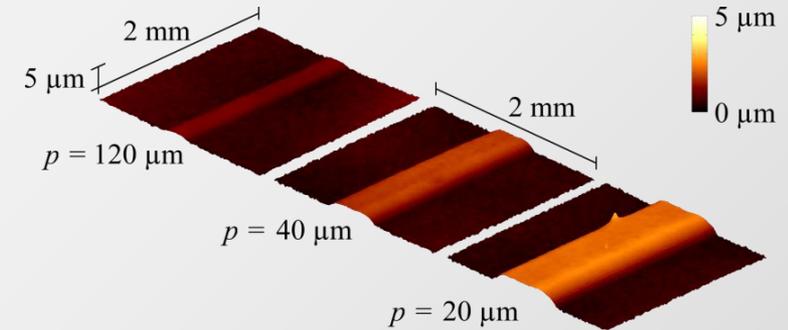
Ist maßgeblich abhängig von:

- a) Durchmesser der Druckdüse
- b) Kontaktwinkel der Tinte auf Substrat
- c) Rauigkeit des Substrats

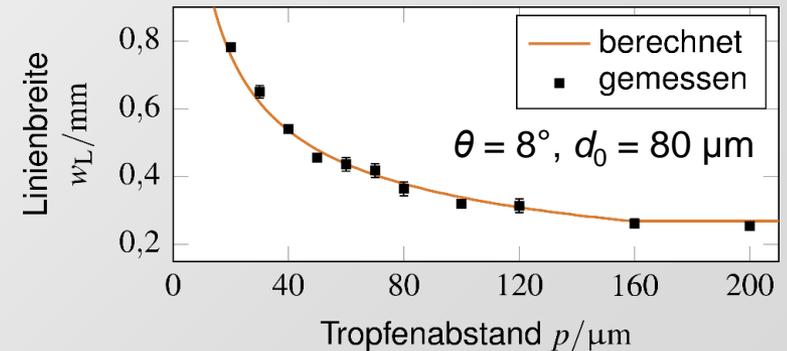
→ **Geometrische Berechnung** der Auflösung:



Beispiel: Liniendruck

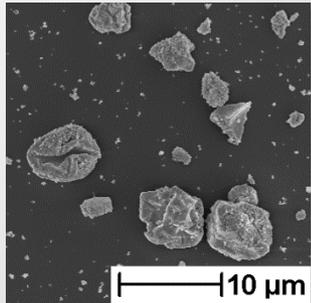


Vergleich: Berechnung und Druck



Anwendungsbeispiele: BST-Tinte

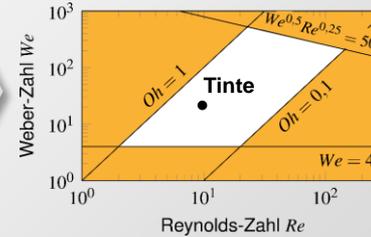
Kalziniertes BST-Pulver



Mahlen & Dispergieren



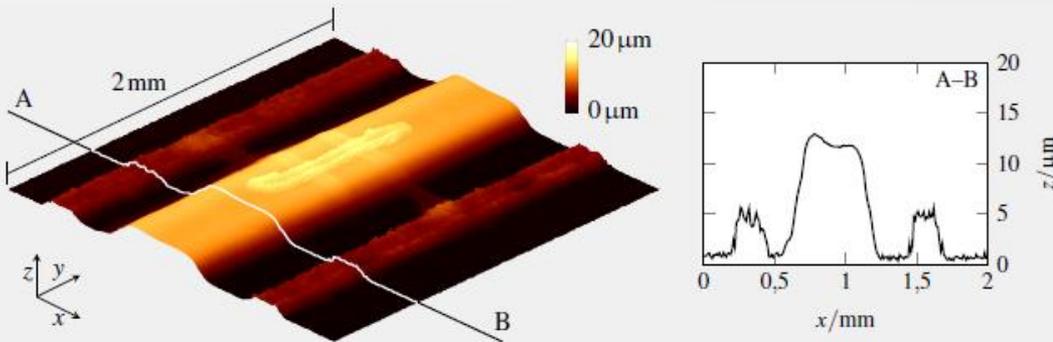
BST-Tinte



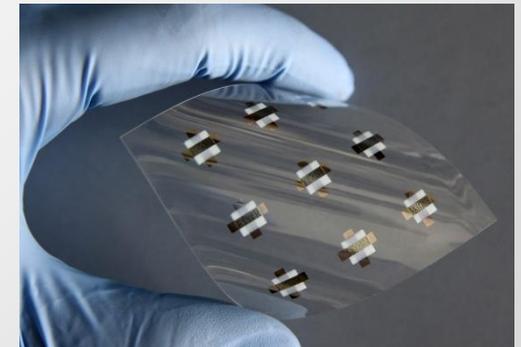
Druck



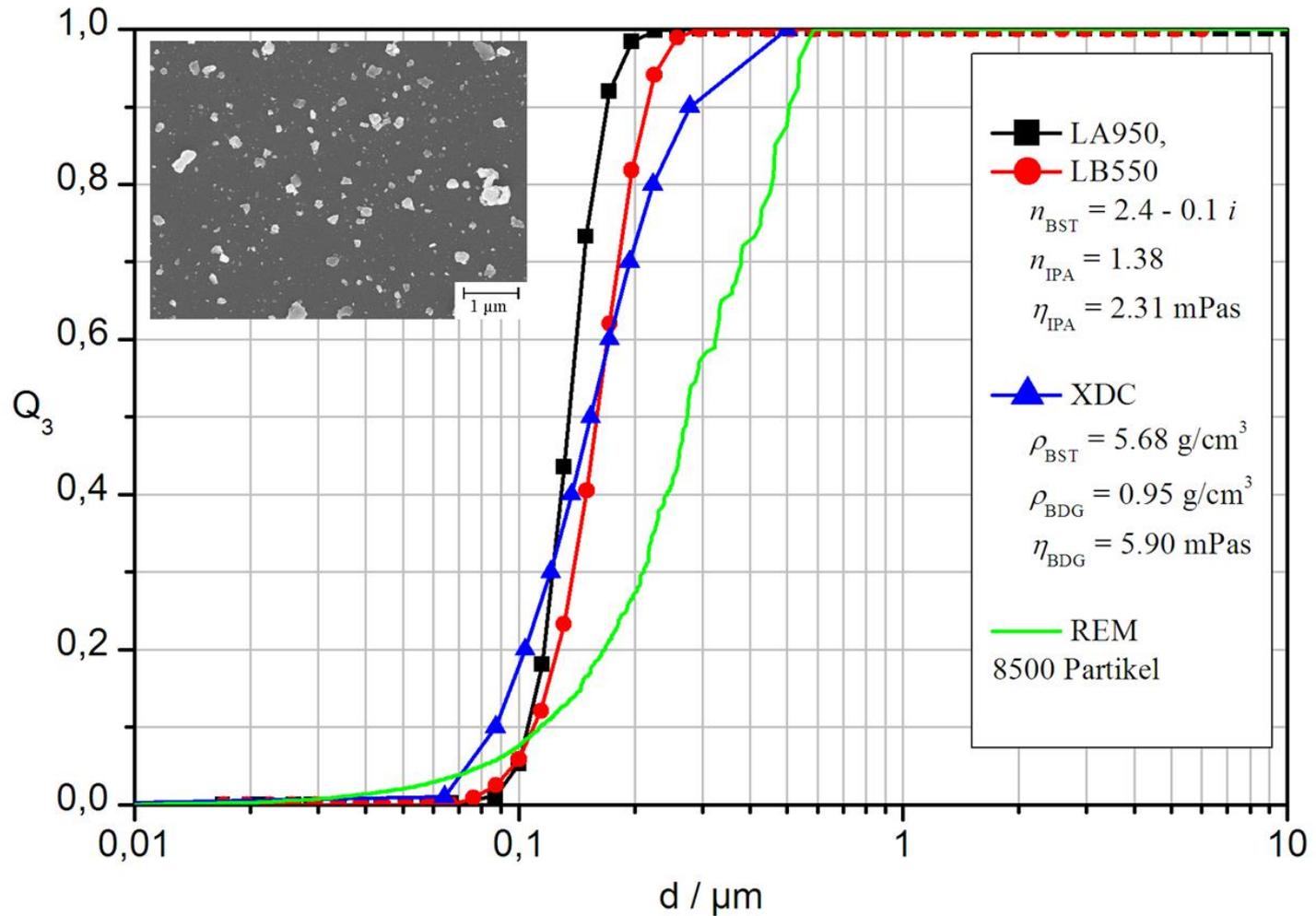
Gedruckte Phasenschieber



Flexible Kondensatoren



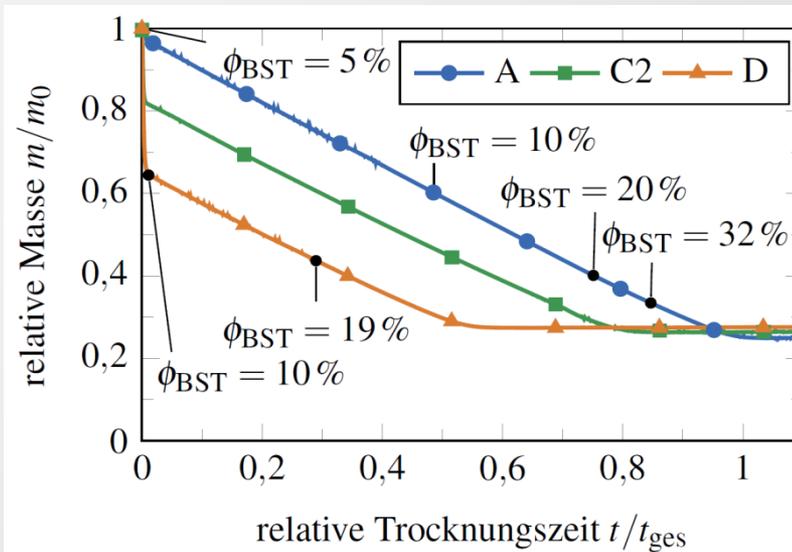
Vielen Dank.



Trocknungsverhalten und Strukturauflösung

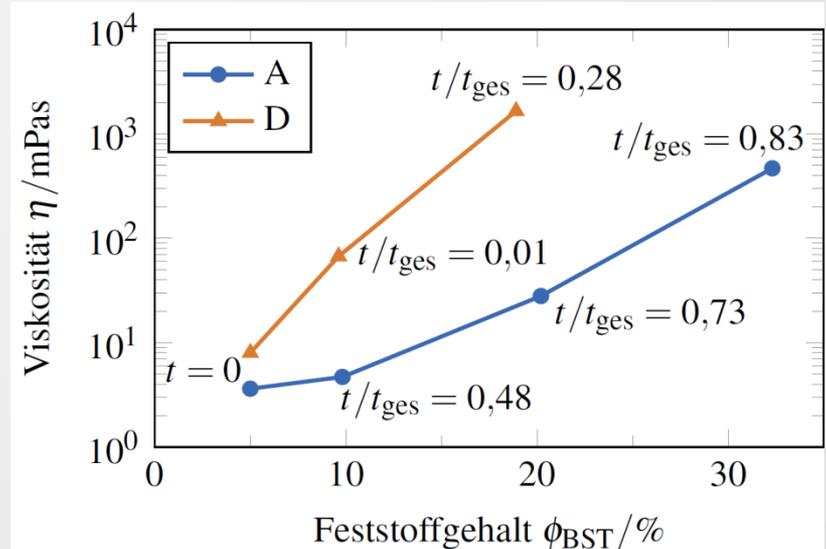
Optimierte Trocknung

Massenänderung



Relative Massenänderung während der Trocknung bei $T = 60^\circ\text{C}$

Viskositätsanstieg

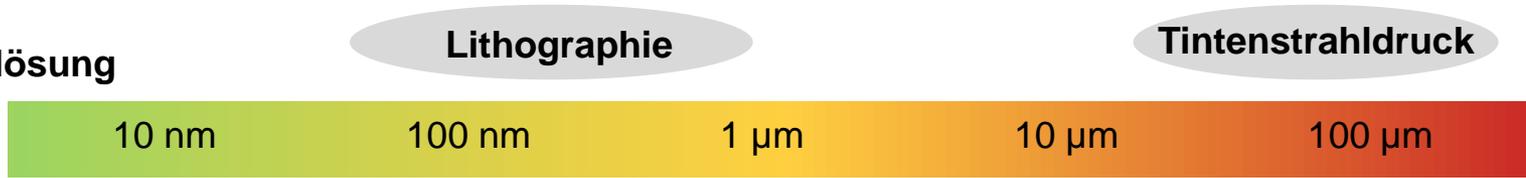


Viskosität über Feststoffgehalt bei $T = 60^\circ\text{C}$ und $\dot{\gamma} = 10\text{s}^{-1}$.

Trocknungsverhalten und Strukturauflösung

Druckauflösung

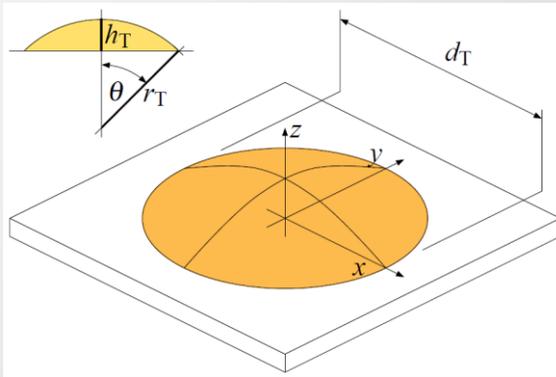
Laterale Auflösung



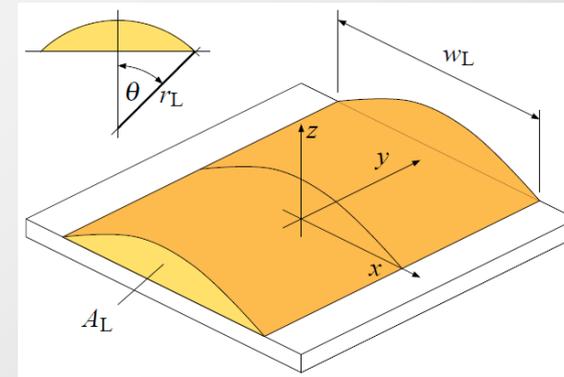
Schichtdicke



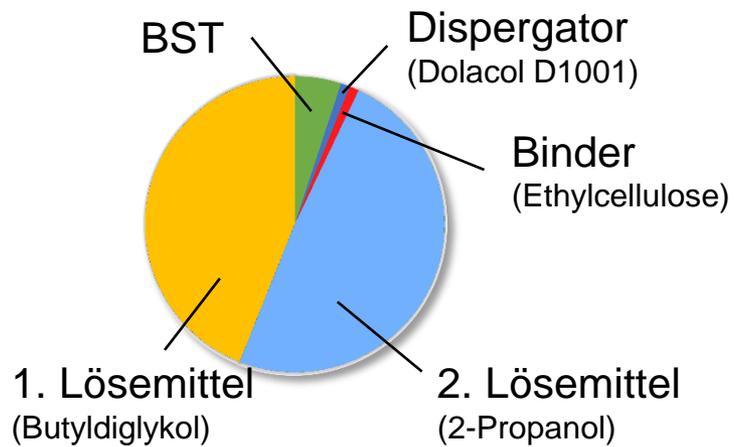
Tropfenkontur



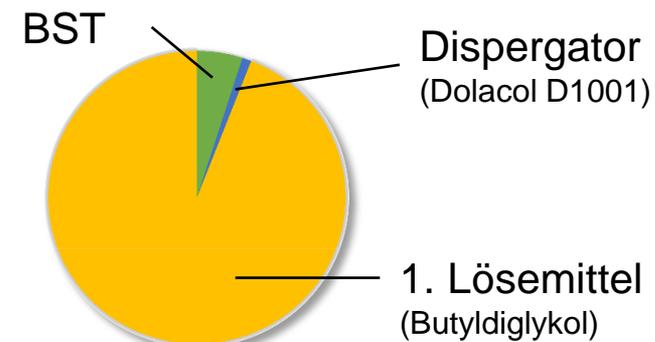
Linienkontur



Optimierte BST-Tinte

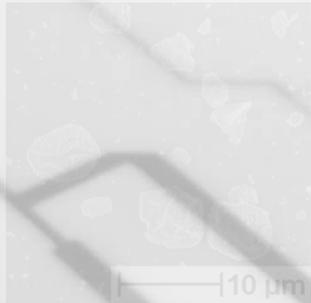


BST-Suspension



Anwendungsbeispiele: BST-Tinte

Kalziniertes
BST-Pulver



Mahlen &
Dispergieren



BST-Tinte

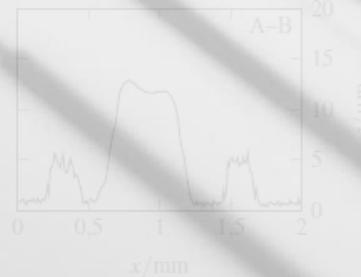
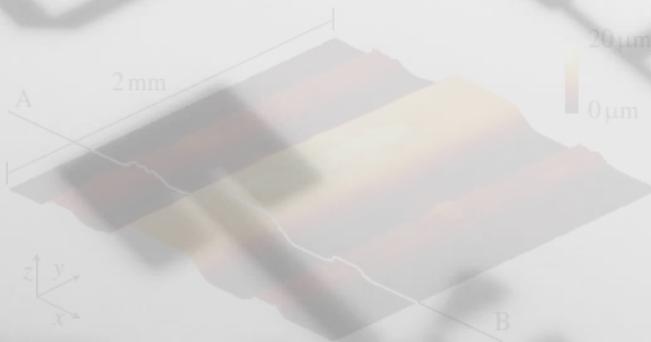


Druck



Vielen Dank.

Gedruckte Phasenschieber



Flexible Kondensatoren

