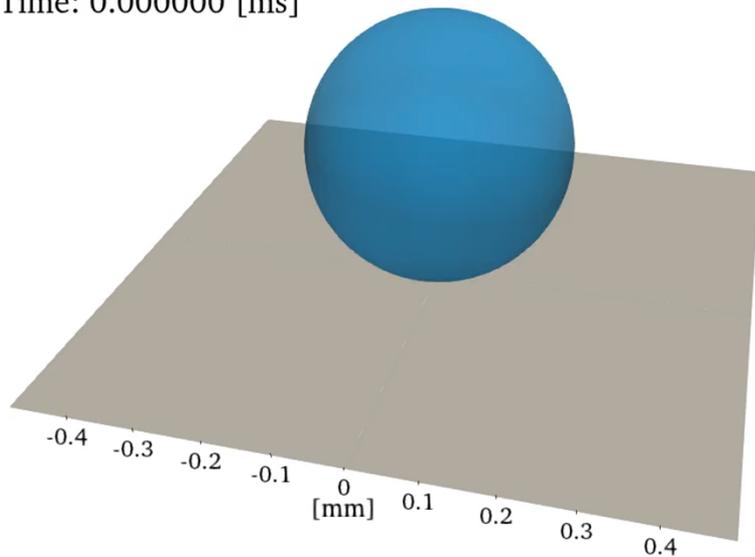

EINFLUSS DES LACKTROPFENAUFPRALL

Oliver Tiedje, Qiaoyan Ye, Philipp Knee, Stephan Paustian, Bo Shen, Joachim Domnick
Fraunhofer IPA, Hochschule Esslingen

Time: 0.000000 [ms]



27. DFO AUTOMOBIL-TAGUNG EUROPEAN
AUTOMOTIVE COATING

15. Juni 2021

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



IGF-Vorhaben Nr. 20089 N

Thema

Vorhersage der Oberflächeneigenschaften zerstäubender Lackapplikationstechniken durch Modellierung der Filmbildung beim Tropfenaufprall

Berichtszeitraum: 1.5.2018 bis 30.04.2021

Forschungsvereinigung: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächentechnologie e.V. - DFO

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Forschungsstelle 2: Hochschule Esslingen - Fakultät Angewandte Naturwissenschaften

Das IGF-Vorhaben (Nr. 20089) der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächentechnologie wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Agenda

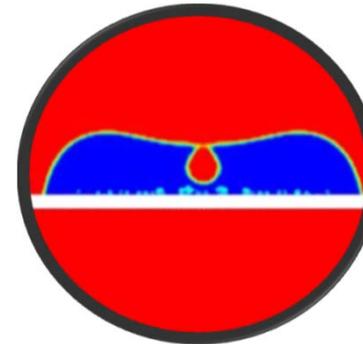
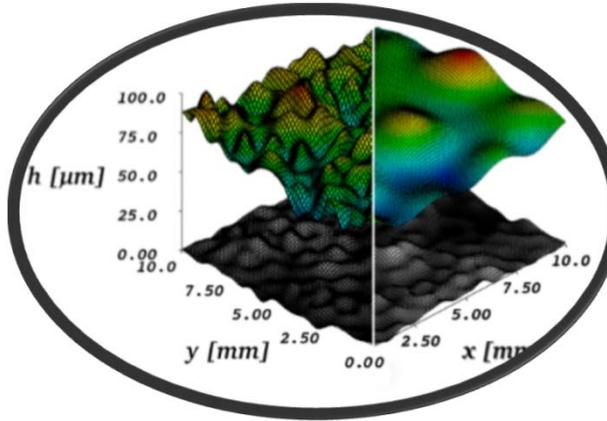
■ Problemstellung

■ Methoden

■ Ergebnisse

- Orange Peel
- Lufteinschlüsse
- Effektpigmente

■ Zusammenfassung



Problemstellung

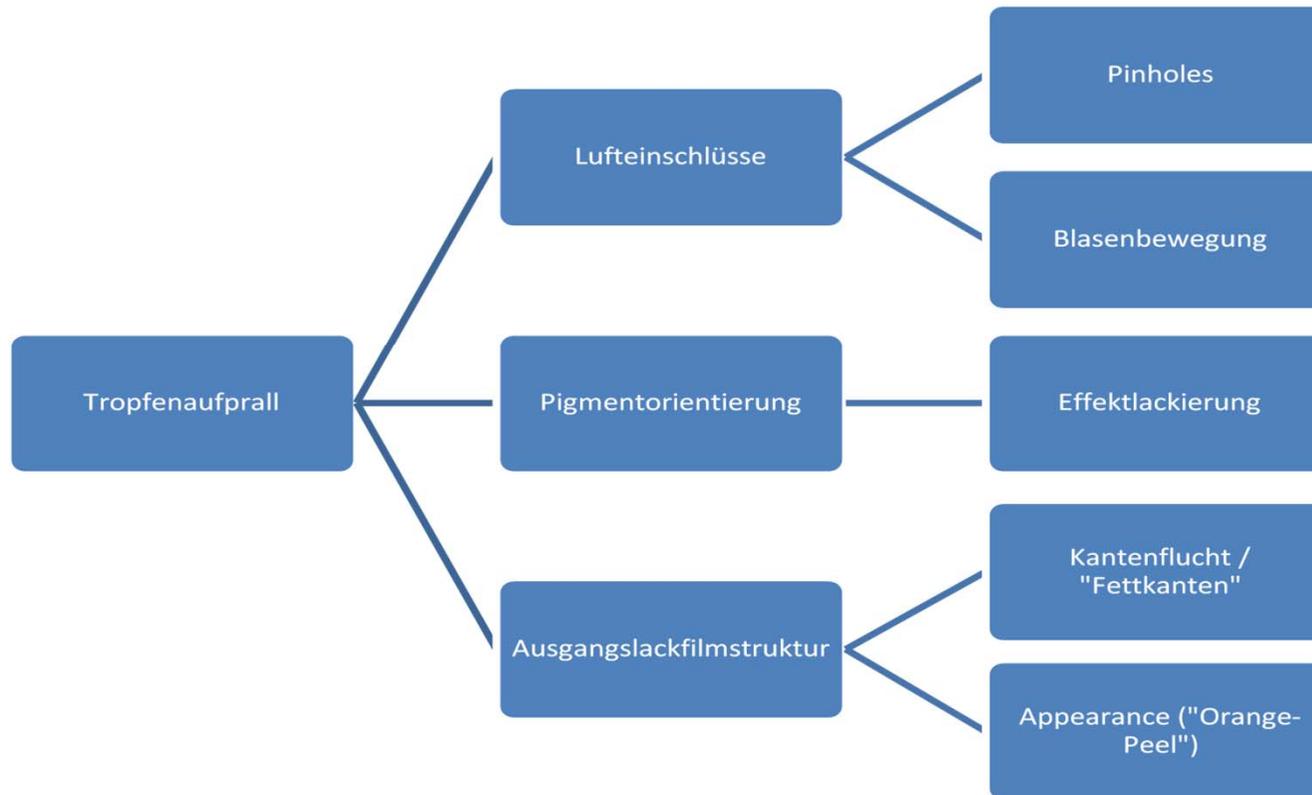
- Vermeidung Ausschuss durch Lackierfehler, z. B. durch Lufteinschlüsse
- Gute Appearance (hoher Glanzgrad und geringe Welligkeit, sogen. Orange-Peel)
- Innovative Farbeffekte (z. B. Perleffekte, metallische Effekte)
- Vermeidung Lackanhäufungen (Läufer, Fettkanten)
- Vermeidung Magerstellen an Kanten → funktionalen Mängeln (z. B. Kantenkorrosion)

Problemstellung

Physikalischer Effekt

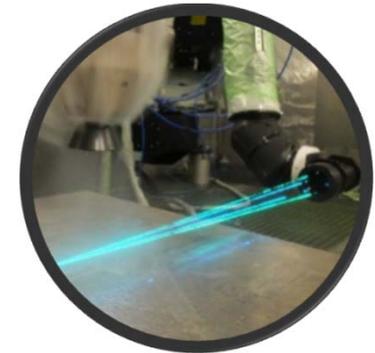
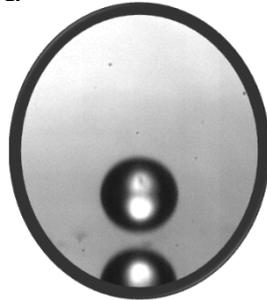
Spezifisches Phänomen

Anwendungstechnische
Aufgabenstellung



Methoden

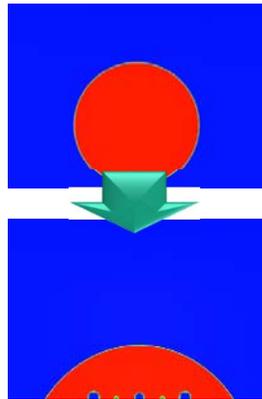
- Fluiddynamische Simulationen
- Hochgeschwindigkeitskamera
- Laser Doppler Anemometrie
- Laserbeugung
- Einzeltropfenerzeugung
- Kapillar-Rheometer für Hochscherreologie und Dehnviskosität



Einfluss des Aufpralls auf Orange Peel

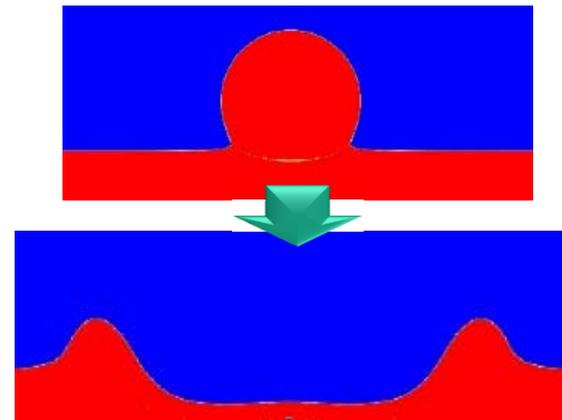
Altes Modell:

Tropfen entwickelt statischen Kontaktwinkel



Neu:

Tropfen schlägt Krater



Beispiel

20 μm Tropfen \rightarrow 40 μm

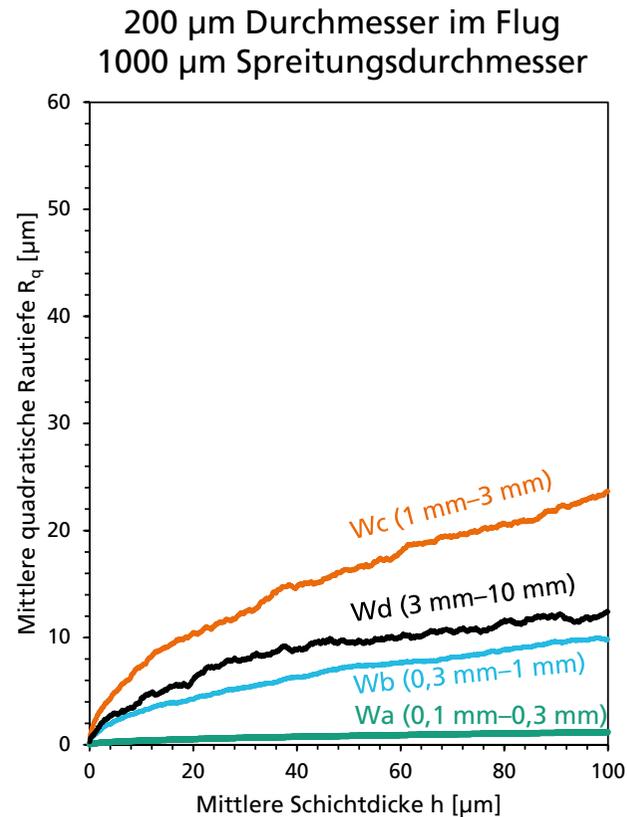
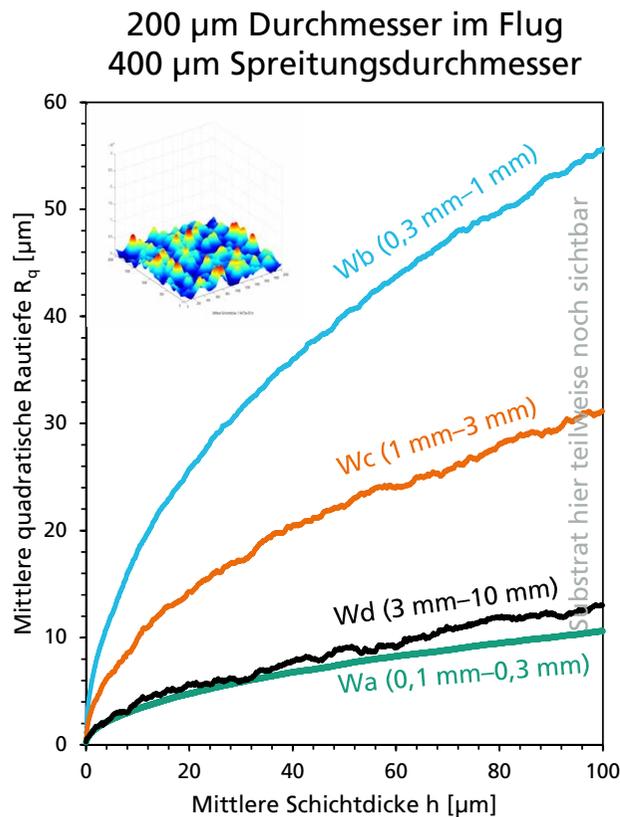
40 μm Tropfen \rightarrow 80 μm

100 μm

200 μm

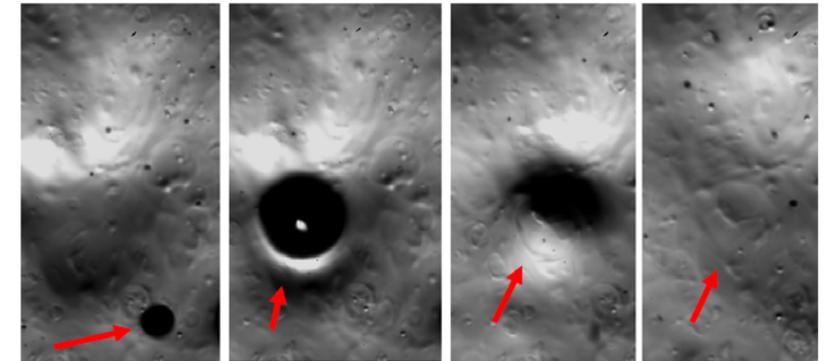
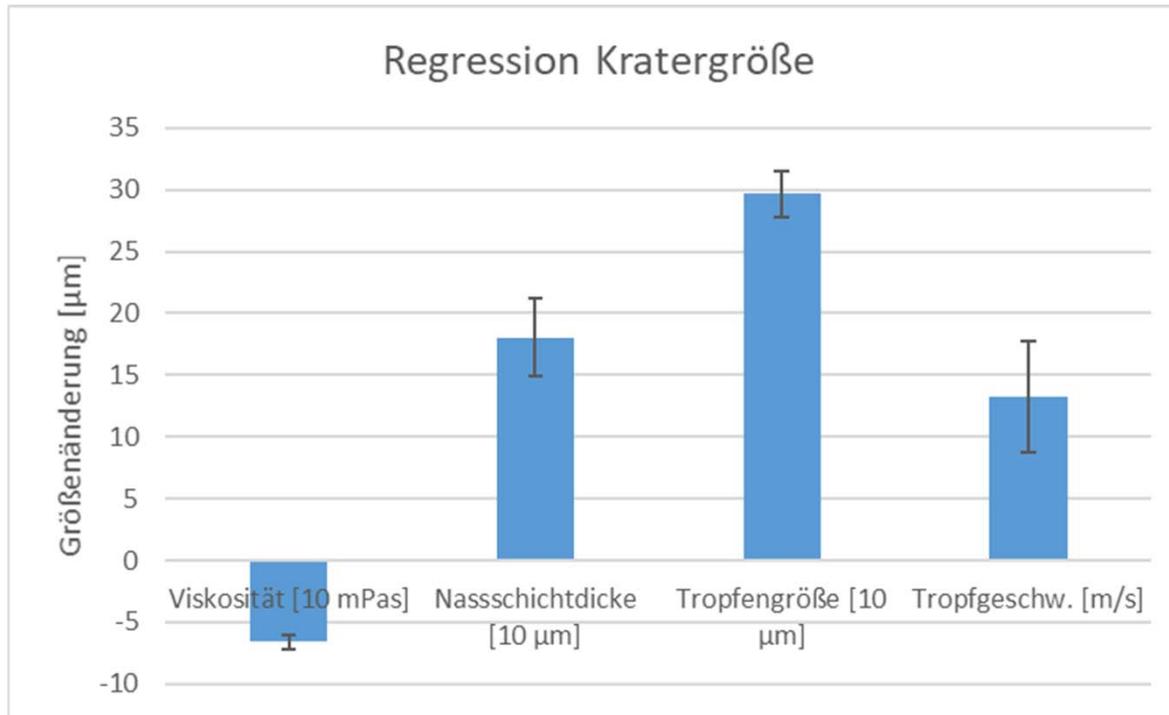
Einfluss der Tropfenform auf die Appearance

Fall 2: große Tropfen



- Statistische Überlagerung von Kugelkappen
- Form des Auftreffens relevant:
 - wenn Spreitung \sim Wellenlänge
- Große Tropfen hauptsächlich für Orange Peel relevant

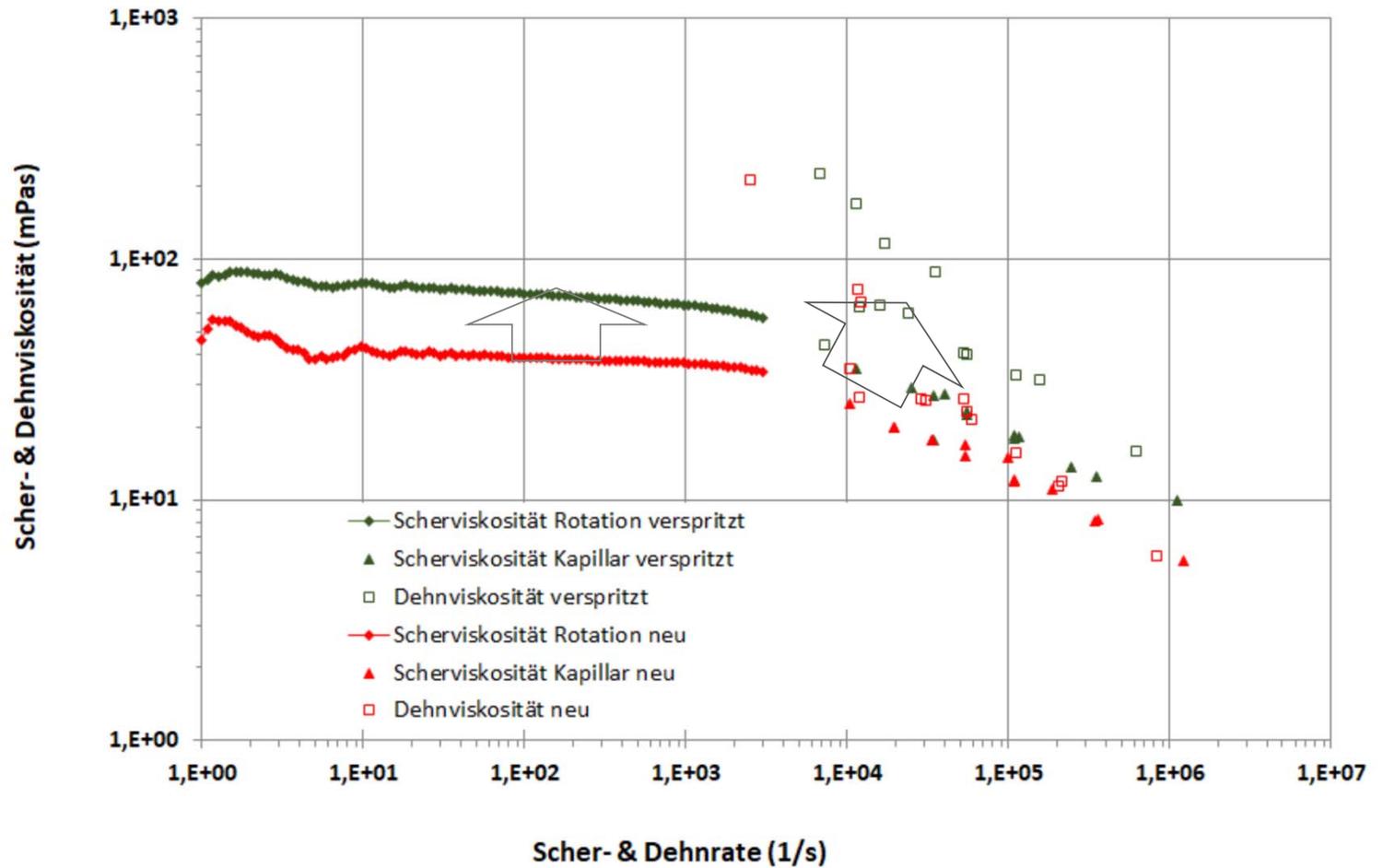
Experimentelle Untersuchungen - Hochgeschwindigkeitsaufnahmen



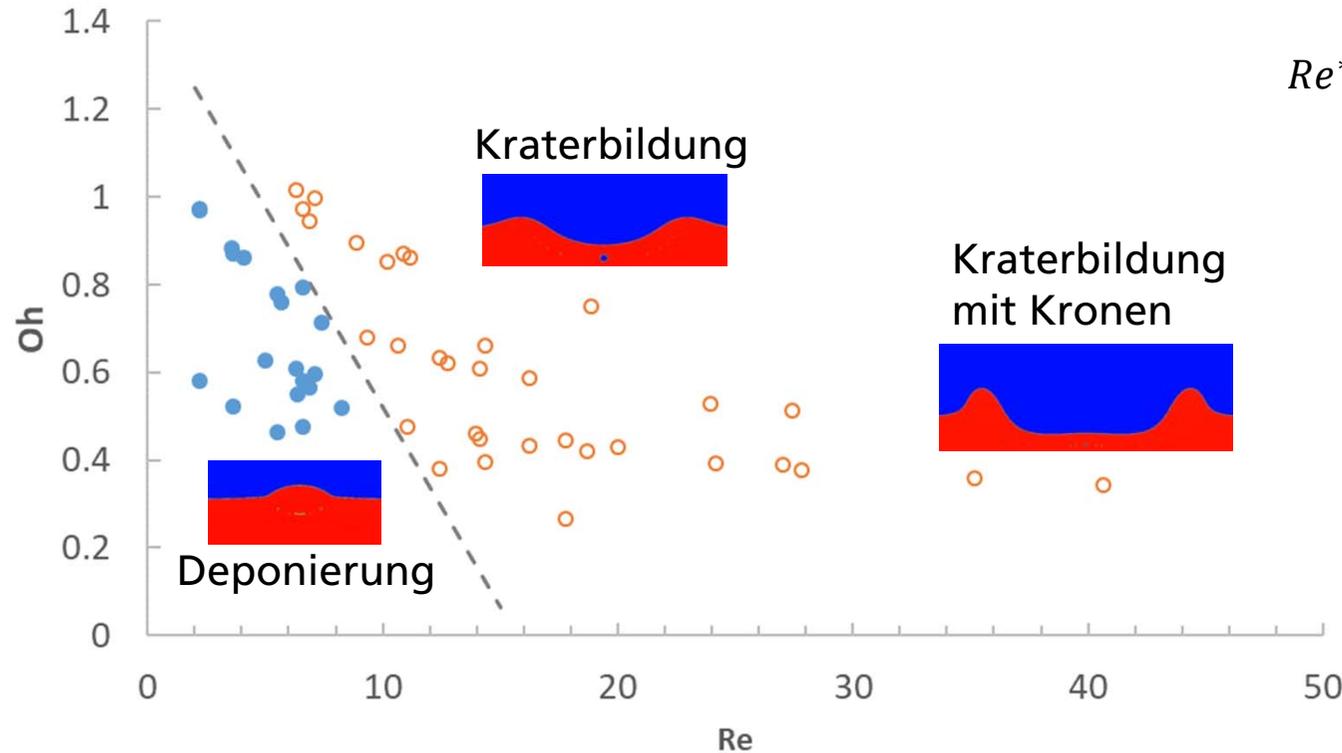
- Viskosität vermindert Krater, Schichtdicke, Tropfengröße und -geschwindigkeit verstärkt Krater

Viskositätserhöhung im Tropfenflug (Lösemittelack)

- Viskosität verdoppelt
- Dehnverhalten verstärkt



Phänomene des nassen Tropfenaufpralls: Deponierung vs. Kraterbildung



Reynolds-Zahl:

$$Re^* = \frac{\rho u d}{\eta^*}$$

Ohnesorge-Zahl:

$$Oh^* = \frac{\eta^*}{\sqrt{\rho \sigma d}}$$

ρ : Dichte

u : Aufprallgeschwindigkeit

d : Tropfendurchmesser

σ : Oberflächenspannung

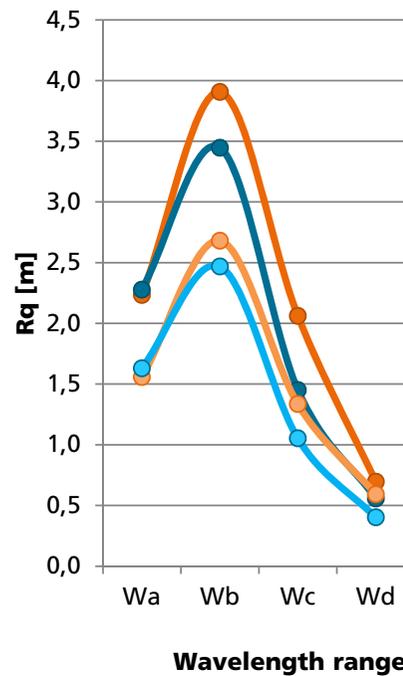
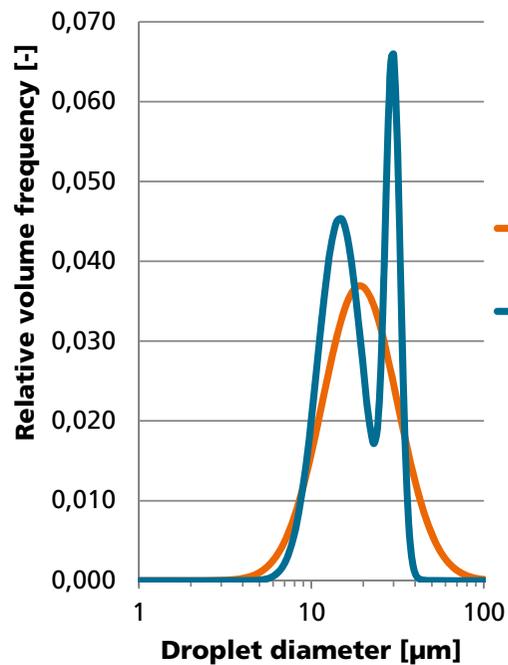
η^* : Charakteristische Viskosität

Charakteristische Scherrate:

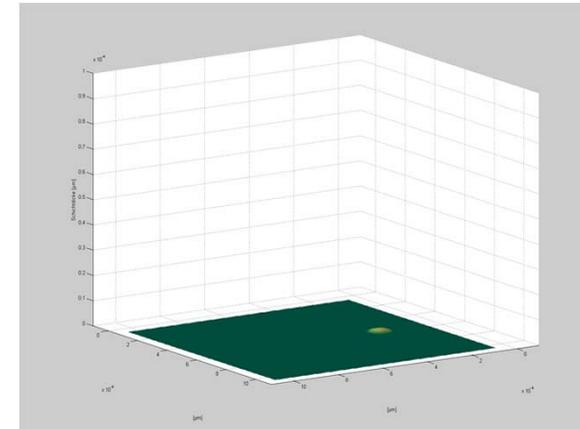
$$\dot{\gamma}^* = \frac{2 \cdot u}{d}$$

Simulation Tropfengröße auf Welligkeit

- Einfluss der Tröpfchengrößenverteilung: Feine Zerstäubung und bimodale Verteilung bringt Vorteile



- monomodal, 100 μm
- bimodal, 100 μm
- monomodale, 50 μm
- bimodal, 50 μm



Fazit: Welligkeit

- Vor allem große Tropfen beeinflussen die Welligkeit
- Viskosität beim Auftreffen grob verdoppelt
- Struktur des Tropfen deutlicher komplexer bei bereits bestehende Filmen

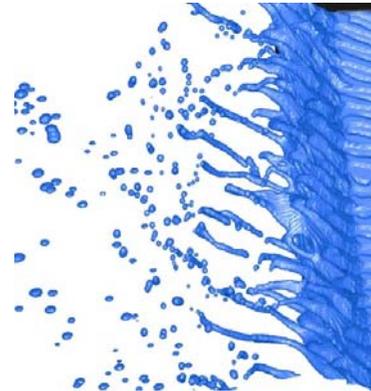
Lokale Defekte – Abgrenzung „Pinholes“

- Kocher
 - Hohe Schichtdicke
 - Schnelle Aufheizung
- Ausgasungen aus dem Substrat
 - Wasser in hygroskopischen Substraten
 - Poren
- Stippen
 - Gealterter und ungenügend gerührter Lack
- Krater
 - Filmische Verschmutzungen der Oberfläche, des Lackes oder der Luft
- Schmutz
 - Partikuläre Verschmutzungen der Oberfläche, des Lackes oder der Luft
 - Verschmutzungen durch Anlagen oder Personal
- **Lufteinschlüsse**

Lufteinschlüsse – Pinholes

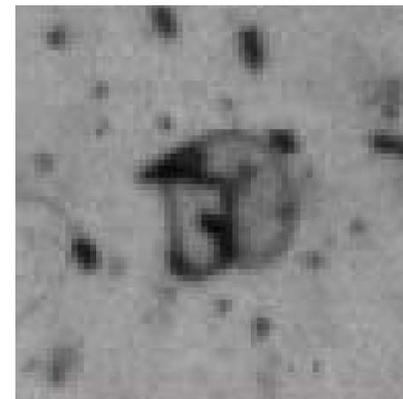
Folgen:

- Störung des visuellen Eindrucks
- Schwachstelle für Wasser



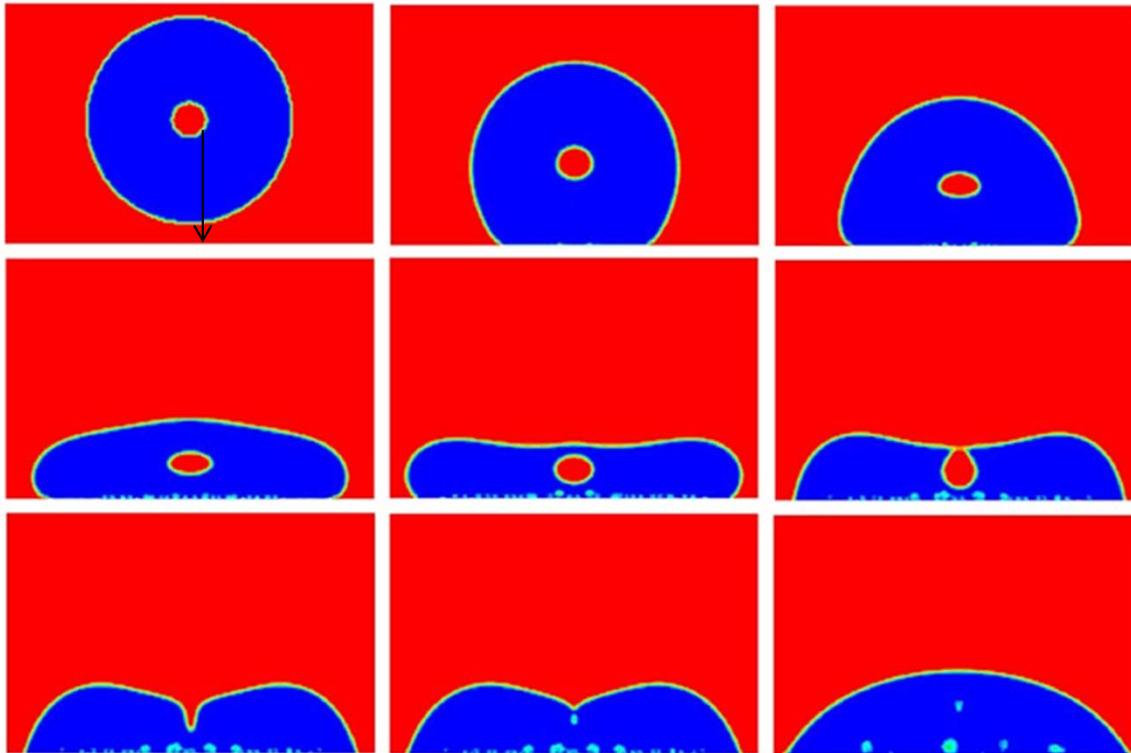
Mögliche Ursachen

- Lufteinschlüsse im Lack
- Lufteinschluss beim Zerstäuben
- Lufteinschluss bei Auftreffen
 - Auf dem Substrat
 - In der Schicht
- Luft in Poren



source: BASF, DFO-Tagung
Heidelberg 2011

Lufteinschlüsse – Tropfen mit Luft beim Aufprall

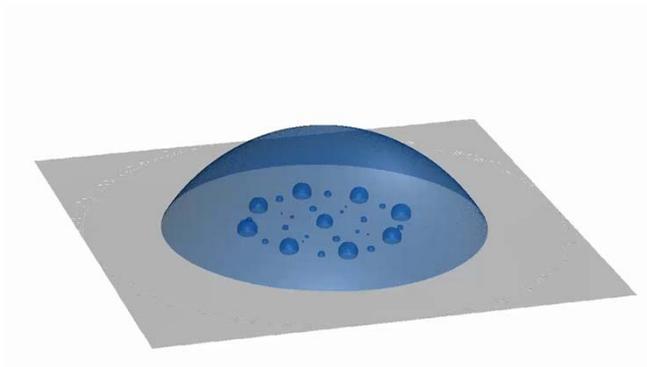


$t = 0.003 \text{ s}$

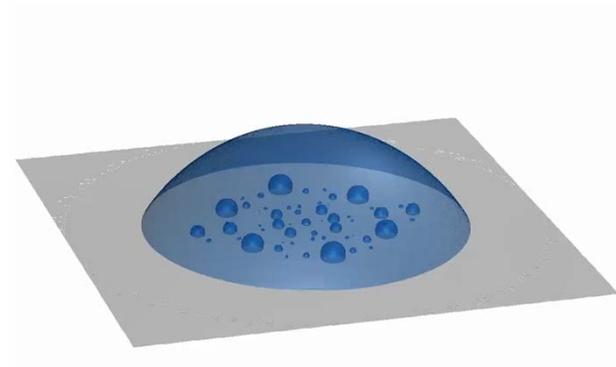
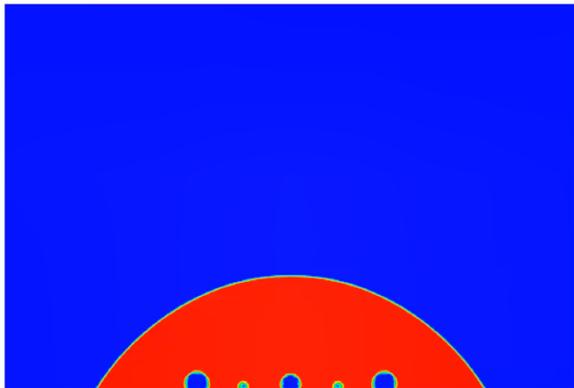
- Luft einweicht sehr schnell, wenn sie nicht ans Substrat kommt.
- Luft auf dem Substrat klebt durch Oberflächenspannung fest.

Beispiel: Viskositätseinfluss

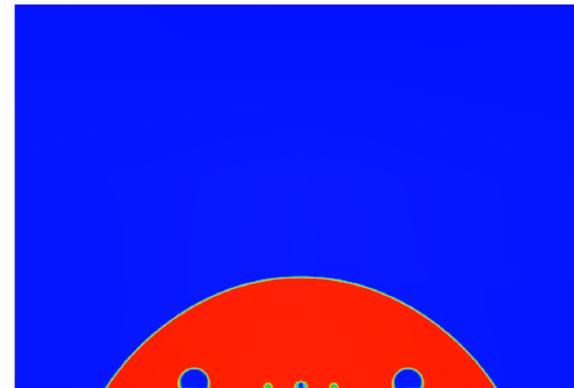
$d = 50 \mu\text{m}$, $u = 4 \text{ m/s}$, $CA = 60^\circ$, $ST = 24 \text{ mN/m}$



10 mPa·s



40 mPa·s



$d = 50 \mu\text{m}$

$u = 4 \text{ m/s}$

$CA = 60^\circ$

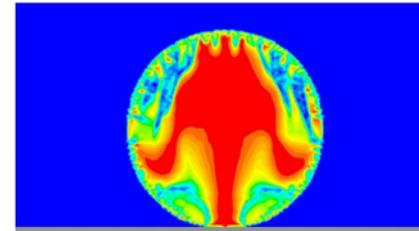
$ST = 24 \text{ mN/m}$

Viskosität ist durch Scherverdünnung und Dehnrheologie bestimmt

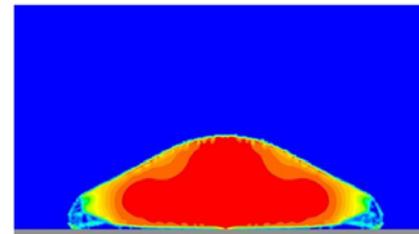
Dehn- und Scherviskosität

- Beide sind relevant
- Neue Messmethode misst beides

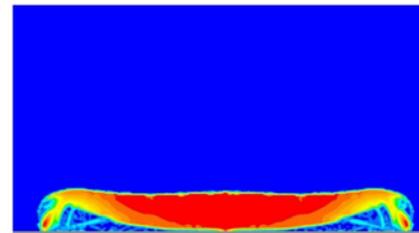
Blue: shear flow
Red: elongation



$t = 2.07e-05$ s



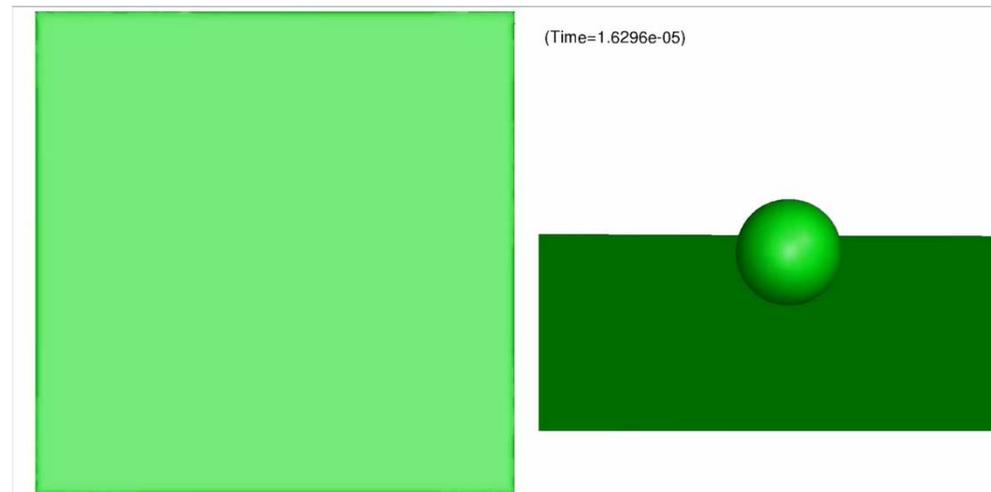
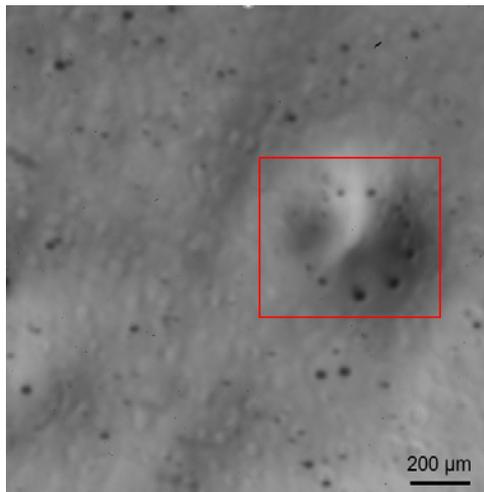
$t = 1.84e-04$ s



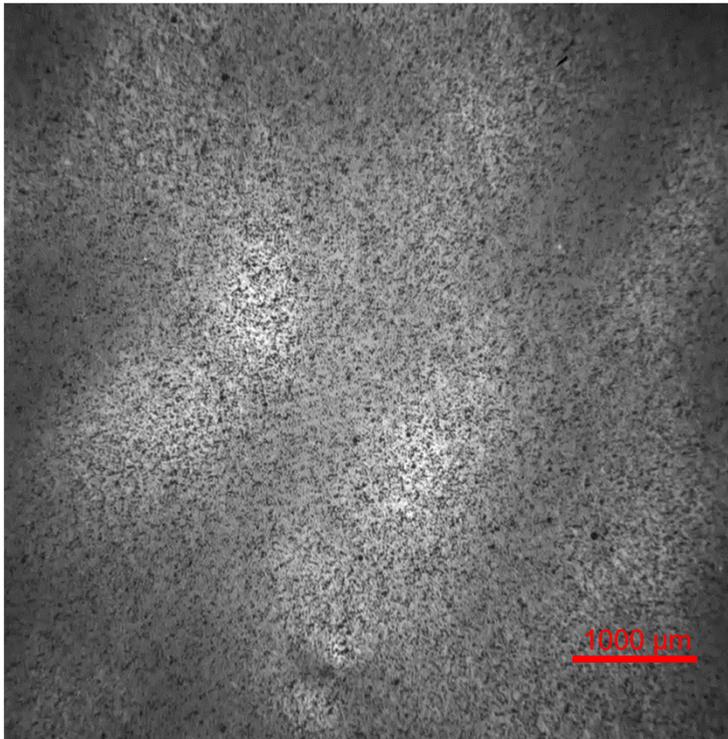
$t = 3.16e-04$ s

Oft bilden sich Kreise von Lufteinschlüssen

Droplet on wetted glas (f = 60 μm , d = 280 μm , u = 2,2 m/s, vis = 30 mPa·s, ST = 28 mN/m)



Lufteinschlüssen sind im ganzen Film verteilt



1024 x 1024 Pixel

1000 fps

Shutter 1/1003 s

Lufteinschlüsse bewegen sich
mit unterschiedlichen
Geschwindigkeiten
(in unterschiedliche Höhe)

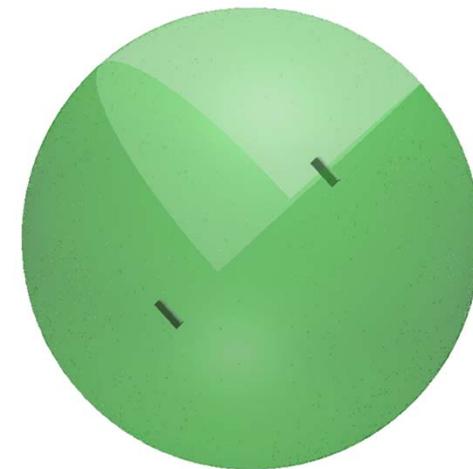
Fazit: Lufteinschlüsse

- Phänomene des nassen Tropfenaufpralls, nämlich Deponierung und Kraterbildung, lassen sich durch Reynolds- und Ohnesorge-Zahl abgrenzen
- Charakteristischer Kraterdurchmesser hat eine starke Korrelation mit der Reynolds-Zahl

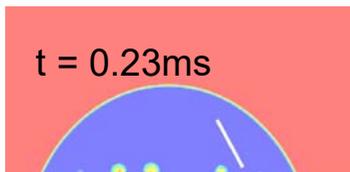
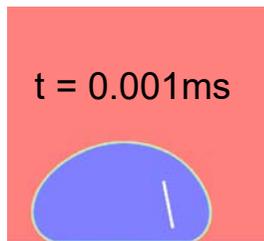
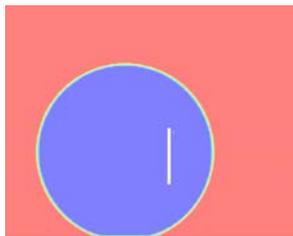
- Mehr Luftblasen entstehen während des trockenen Tropfenaufpralls bei einer höheren Viskosität und einer höheren Aufprallgeschwindigkeit
- Mit einem kleineren Kontaktwinkel entstehen mehr Luftblasen, die sich aber schneller von dem Substrat ablösen können

Numerischen Methode

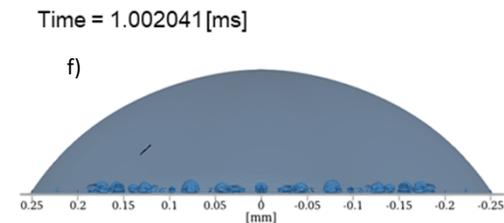
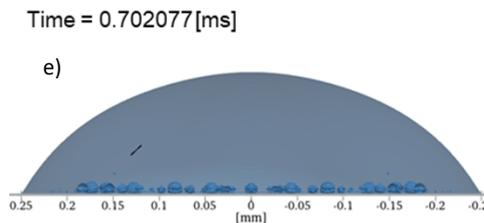
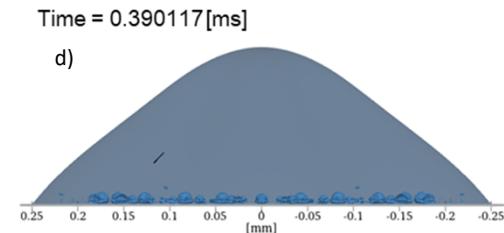
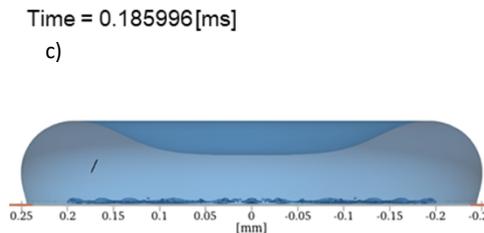
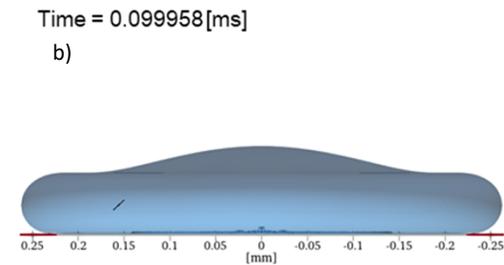
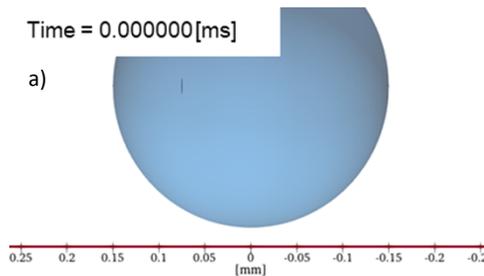
- Modellverbesserung für Tropfenaufprall – Modellvalidierung mit Experiment
- Modellentwicklung für Pigmentorientierungssimulation
- Parameter in der Simulationen:
 - Pigment: $1 \times 16 \times 16 \mu\text{m}^3$
 - Viskosität: 10 – 80 mPa·s und Modell-Lack
 - Oberflächenspannung: 25, 65 mN/m
 - Aufprallgeschwindigkeit: 0.5, 2, 5, 10 m/s



Pigmentorientierung auf unbenetztem Substrat (Erster Tropfen)



Angle_static: 61°

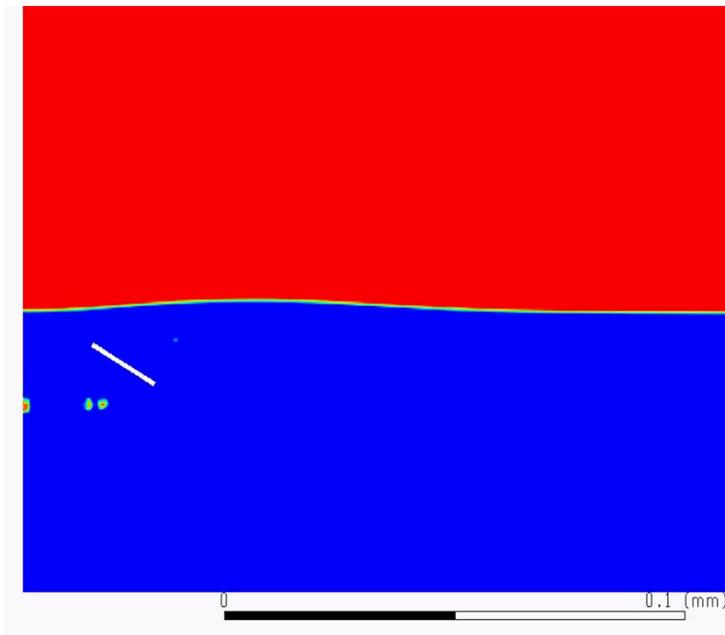


Angle_static: 42°

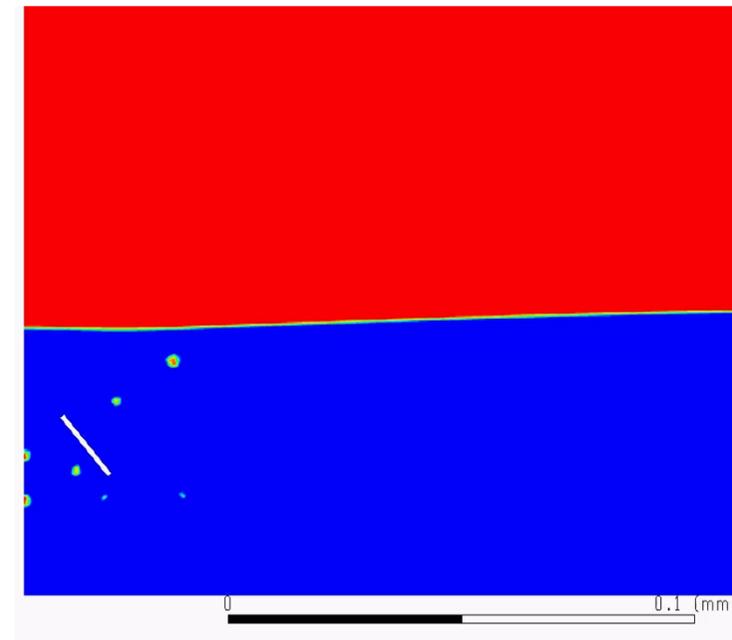
Pigmentorientierung in lackierten Film („später“ Tropfen)

- Newton'sche Tropfen: $D=50\mu\text{m}$, $\sigma = 0.025 \text{ N/m}$, $\mu = 20 \text{ mPas}$

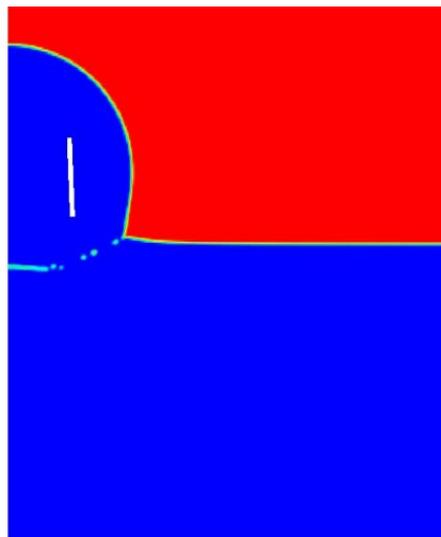
$U = 2\text{m/s}$



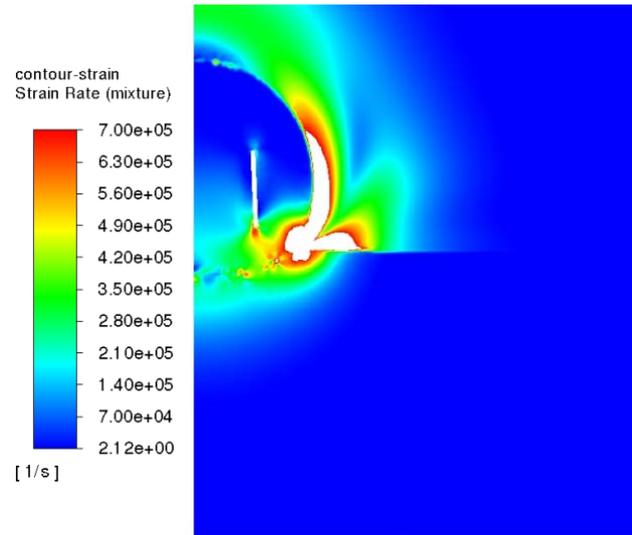
$U = 10 \text{ m/s}$



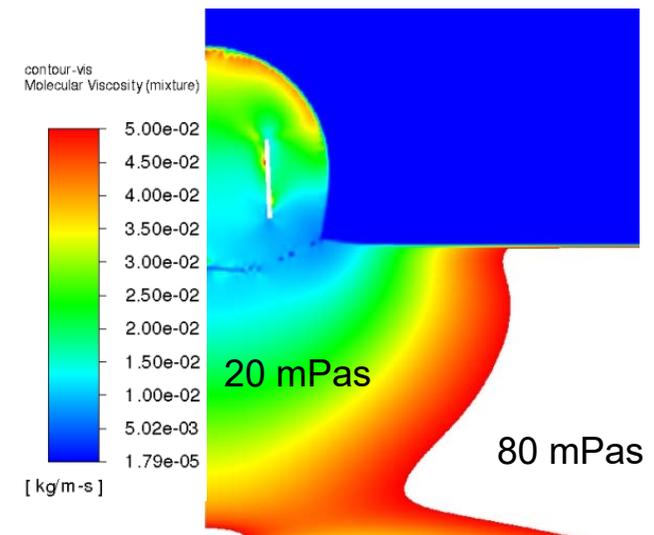
Pigmentorientierung in lackierten Film: realistische Viskosität



Phasen Darstellung
Blau: Flüssigkeit
Rot: Luft



Gezeigte Scherrate: 2 - 7e5 (1/s)



Gezeigte Flüssigkeit Viskosität:
10 – 50 mPas

Fazit: Pigment-Orientierung

- Höhere Viskosität verursacht geringere Pigmentausrichtung
- Für Lacktropfen: kleine Tropfen → höhere Aufprall-Scherrate → niedrige Viskosität
- Optimale Betriebsparameter für bessere Pigmentorientierung beim Tropfenaufprall zur nassen Schicht wären:
 - Feine Zerstäubung
 - Vorgänge mit Ausbreitung sowie leichtem Krater, d. h. mit geringer Aufprallgeschwindigkeit, z. B. 2 – 5 m/s
 - Die Viskosität beim Tropfenaufprall soll im 10 – 40 mPas (scherverdünnt) liegen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



IGF-Vorhaben Nr. 20089 N

Thema

Vorhersage der Oberflächeneigenschaften zerstäubender Lackapplikationstechniken durch Modellierung der Filmbildung beim Tropfenaufprall

Berichtszeitraum: 1.5.2018 bis 30.04.2021

Forschungsvereinigung: Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächentechnologie e.V. - DFO

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Forschungsstelle 2: Hochschule Esslingen - Fakultät Angewandte Naturwissenschaften

Das IGF-Vorhaben (Nr. 20089) der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächentechnologie wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.