

Fluid-Struktur-Oszillation zur Drainageoptimierung bei der Druckluftfiltration

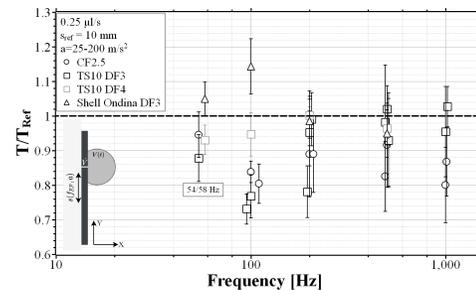
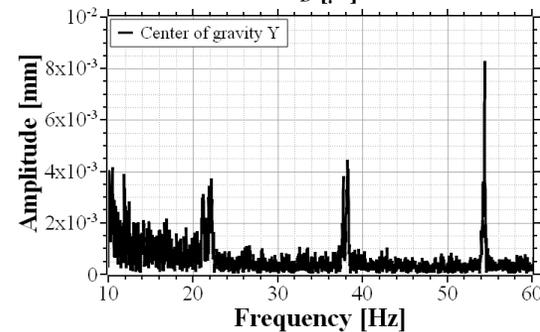
IGF-Projekt-Nr. 22456 N

3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses

05.12.2024

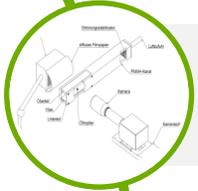
M.Sc. Andreas Metzmacher, Dr.-Ing. Sebastian Burgmann, Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske

Chair of Fluid Mechanics
Bergische Universität Wuppertal





Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



Experimente zur Vibrationsanregung



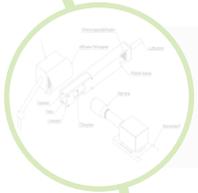
Drainage-Tests



Strömungsschwingung durch Störkörper



Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



Experimente zur Vibrationsanregung

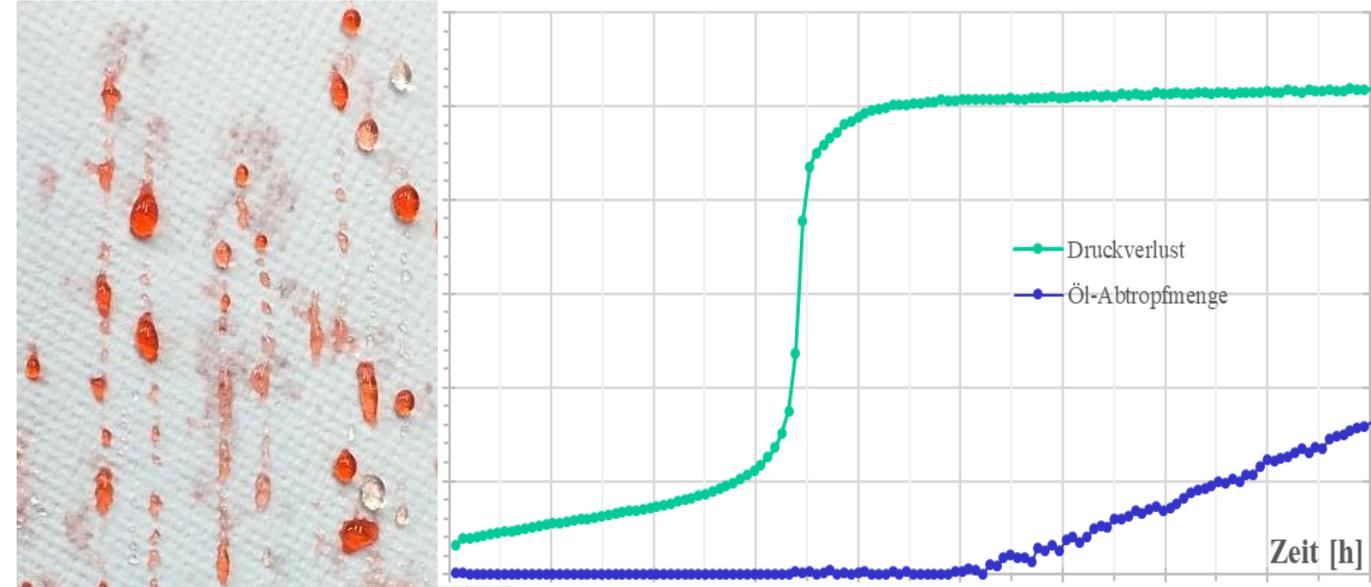
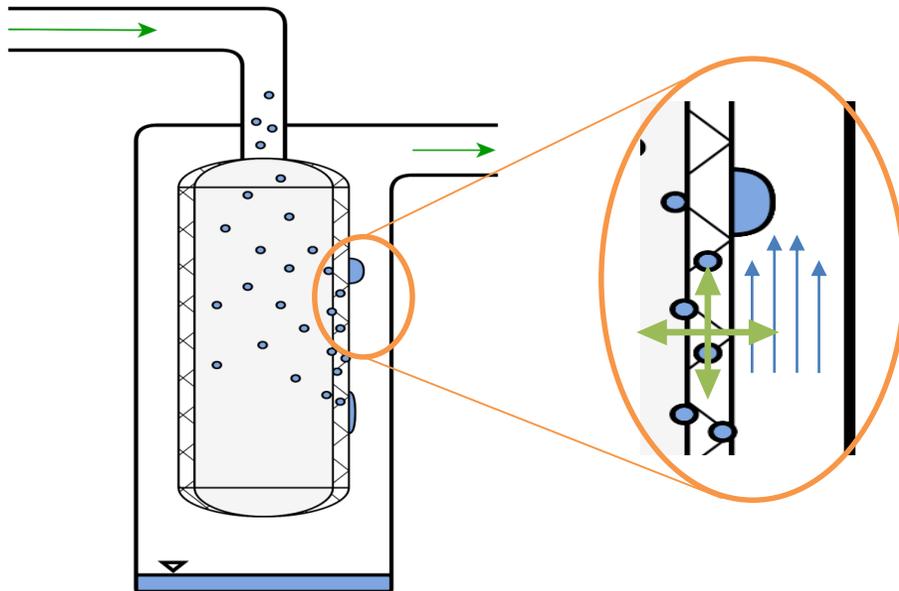


Drainage-Tests



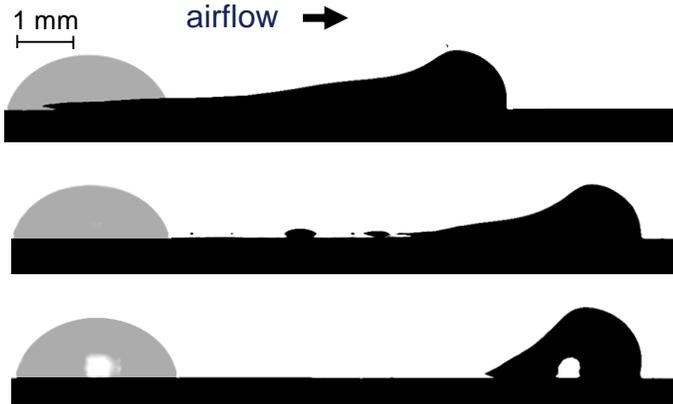
Strömungsschwingung durch Störkörper

- Entwicklung einer technischen Maßnahme zur Reduktion des Sättigungsniveaus bzw. zur Verringerung der Sättigung über eine
 - Einbringung einer **Oszillation** mit direkter Wirkung auf die Flüssigkeitsansammlung.



- verbesserte Drainage
- Verringerung des Druckverlusts
- dadurch Erzielung eines geringeren Energieverbrauchs der Drucklufferzeugung in der Gesamtbilanz

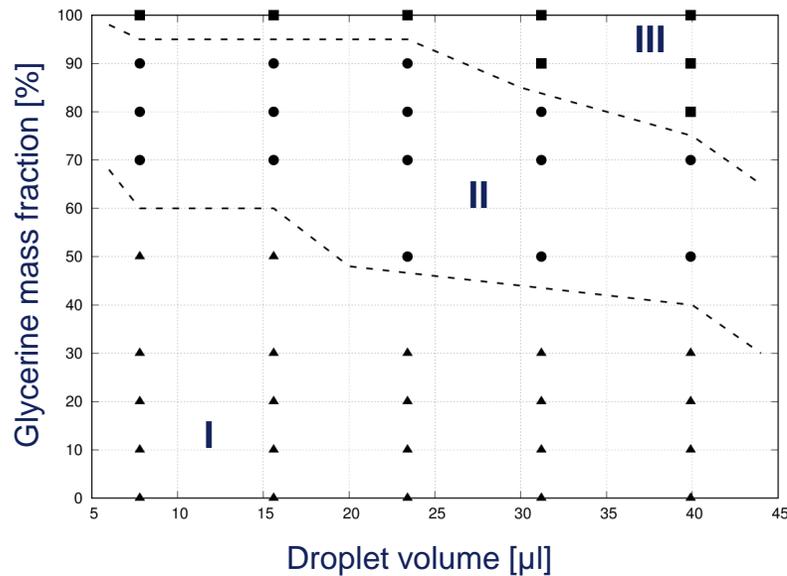
Tropfendeformation und kritische Geschwindigkeit zum Loslösen:



III, rivulet formation

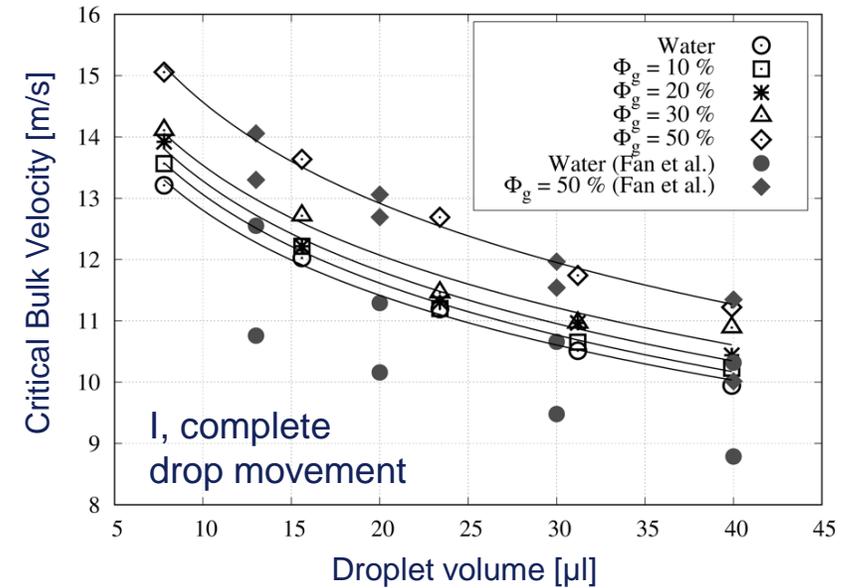
II, tail with sup-drops

I, complete drop movement



rising viscosity

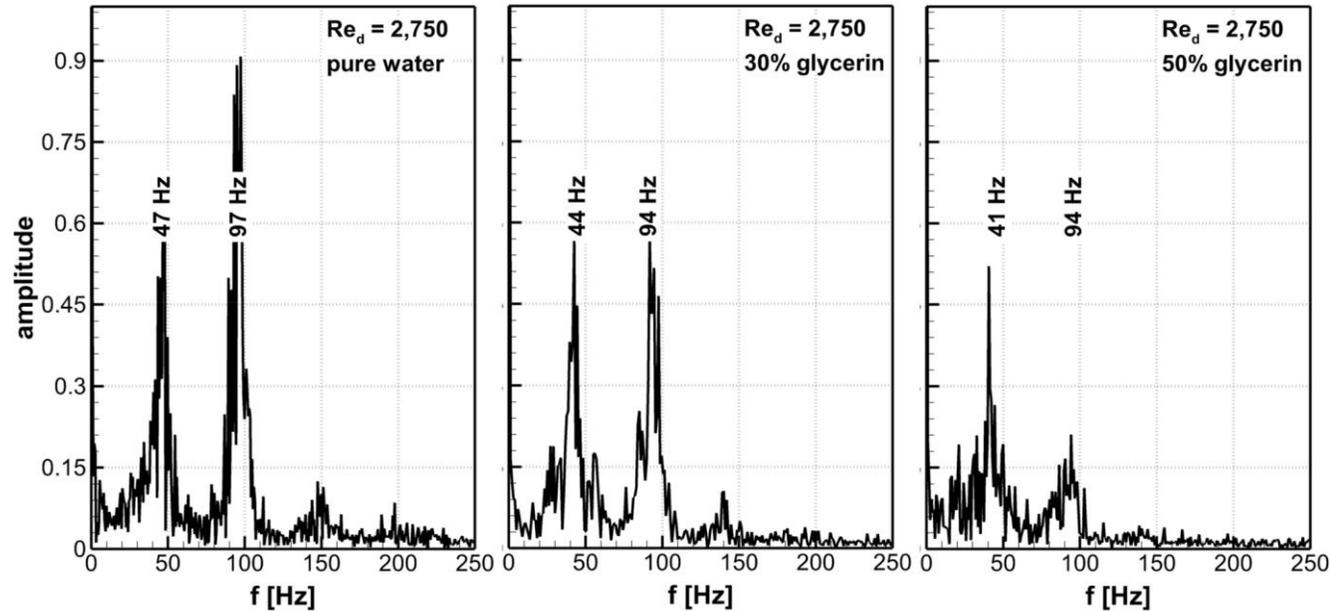
→ Analysis of critical velocity for pattern I



rising viscosity

Barwari B., Burgmann S., Janoske U. (2019) Chem. Ing. Tech. 91 (1), pp. 991-1000

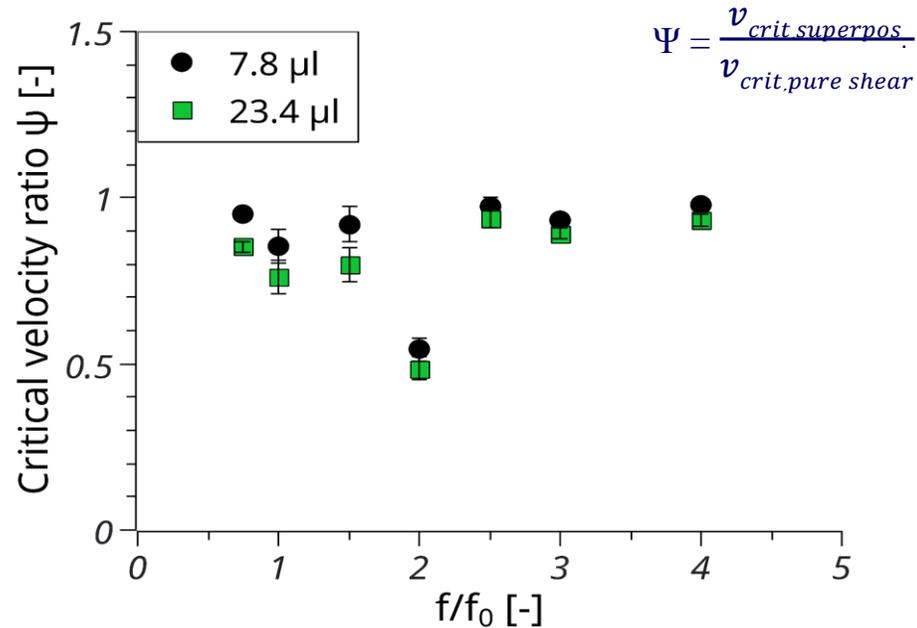
Eigenschwingung des haftenden Tropfens:



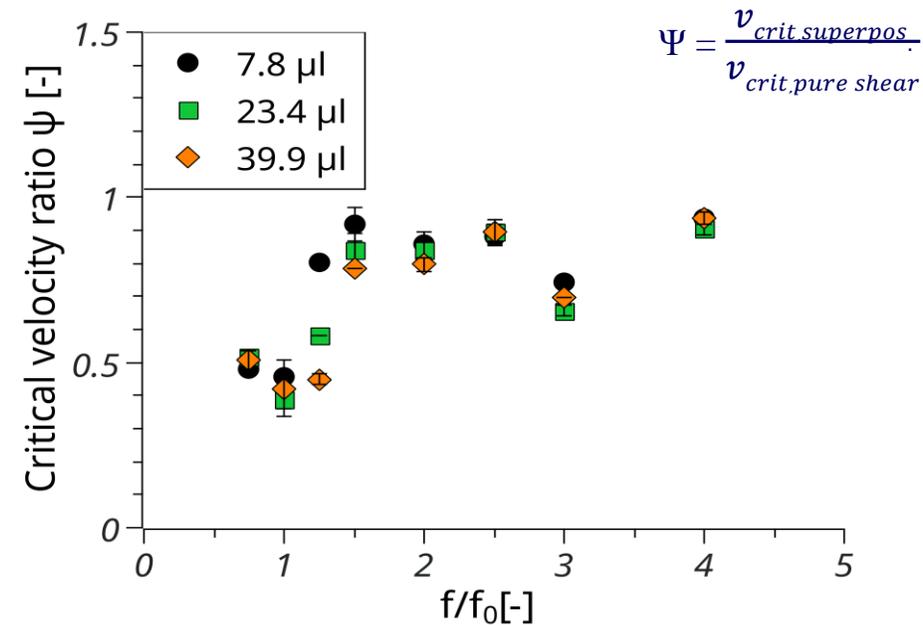
- Two characteristic pattern: up-and-down with 1st EF, back-and-forth with 2nd EF
- increase in the viscosity by increasing the amount of glycerin leads to a damping of the oscillation
- corresponds to an increase in the critical velocity, that is needed to move the drop

Burgmann S., Dues M., Barwari B., Steinbock J., Büttner L., Czarske J., Janoske U. (2021) Experiments in Fluids, 62:47

Vertikale Oszillationsanregung:



Horizontale Oszillationsanregung:

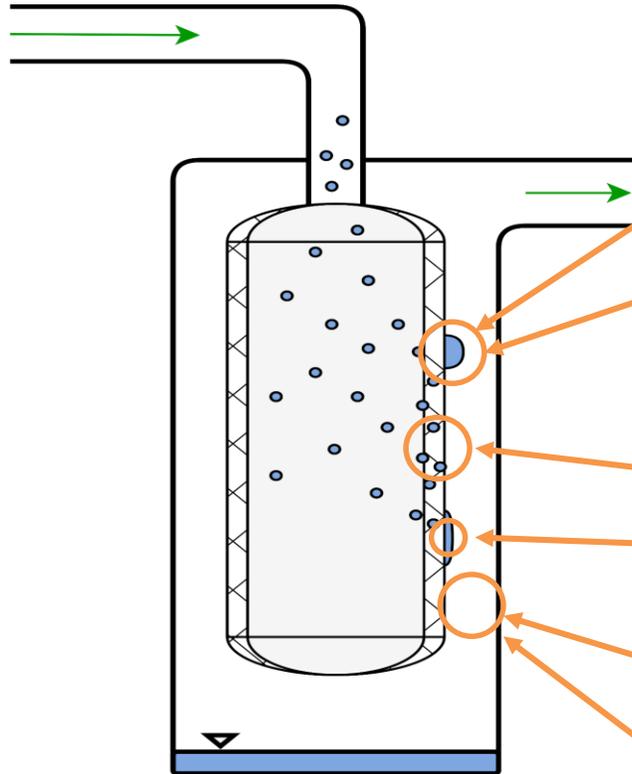


→ Wird mit der „richtigen“ Frequenz angeregt, kann das Ablösen des Tropfens signifikant beschleunigt werden (Faktor 2)!

→ Bei vertikaler Anregung muss die 2. EF, bei horizontaler Anregung die 1. oder 3. EF getroffen werden.

Rohde M., Barwari B., Burgmann S., Janoske U. (2022) International Journal of Multiphase Flow, 155, 104163

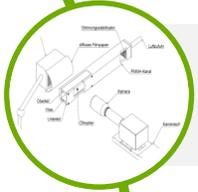
Offene Fragestellungen:



- Welche Tropfengrößen treten auf?
- Welche Effekt hat das Tropfenwachstum?
- Was hat das Vlies (Oberflächenstruktur/Porosität) für einen Einfluss?
- Welche Viskositätseffekte treten auf?
- Welchen Effekt hat die Orientierung der Oberfläche gegenüber Gravitation?
- Kann eine strömungsmechanische Anregung über Störkörper erfolgen?



Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



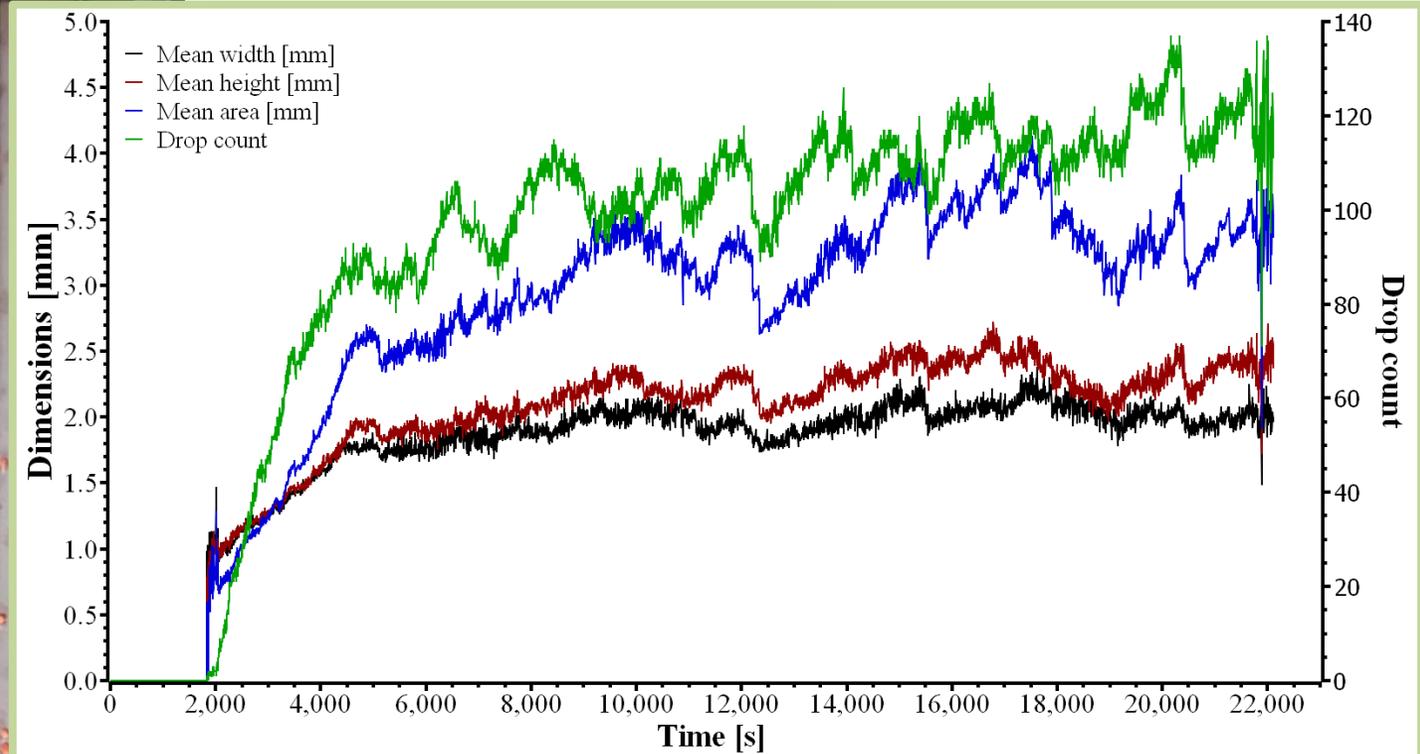
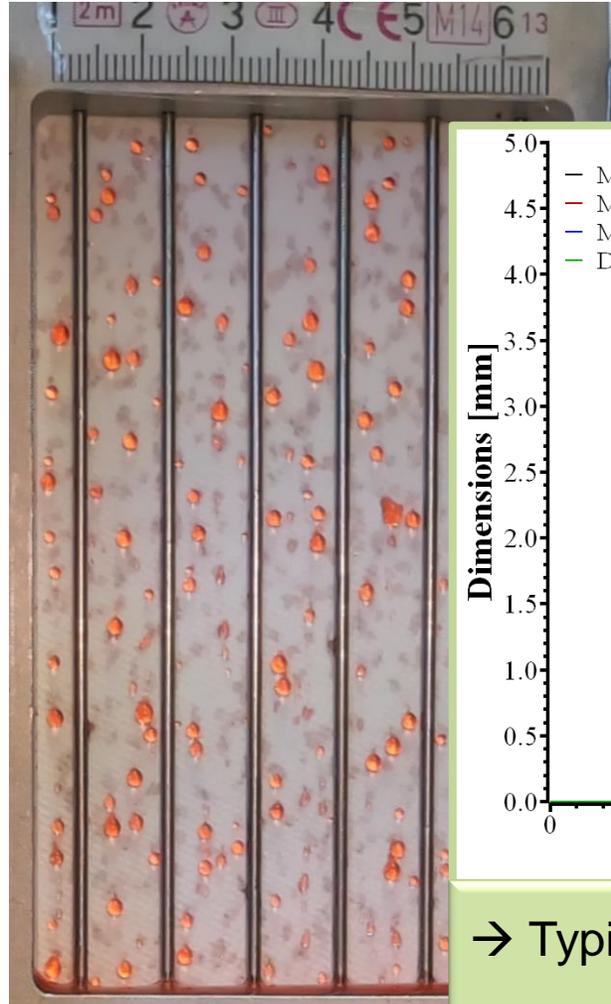
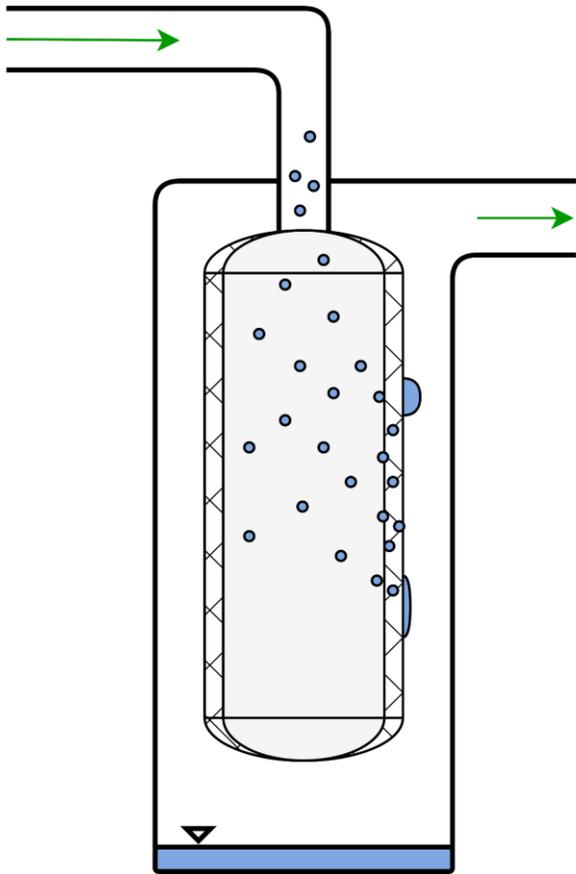
Experimente zur Vibrationsanregung



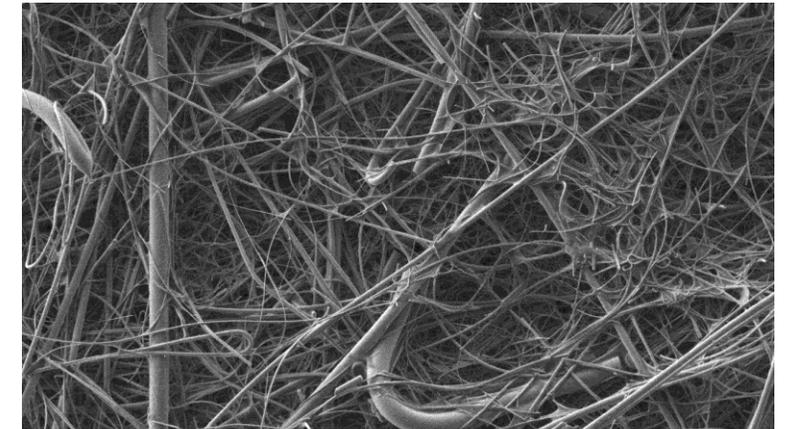
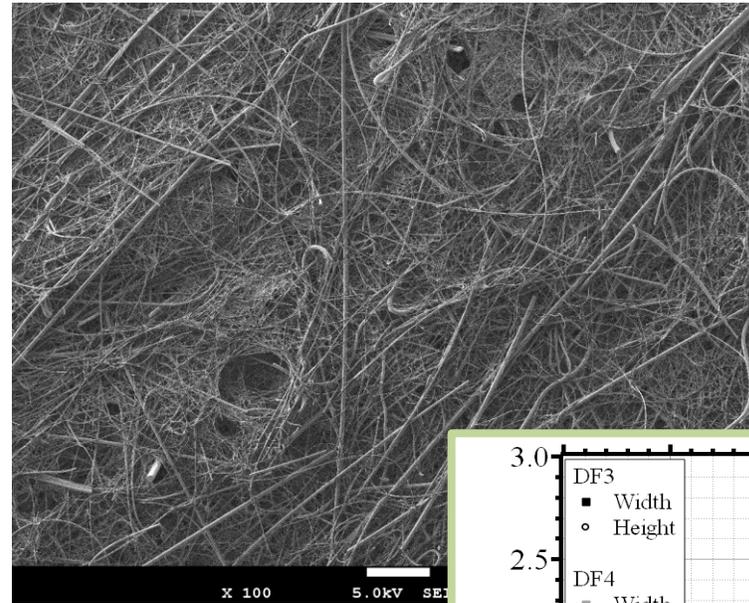
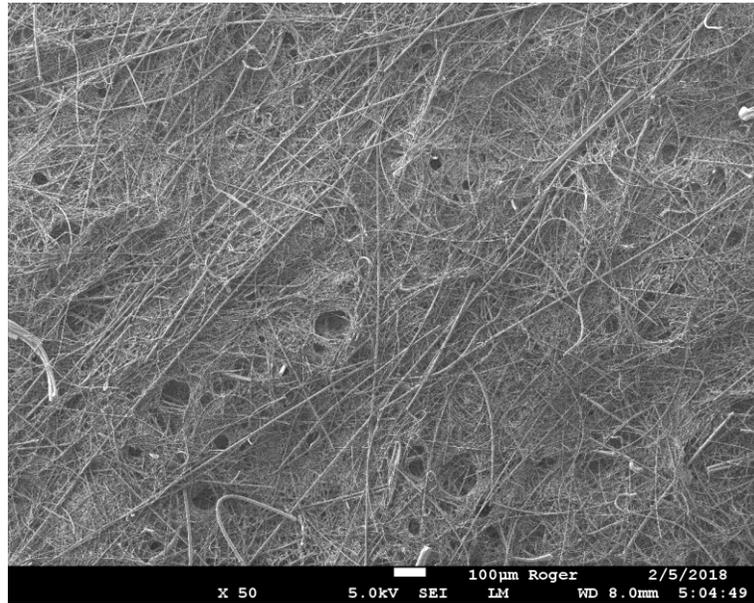
Drainage-Tests



Strömungsschwingung durch Störkörper

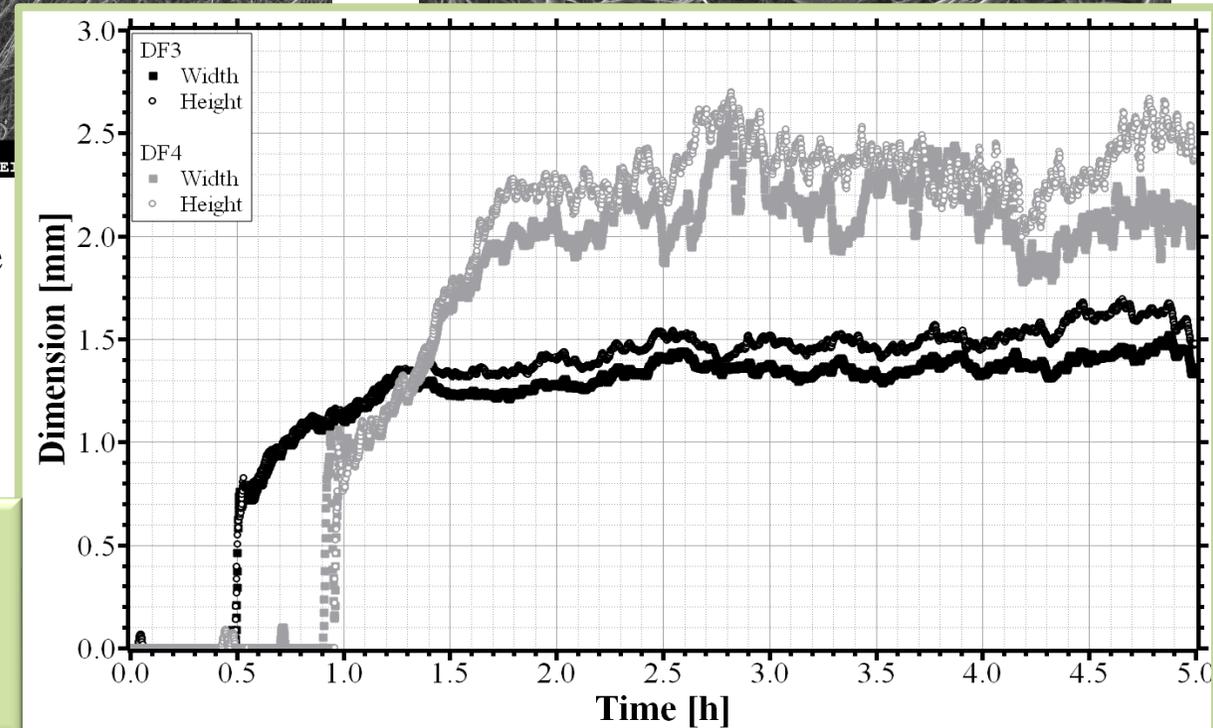


→ Typische Tropfengrößen 5-20 μ l vgl. zu Tropfen aus Voruntersuchungen, aber geringere Benetzung auf Untergrund



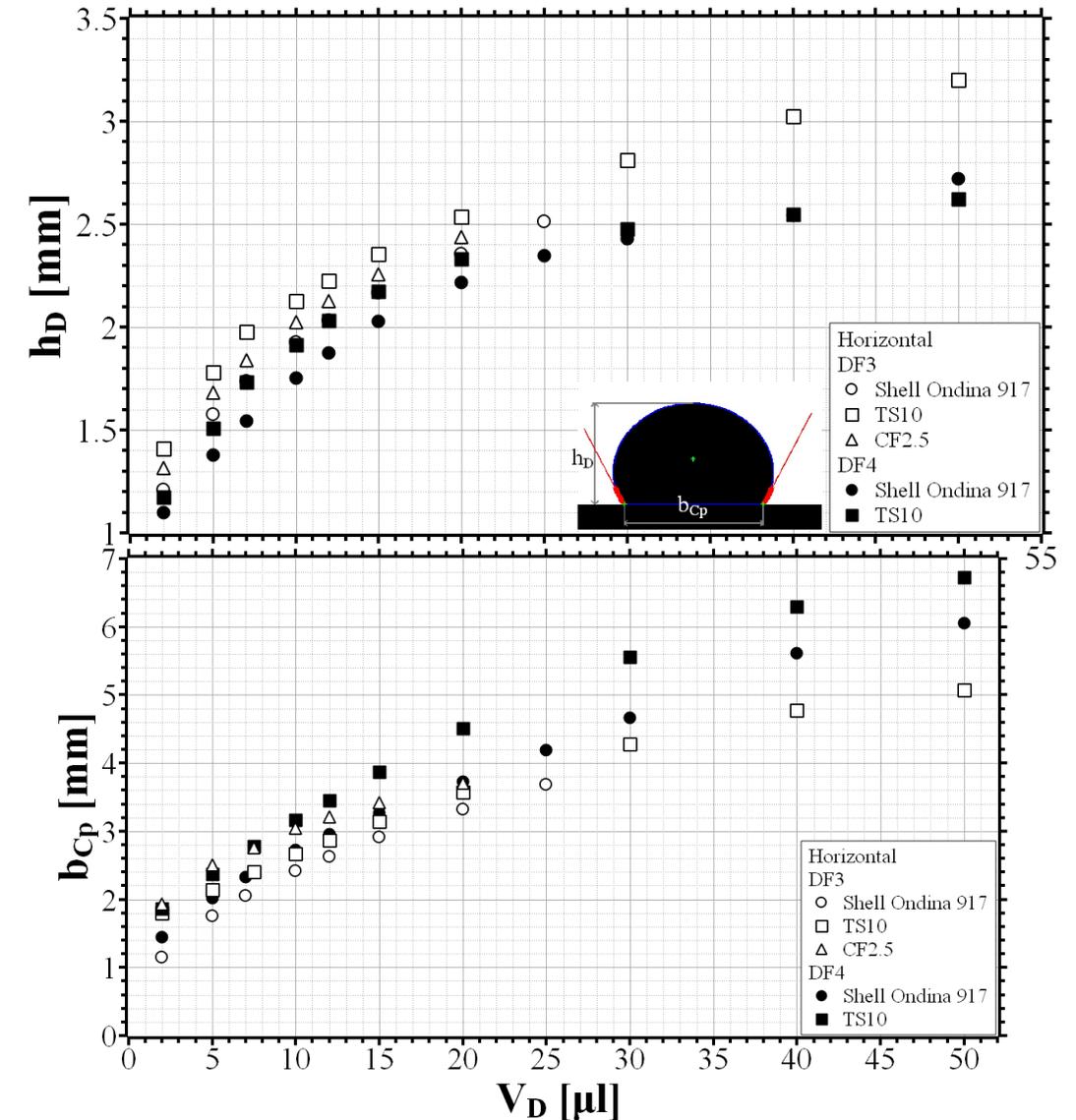
- Low resistance HEPA filter medium composed of borosilicate acrylic resin binder
- Average fiber diameter 1-2µm
- Porosity: 90-99%

Höhere Benetzung auf DF4 → breitere und entsprechend höhere/größere Tropfen möglich als auf DF3



Fluid	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\nu \left[\frac{mm^2}{s} \right]$	$\sigma \left[\frac{mN}{m} \right]$
Corena	868	134.21	33.975
Ondina	854	41.991	33.504
TS10	833	18.0	29.536
Cali. 2.5	821	3.85	32.196
Wasser	998	1.002	72.750

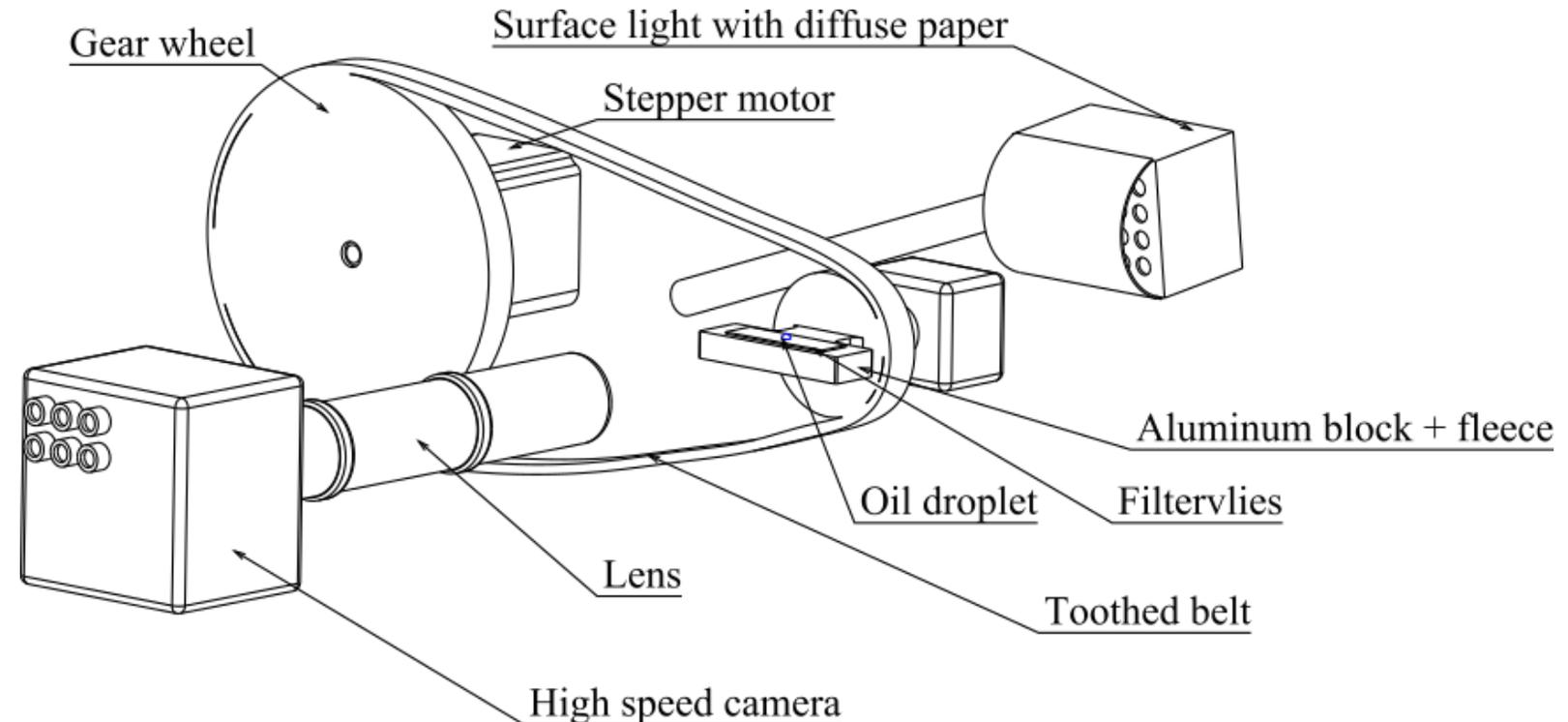
- Öle typischerweise deutlich viskoser als Wasser
- geringere Viskosität führt zu breiteren Tropfen
- DF4 durchgängig mit besserer Benetzung als DF3
- Analyse nach Konvention in horizontaler Orientierung (statische Kontaktwinkel)!



55

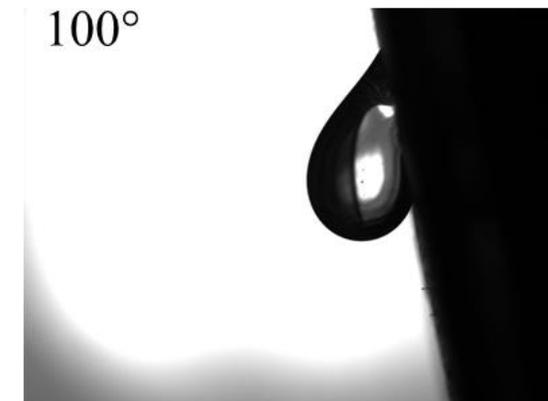
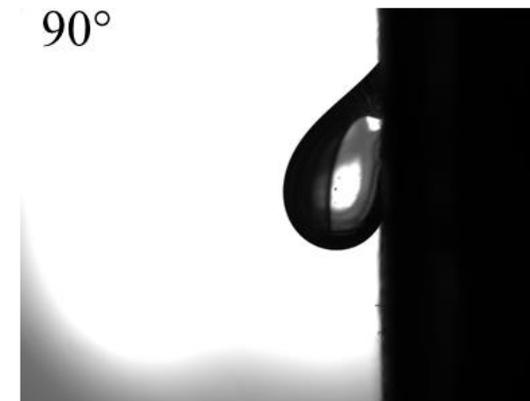
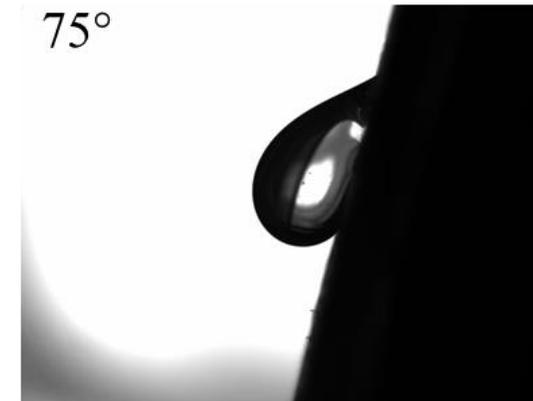
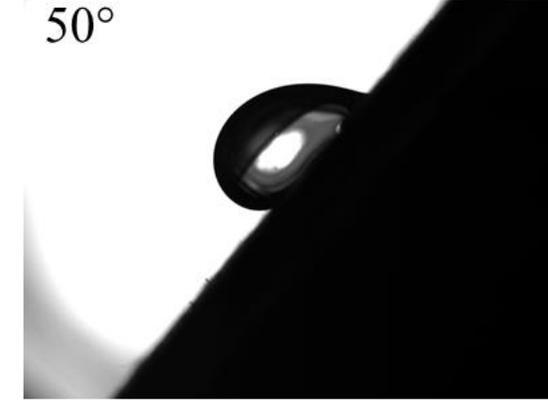
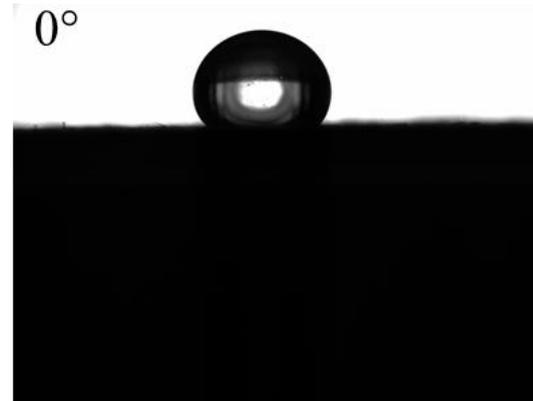
Neigerversuch zur Bestimmung der dynamischen Kontaktwinkel:

- Rotation by stepper motor
- Recording with transmitted light method
- Measurement of the drop geometry
 - Drop height
 - Contact point width
 - Contact angle
 - Area
 - Volume (rotationally symmetrical)



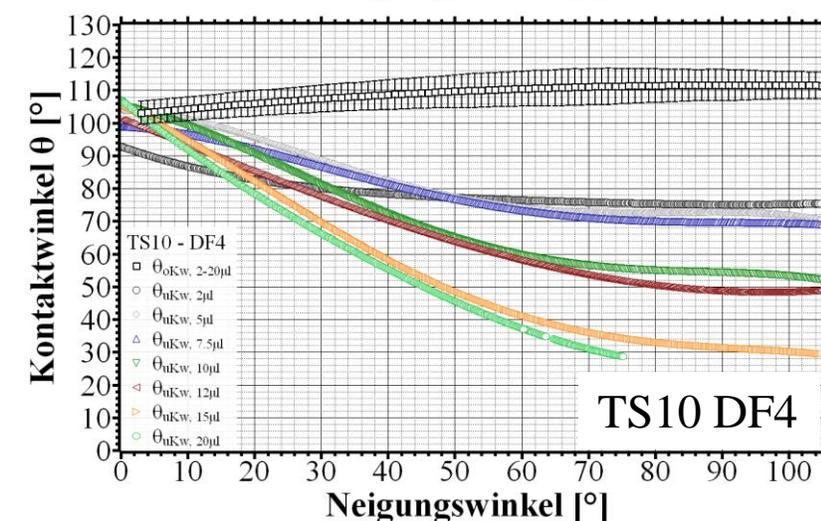
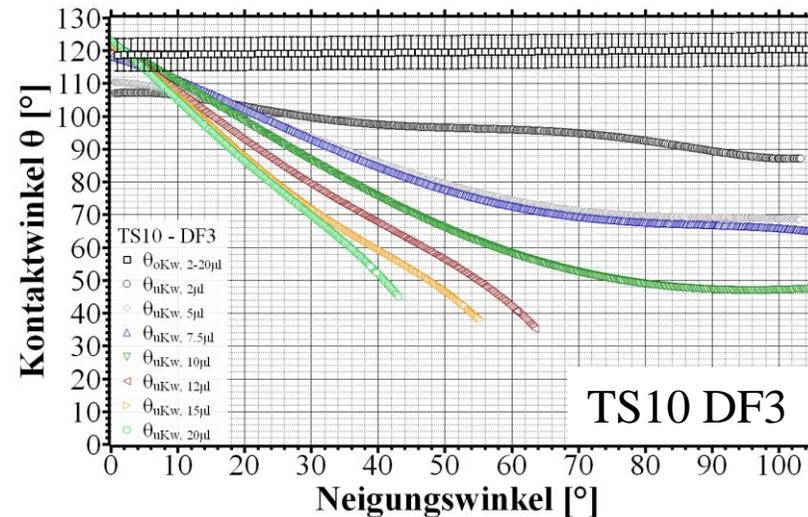
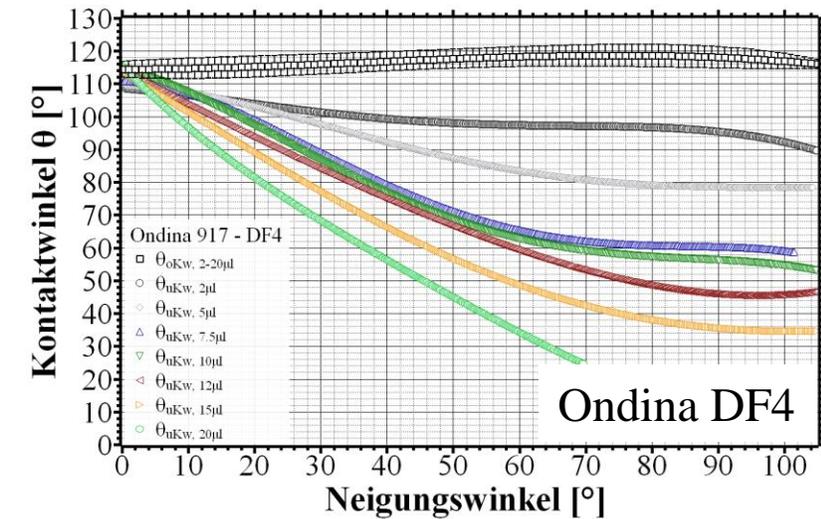
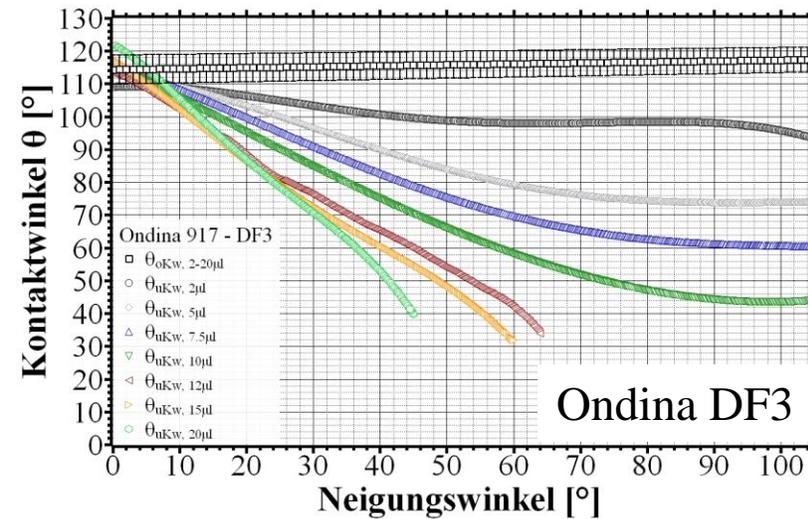
Neigerversuch zur Bestimmung der dynamischen Kontaktwinkel:

- Typisches “Hängen” der Tropfen bei Annäherung an 90° und teilweise darüber hinaus,
- Kontaktfläche vergrößert sich gegenüber statischem/horizontalem Fall



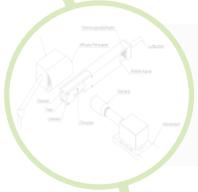
Neigerversuch zur Bestimmung der dynamischen Kontaktwinkel:

- kleinere Tropfen (bis 10 μ l) haften durchgehend auch über 90° hinaus
- Bessere Benetzung bei DF4 (erst 20 μ l-Tropfen reißen ab)
- Ergebnisse bzgl. krit. Volumen bei Tropfenabriss passend zu Versuchen am IUTA-Prüfstand





Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



Vibrationsanregung und kritische Geschwindigkeit



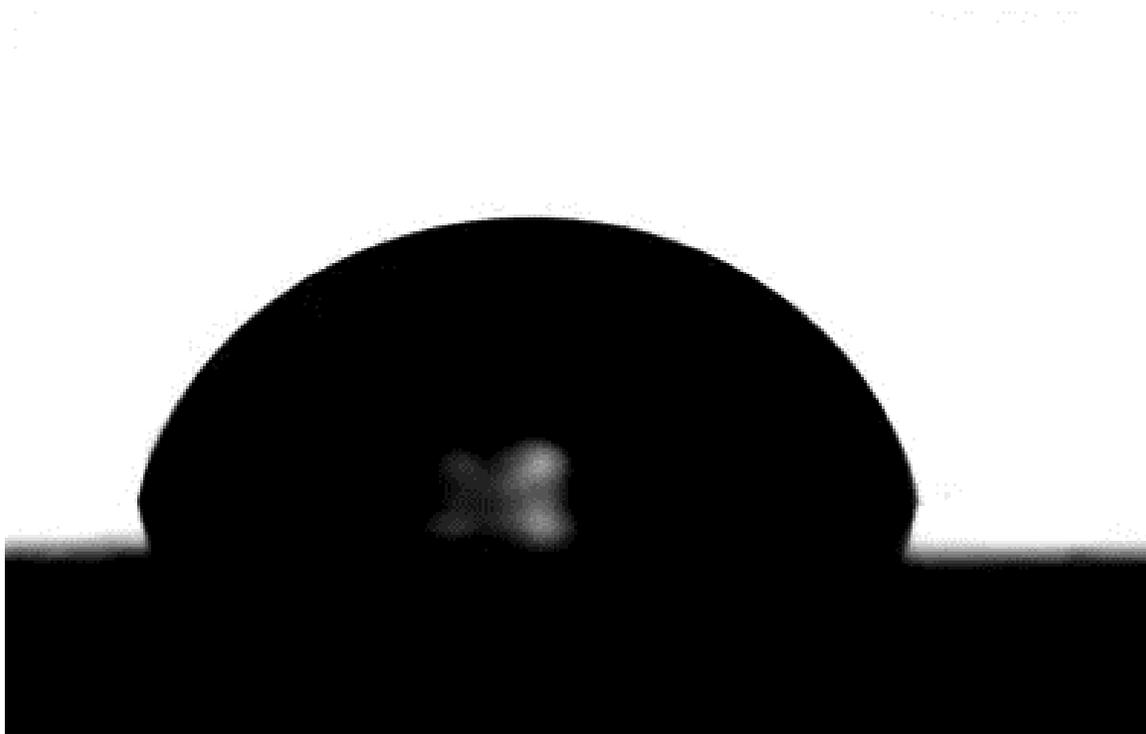
Drainage-Tests



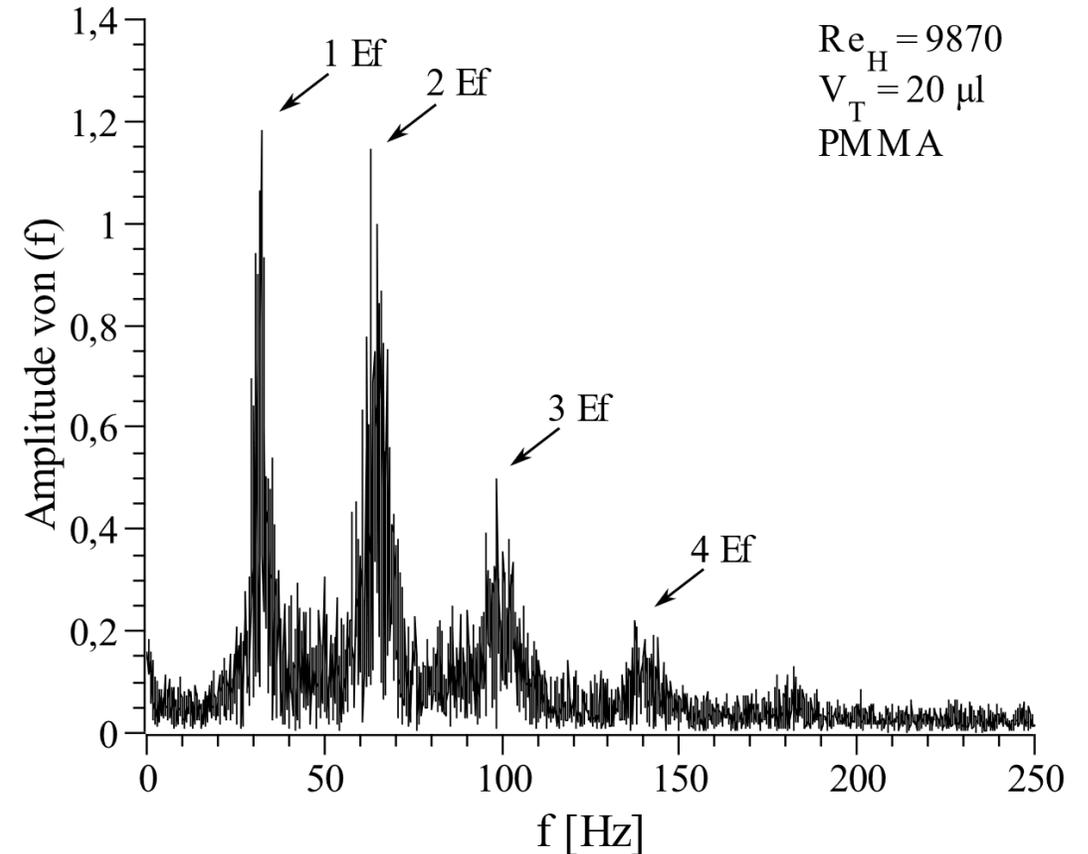
Strömungsschwingung durch Störkörper

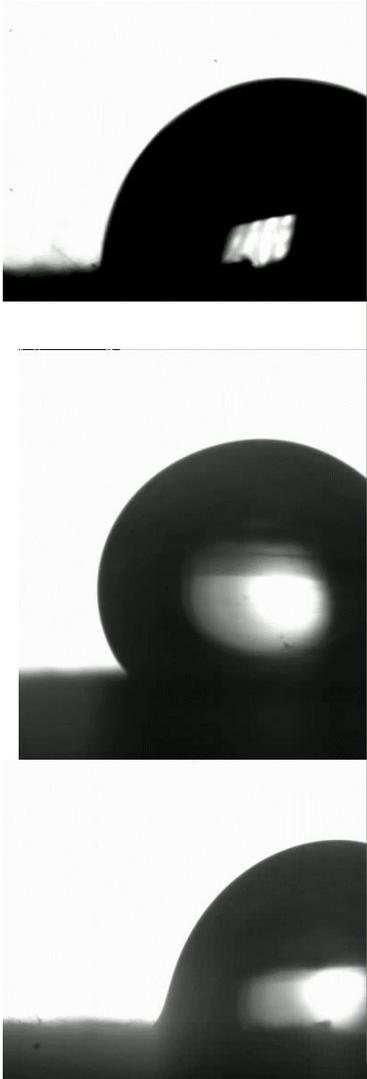
Bestimmung der Eigenfrequenzen:

Ziel ist die Bestimmung der Eigenfrequenzen der typischen Öle zur gezielten Anregung zwecks Tropfenablösung
Typisches Vorgehen: Anströmung des Tropfens und FFT der Kontouroszillation (hier: Wasser)



Water: 15 μ l

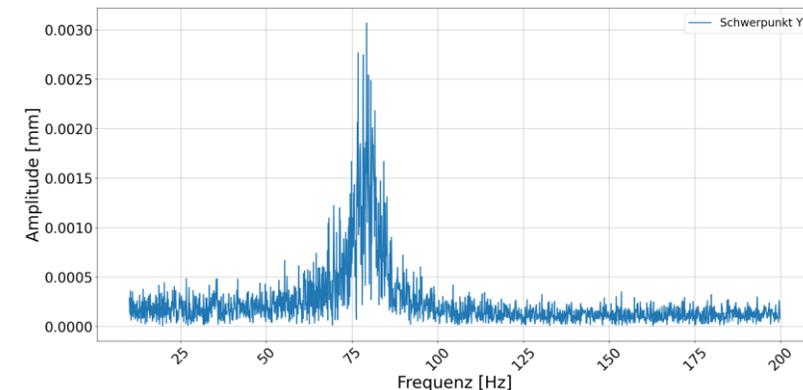
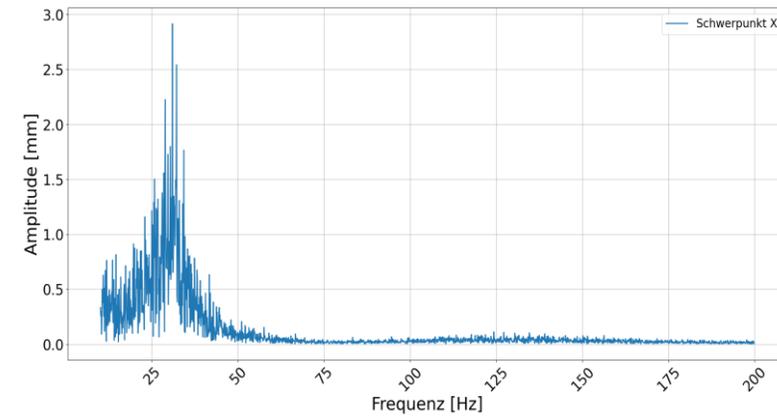
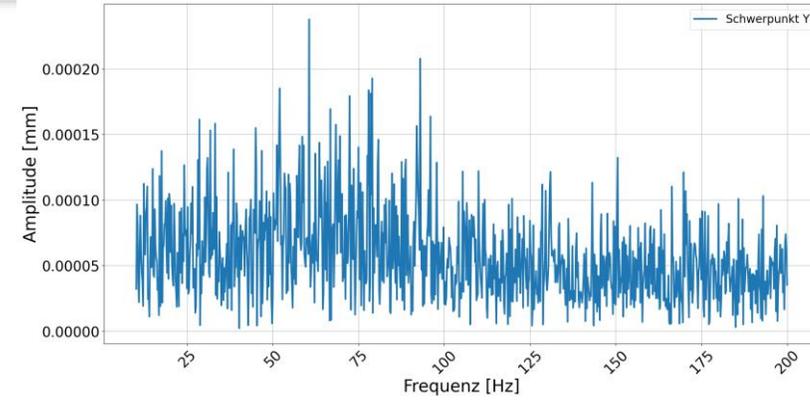




Problem:

- Bei hohen Viskositäten des Öls ist die Dämpfung so stark, dass keine EF bestimmbar ist
- Aber: bei normalen Betriebstemperaturen (80°) sinkt auch hier die Viskosität deutlich in den Bereich von z.B. TS10 oder Cali. 2.5
- Hohe Temperaturen können nur auf dem Anströmungsversuchsstand nicht eingestellt werden, daher Verwendung einer anderen Methode

Frame rate: 2000fps



$$\text{Ondina } \nu \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]$$

20°C 42

40°C 18

100°C 3.7

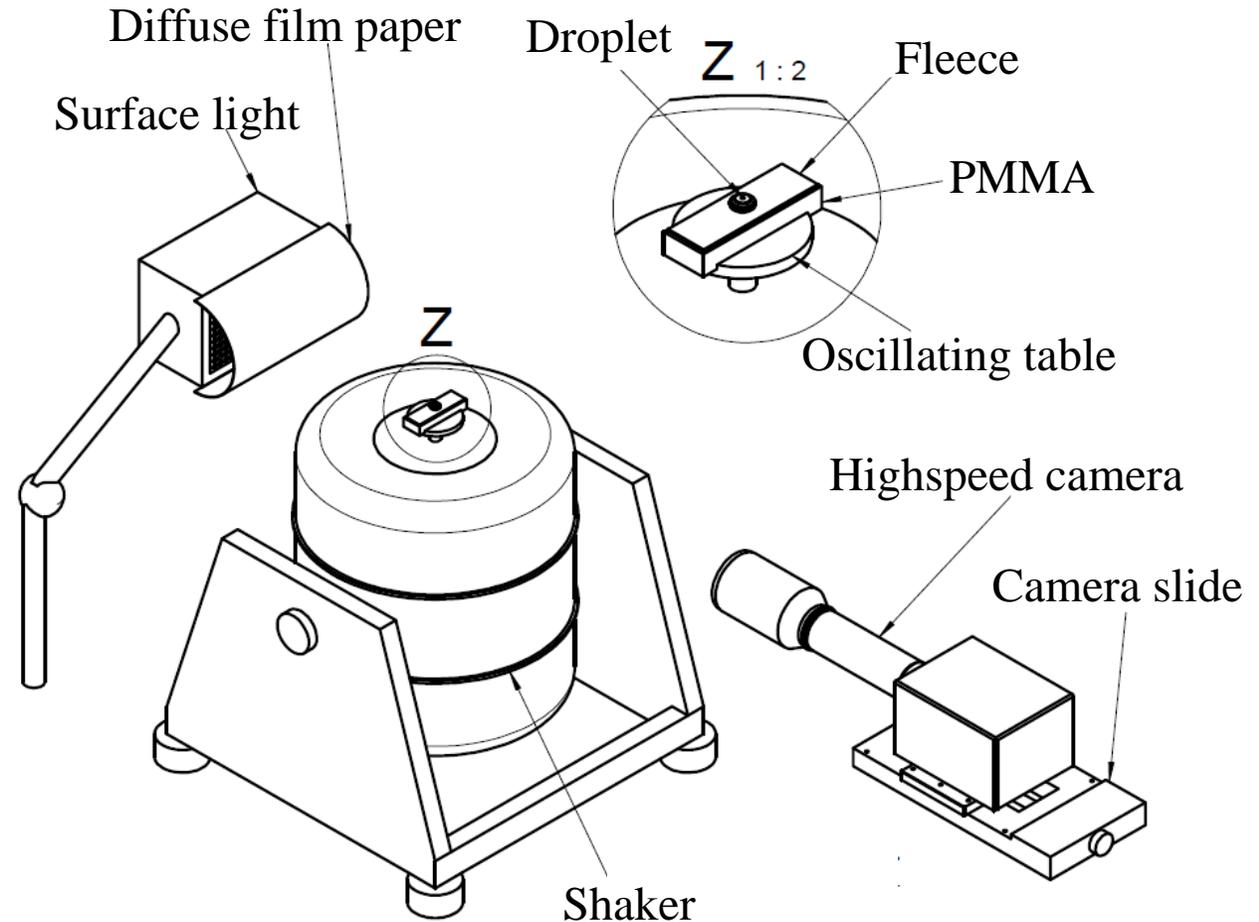
Vgl. bei
20°C

TS10 18

Cali. 2.5 3.85

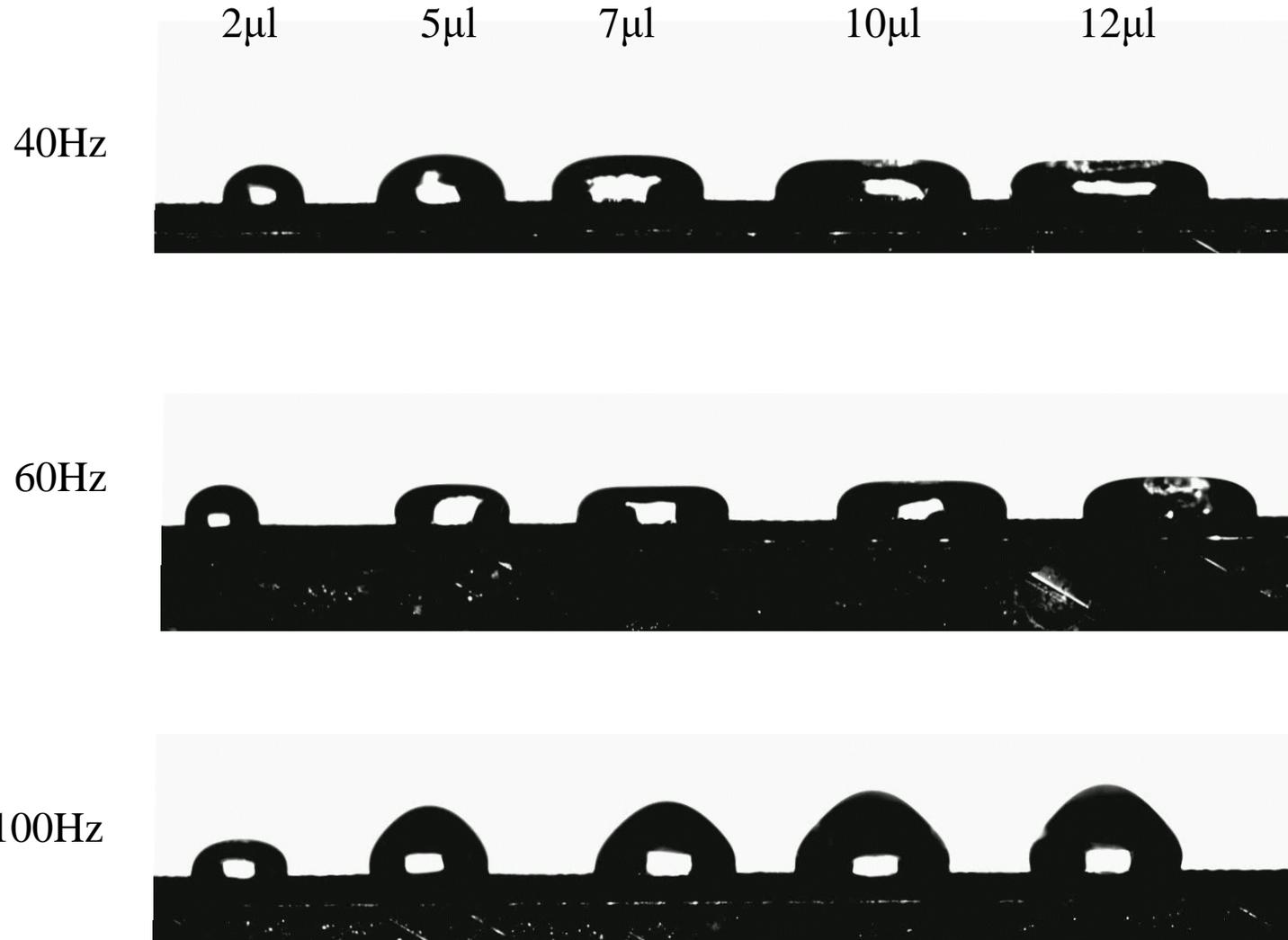
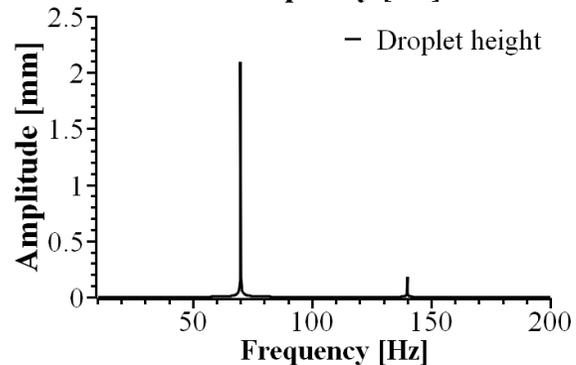
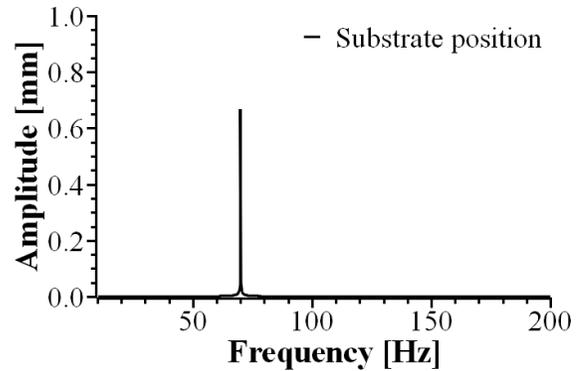
Bestimmung der Eigenfrequenzen/Resonanz über mechanische Anregung:

- Investigation of droplet behavior during oscillation
- Determination of the Eigenfrequency
- Droplet application with a syringe or pump
- Excitation: $f = \text{const.}$ and $a = \text{const.}$
- Repeat for frequency range
- Ratio: h_{max}/h_{end}
- Recording: 4s with 2000 fps



Bestimmung der Eigenfrequenzen/Resonanz über mechanische Anregung:

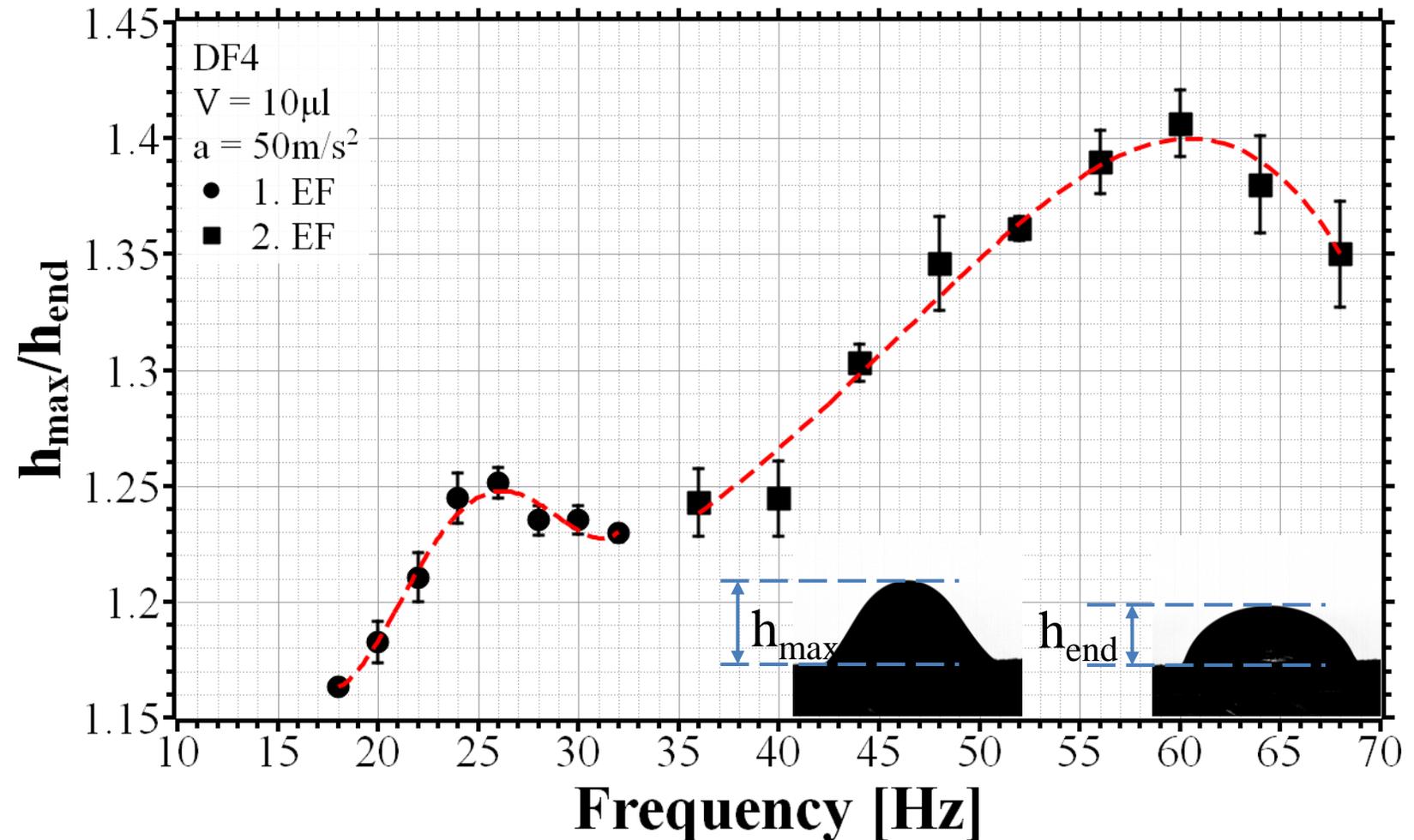
Beispiele für Tropfenschwingung bei unterschiedlicher Anregungsfrequenz:



Bestimmung der Eigenfrequenzen/Resonanz über mechanische Anregung:

- Ratio: maximum drop height to drop height after excitation as a function of excitation frequency with the same acceleration
- Peak points correspond to the eigenfrequencies
- Tested on DF3 and DF4 with different drop volumes and accelerations
- No difference in eigenfrequency as a function of acceleration. Only the shape of the curve
- The higher the acceleration, the greater the contact point width after excitation

Einsinken des Tropfens!

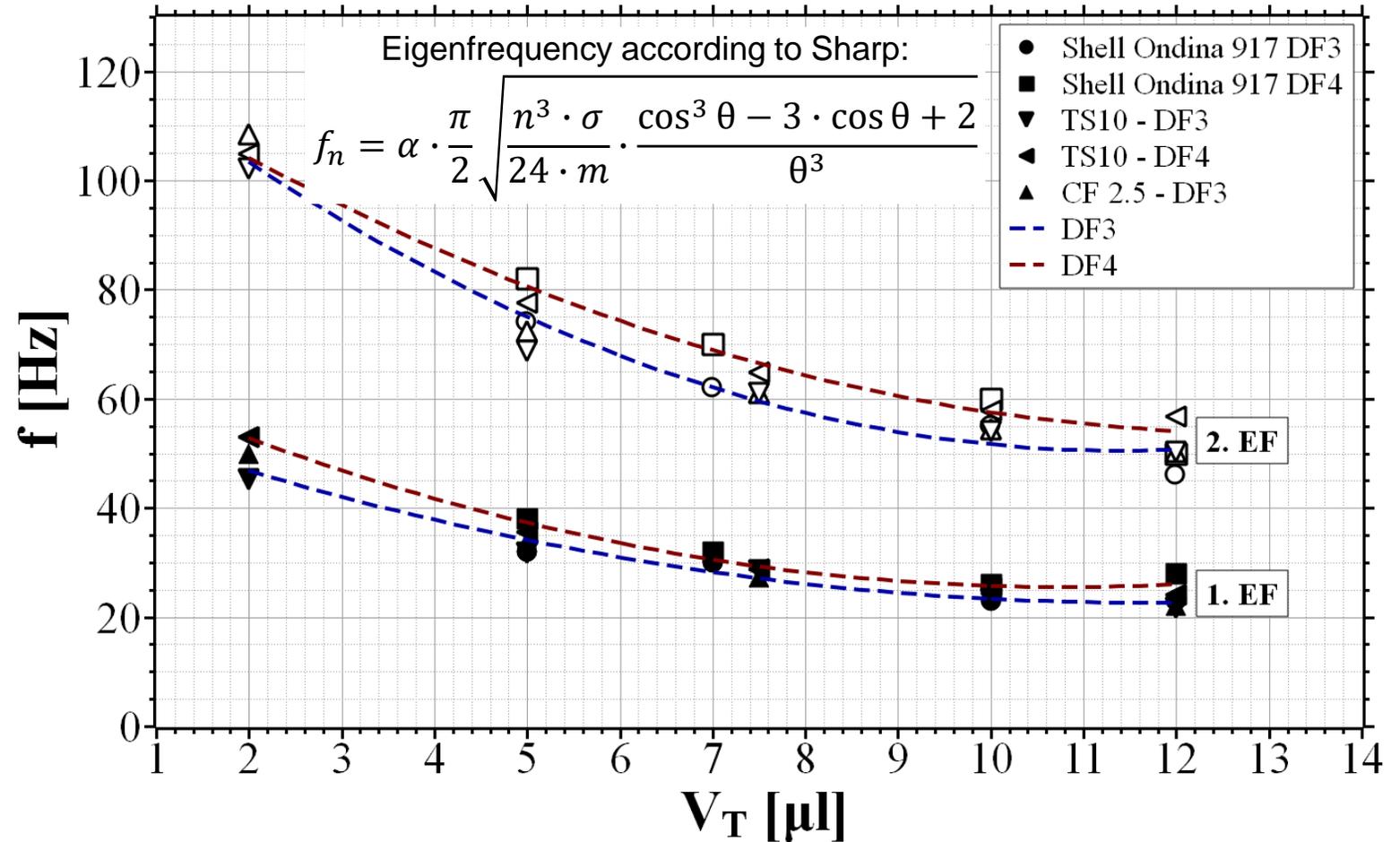


Bestimmung der Eigenfrequenzen/Resonanz über mechanische Anregung:

- Eigenfrequencies are slightly below the theoretical solution
- For water $\alpha = 0.81$ is suitable for the first Eigenfrequency
- Better suited for oil: $\alpha_{1.EF} = 0.6488$ and $\alpha_{2.EF} = 0.7634$
- Material properties at 20°C

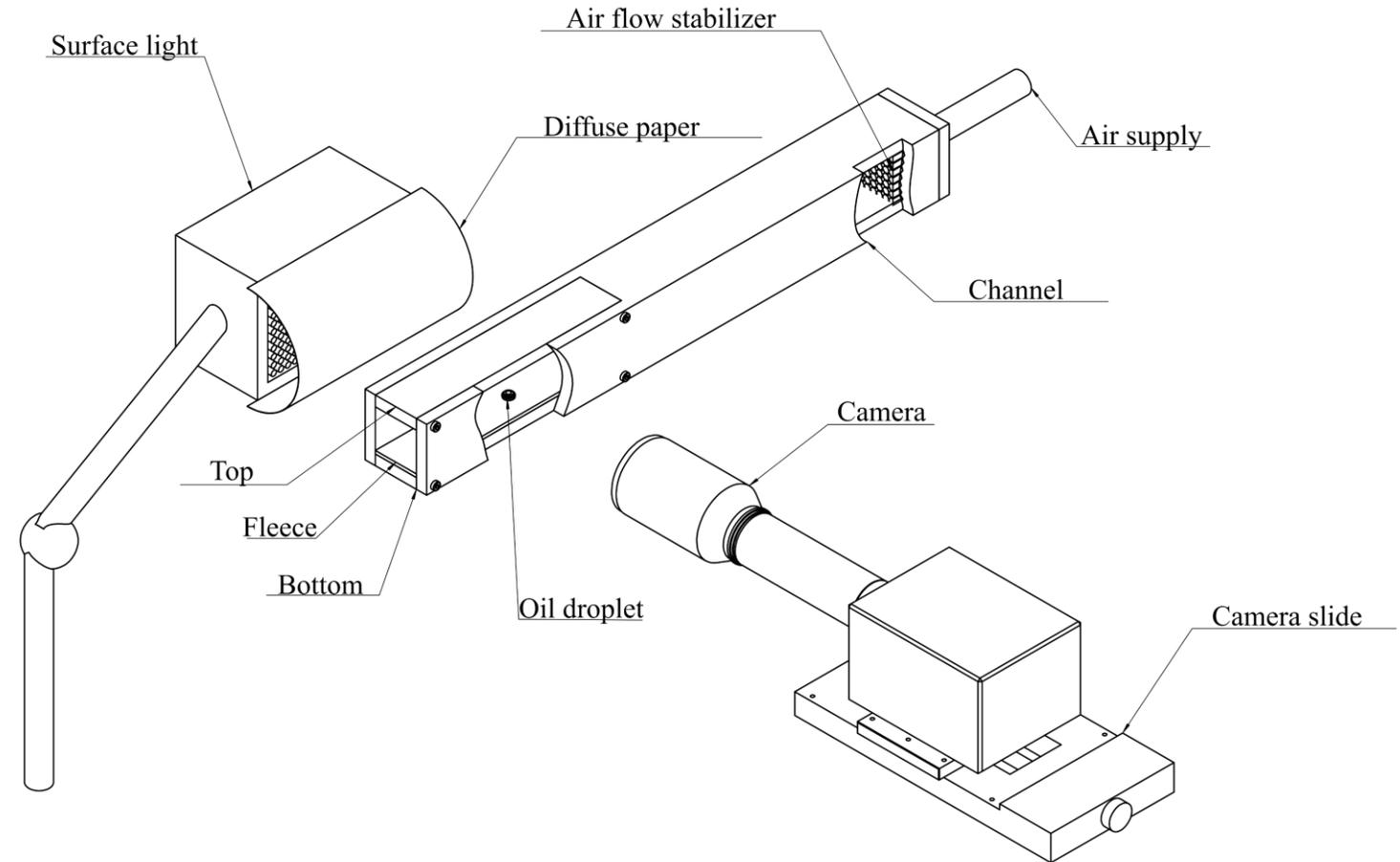
Fluid	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\nu \left[\frac{mm^2}{s} \right]$	$\sigma \left[\frac{mN}{m} \right]$
CF2.5	821	3.85	32.196
TS10	833	18	29.536
Ondina	854	41.991	33.504
Water	998	1.002	72.75

Passt auch zur Theorie (für glatte Substrate und niedrige Viskositäten)!

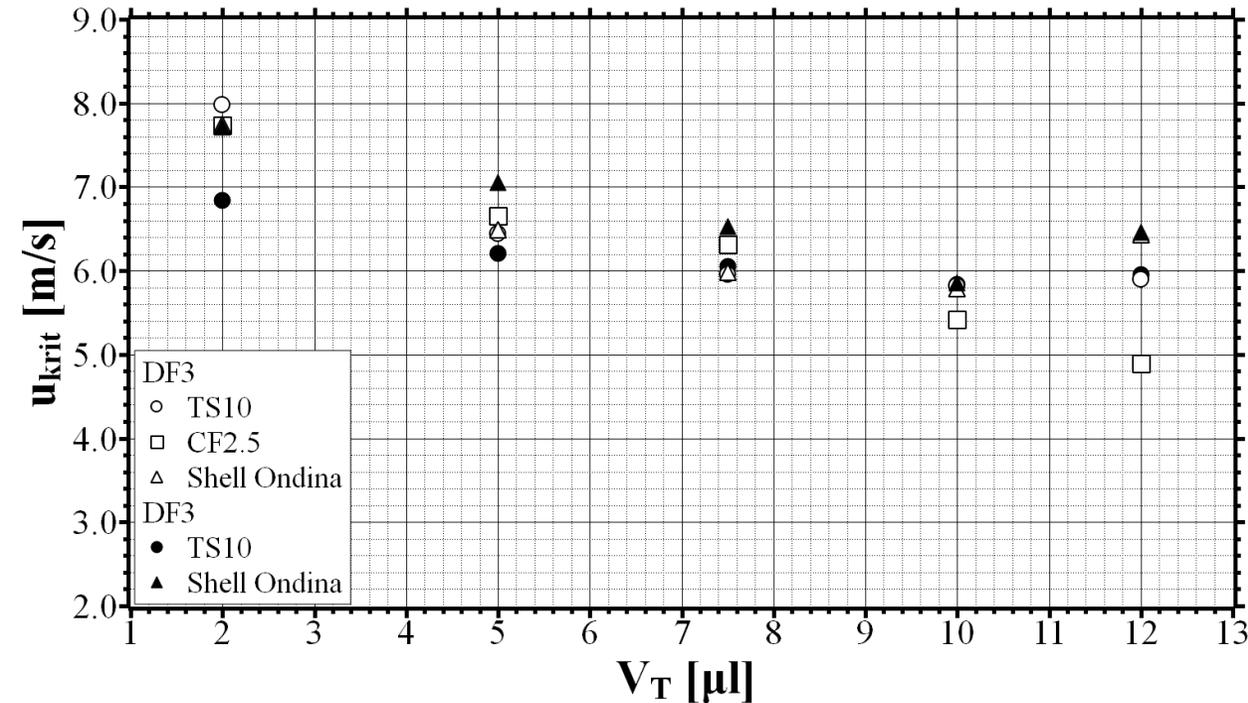
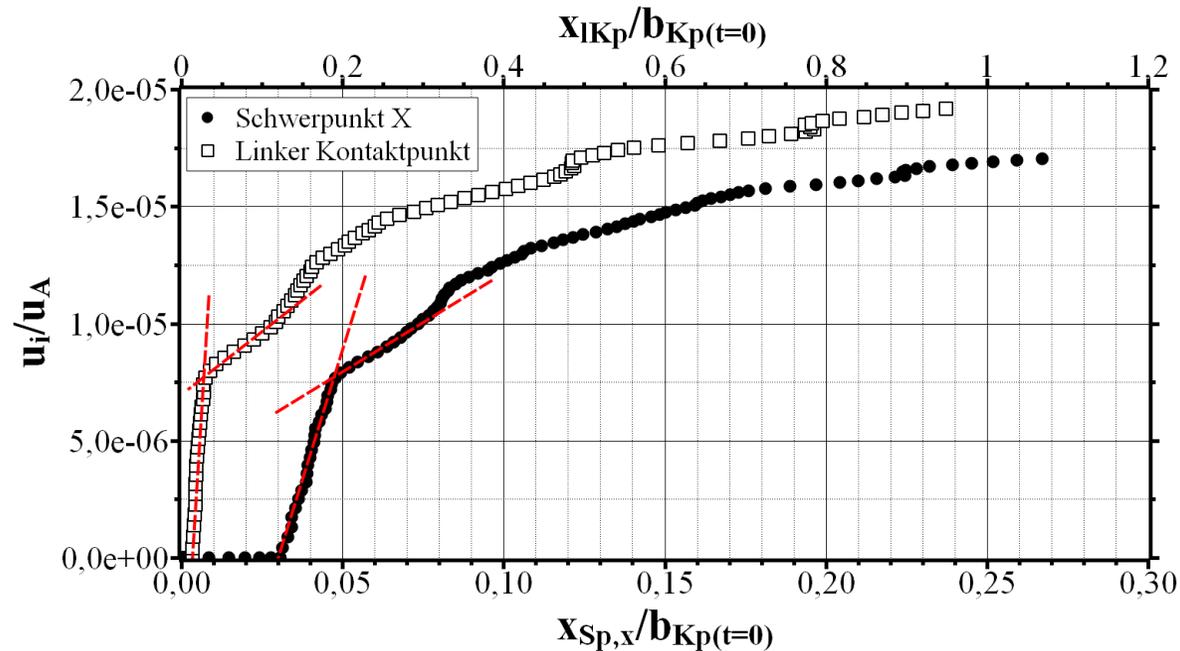


Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit:

- Incoming flow of the droplet
- Acquisition of the contour with a high-speed camera
- Any inclination possible
- Run-Length
- Laminar
 $L = 0.06 \cdot D \cdot Re$ (Tietjens)
- Turbulent
 $L = 25 - 50 \cdot D$
 $L = 0.39 \cdot Re^{1/4} \cdot d$



Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit:



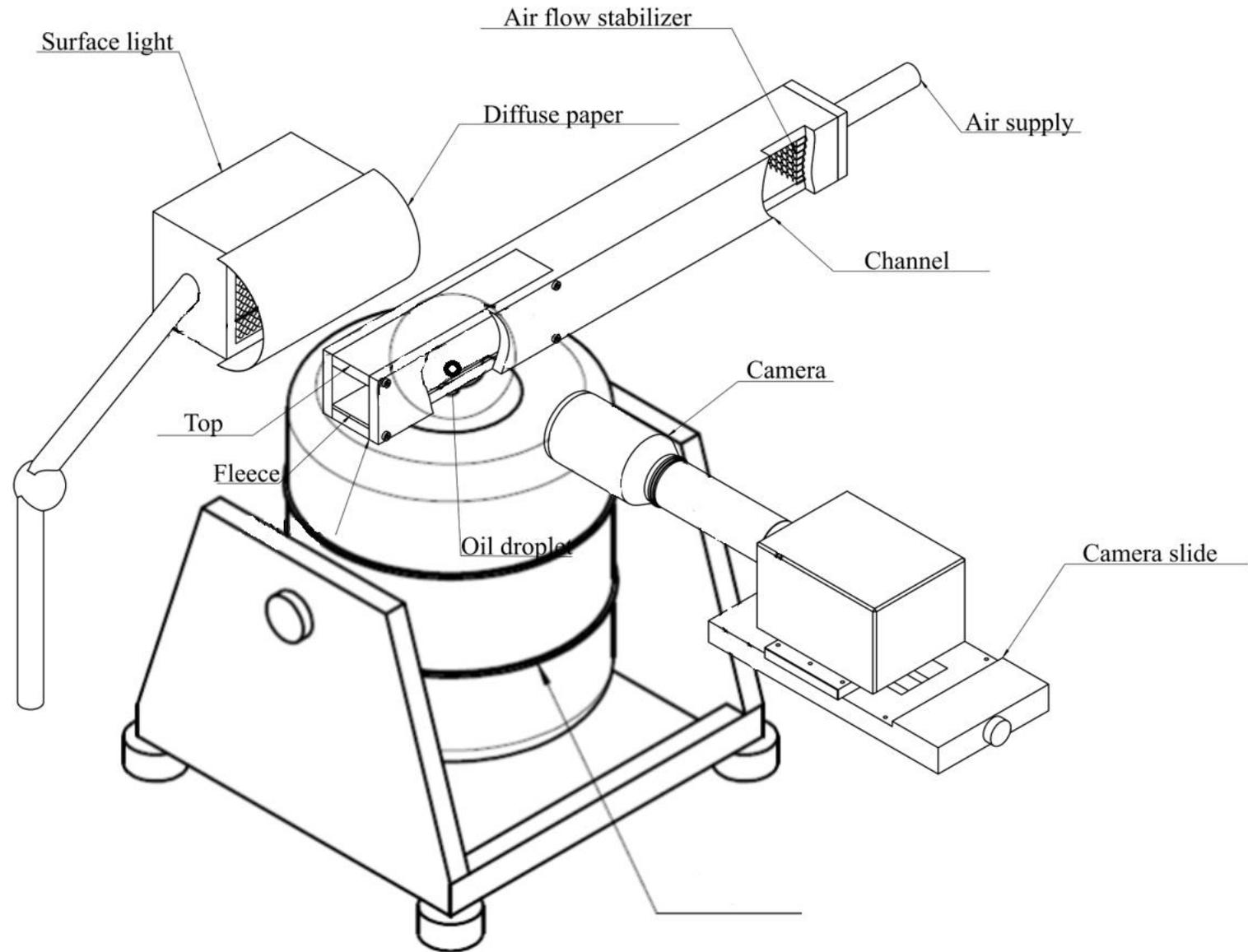
TS10, 12 μ l
DF4
100-500 l/min
120 fps



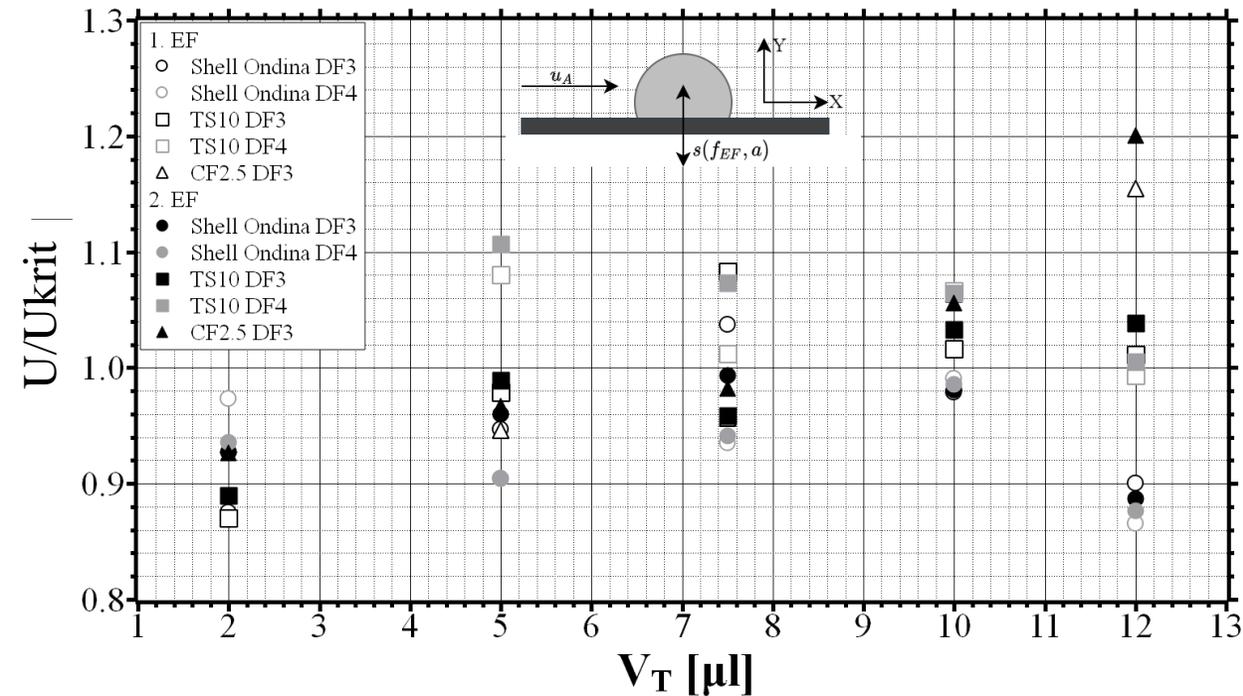
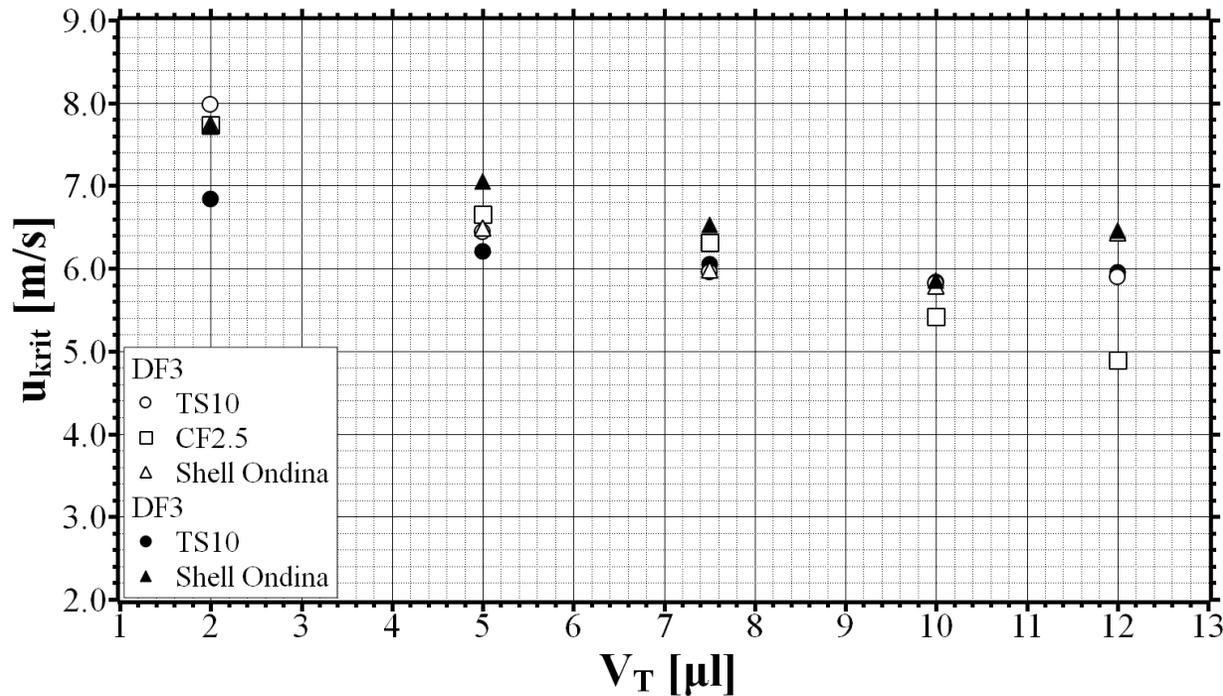
Durch das Langziehen der Tropfen kein eindeutiges Loslaufen mehr – Bewegung des linken Kontaktpunkts aber schon relativ früh!

Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit bei Vibrationsanregung:

- Vibration excitation in vertical direction for 1st and 2nd EF
- Defined incoming flow of the droplet by massflow controller
- Acquisition of the contour with a high-speed camera



Bestimmung der kritischen Geschwindigkeit bei Vibrationsanregung:

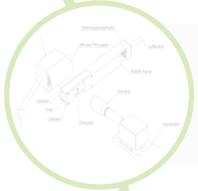


- Vibration excitation for 1st and 2nd EF
- Averaged, the vertical excitation has no influence
- Better wetting by vertical excitation \rightarrow horizontal may be better

\rightarrow Umbau auf vertikalen Versuchsstand, bei dem dann auch in Gravitationsrichtung, d.h. aber dann „horizontal“ angeregt wird.



Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



Vibrationsanregung und kritische Geschwindigkeit

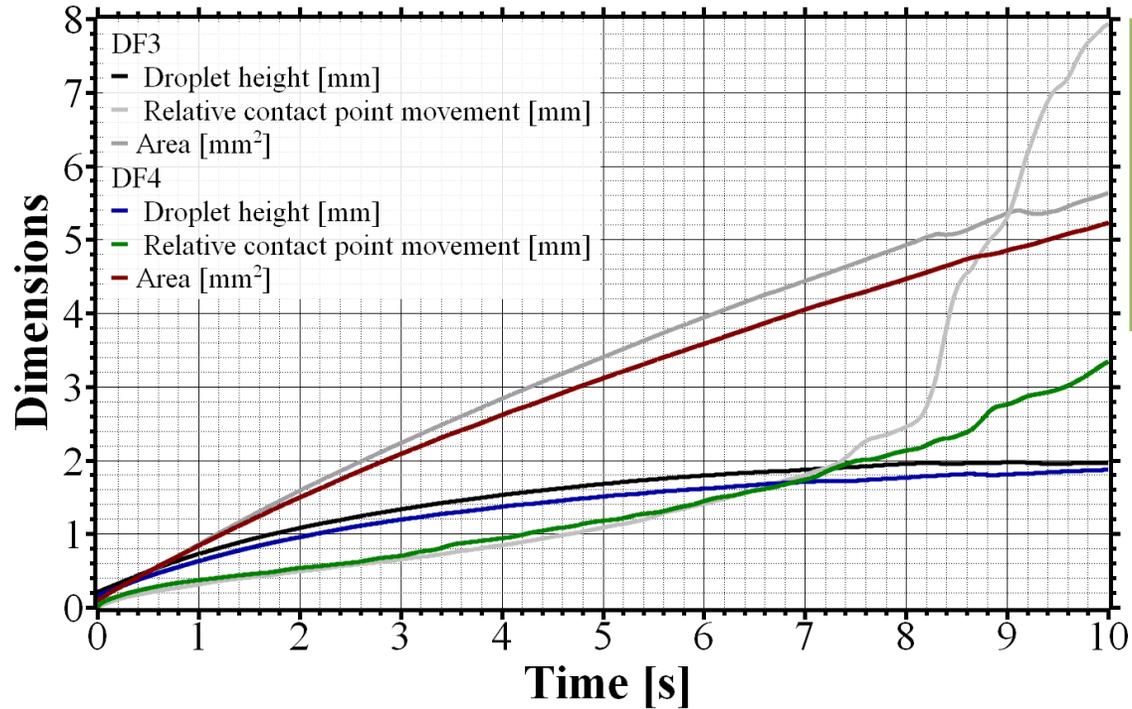


Drainage-Tests



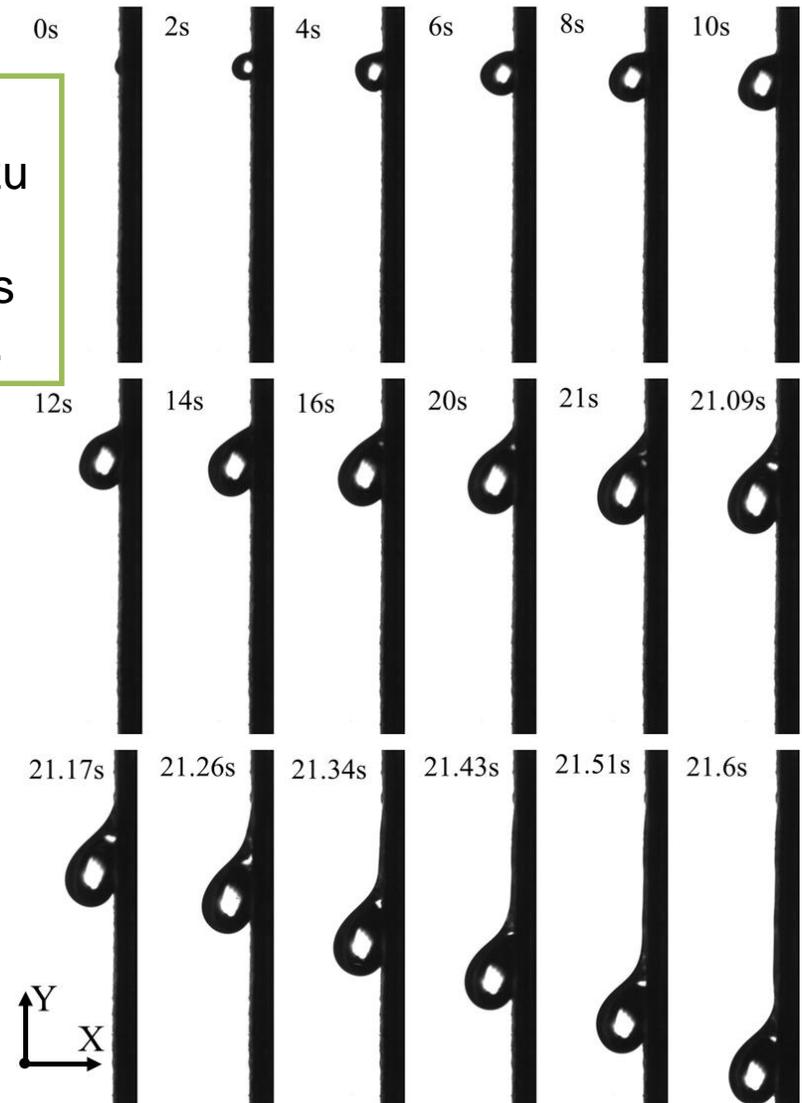
Strömungsschwingung durch Störkörper

Ablösen nur durch Gravitation:

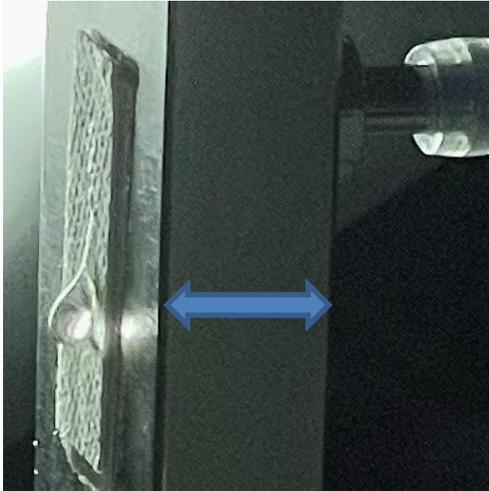


Volume bei Ablösen passt zu Visualisierungsergebnissen aus IUTA-Prüfstand.

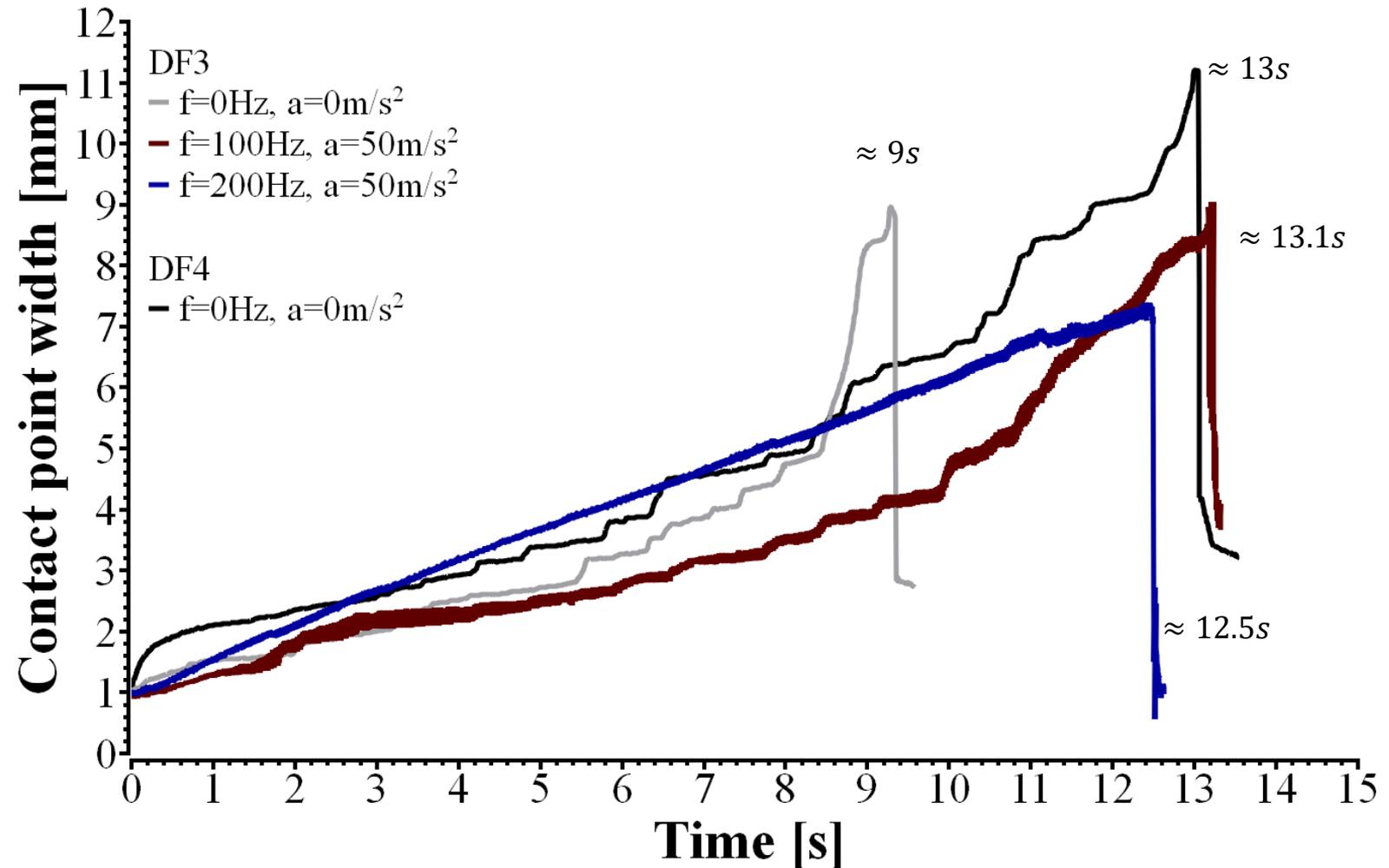
- Dimensions of the oil droplets from 10 tests each as a function of time
- Almost the same relative contact point movement up to approx. 7.4s
- DF3 is more oil-repellent → shorter run-off times compared to DF4
- Lower height with DF4, due to better wettability

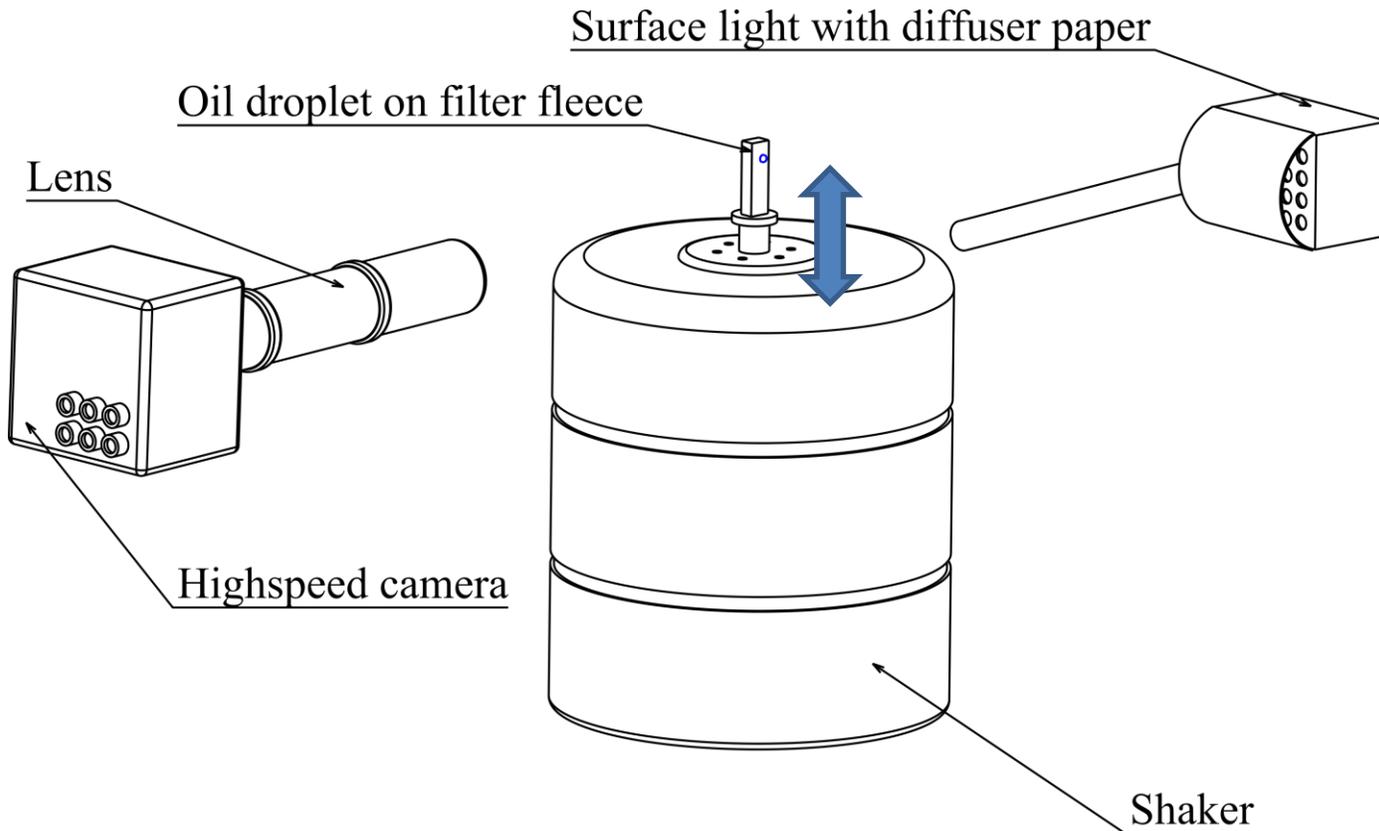


Wachsendes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:



- Continuous volume flow until draining/detaching
- Measurement of drop geometries during growth to drainage
- Clear detection in case of detachment
- Vibration lässt die Tropfen erst später loslaufen – Vibration in Vliesnormalenrichtung ungünstig!



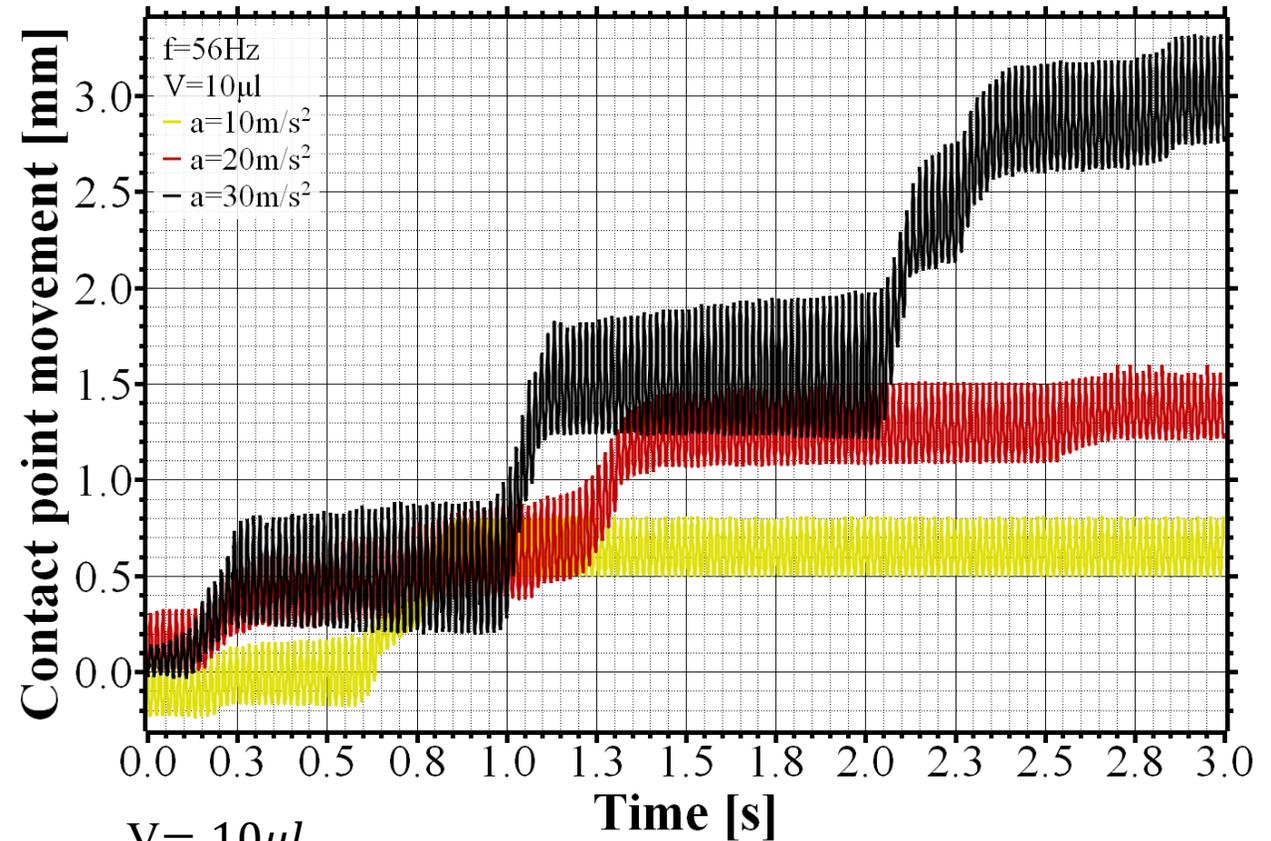


- Anregung jetzt also nicht in Vlies-Normalenrichtung, sondern „horizontal“ (d.h. in Gravitationsrichtung)



Kontantes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:

- Droplets with constant volume
- Oscillation in direction of gravitation (in-plane of the vertically oriented fleece)
- Low acceleration at 56Hz
- Droplet moves downwards due to vibration
- Without vibration, the droplet adheres to the same position
- Positiver Effekt wie erhofft!



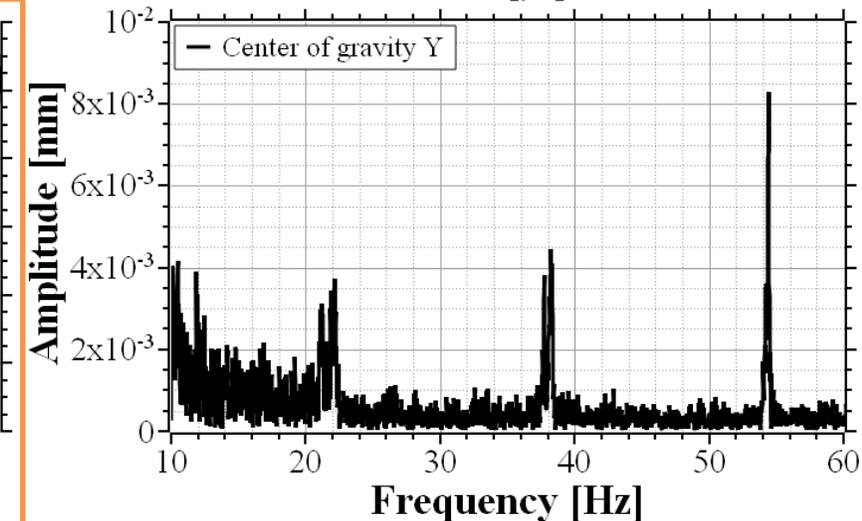
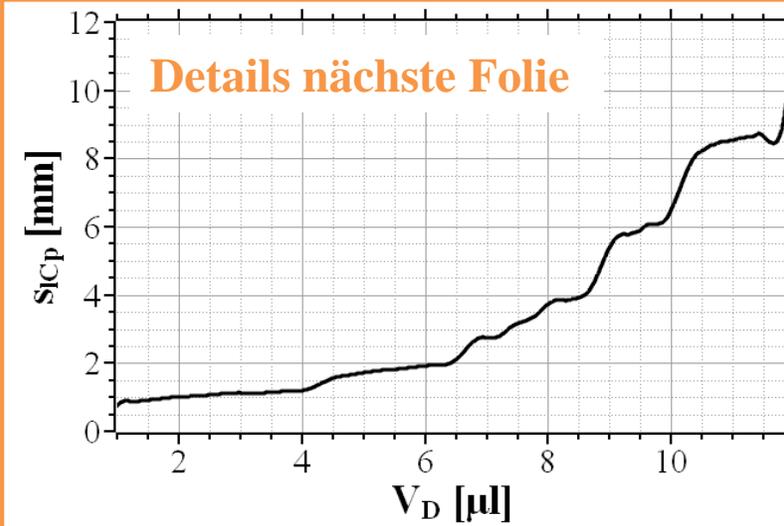
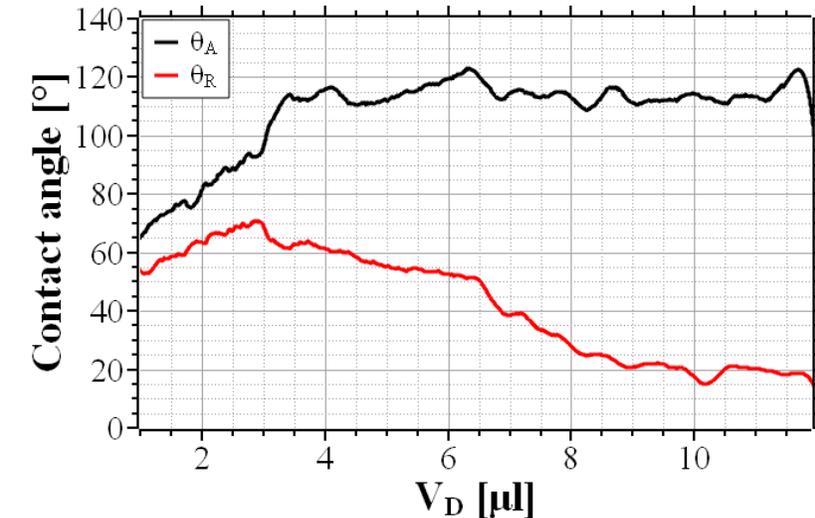
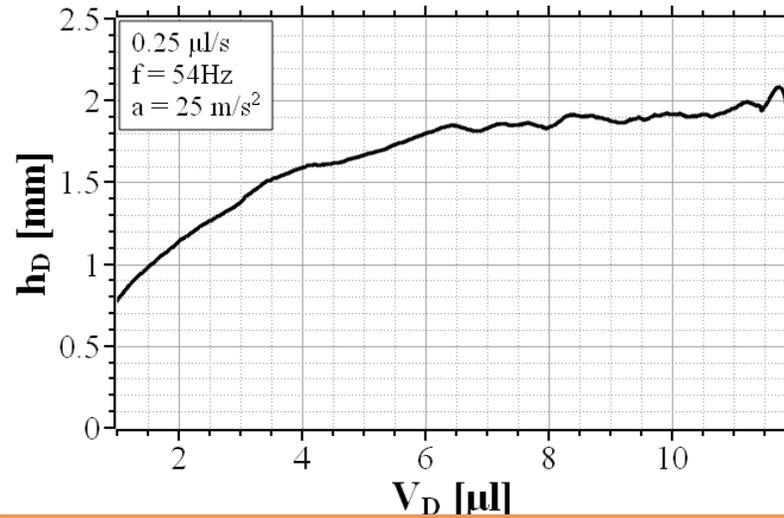
$V = 10\mu\text{l}$

100 fps

56Hz, $a = 50\text{m/s}^2$

Wachsendes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:

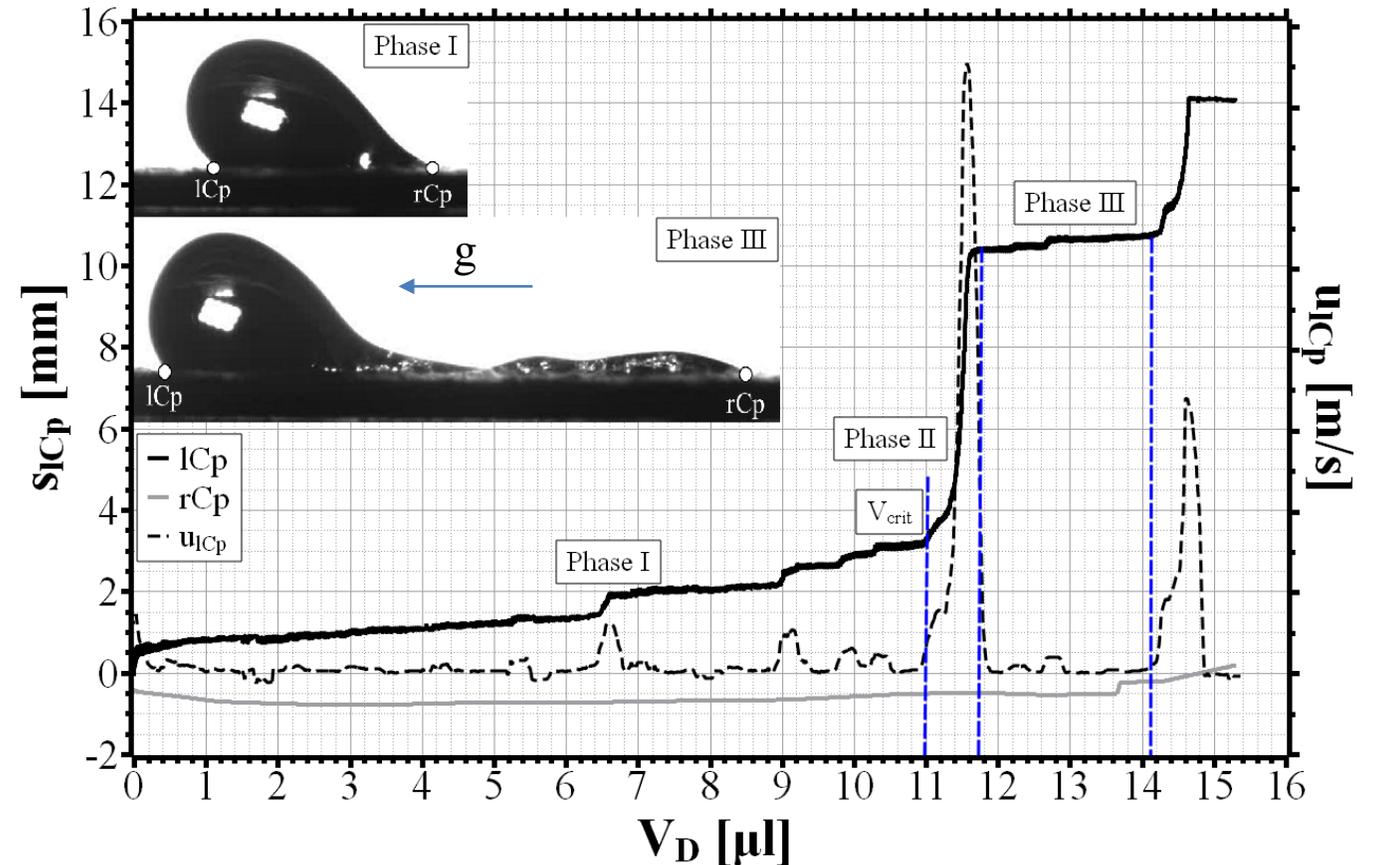
- Drop height increases and reaches a plateau
- The contact angles increase as soon as the droplet tilts due to gravity and gravitational force Advancing θ_A remains almost constant and receding θ_R decreases
- The contact point moves slowly until the volume is large enough and the drop runs off faster
- Ohne Vibration läuft der Tropfen erst deutlich nach 10 μ l los – mit Vibrationsanregung deutlich eher (Frequenz auf etwa 10 μ l-Tropfen eingestellt)



Wachsendes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:

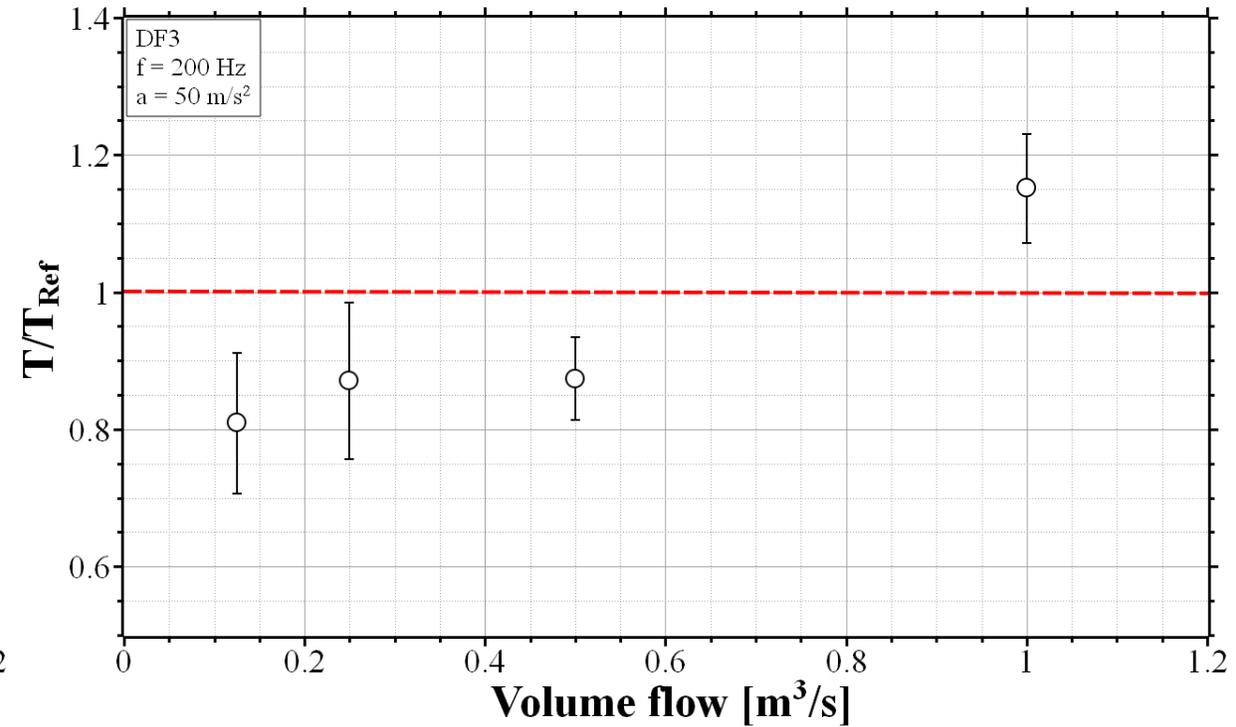
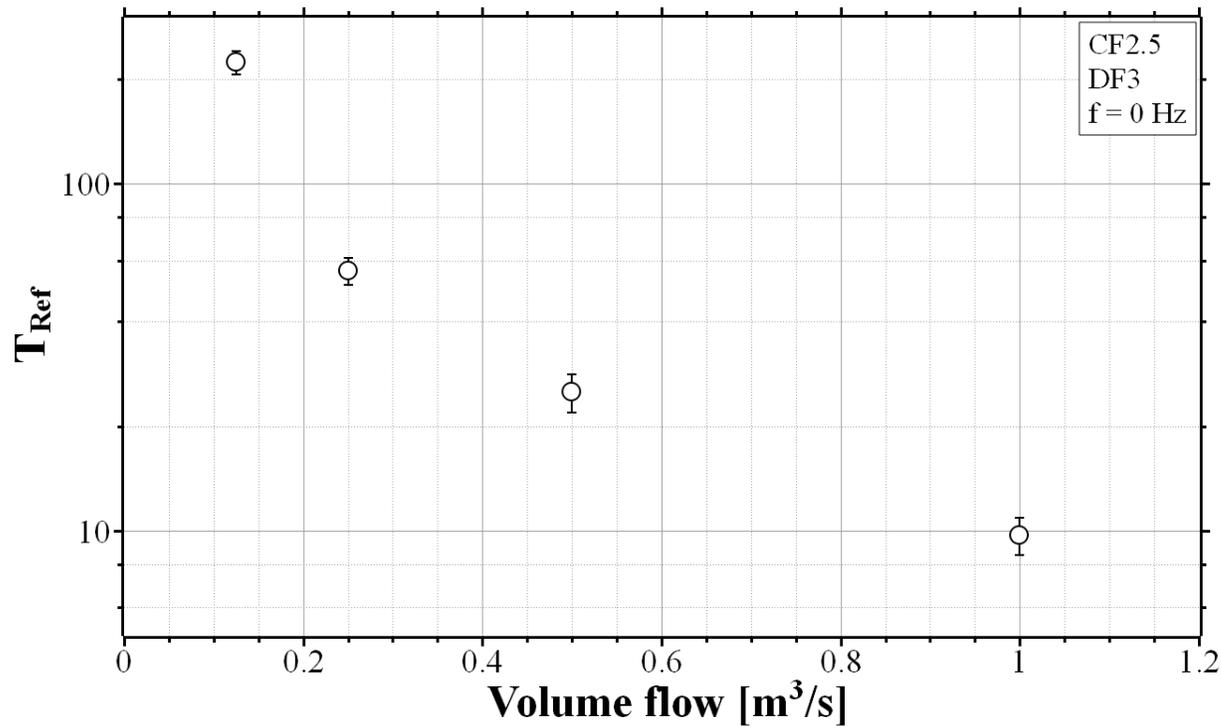
Detailansicht der Bewegungsphase

- Droplet moves slowly (stick-slip) due to growth and external excitation.
- Phase I:
Nearly constant movement with occasional jumps.
- Phase II:
Reaches critical volume (V_{crit}), causing increased movement and velocity.
- Droplet either:
Leaves the image field.
Enters Phase III, stabilizing as more oil flows in.
Movement resumes once volume is large enough.



Wachsendes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:

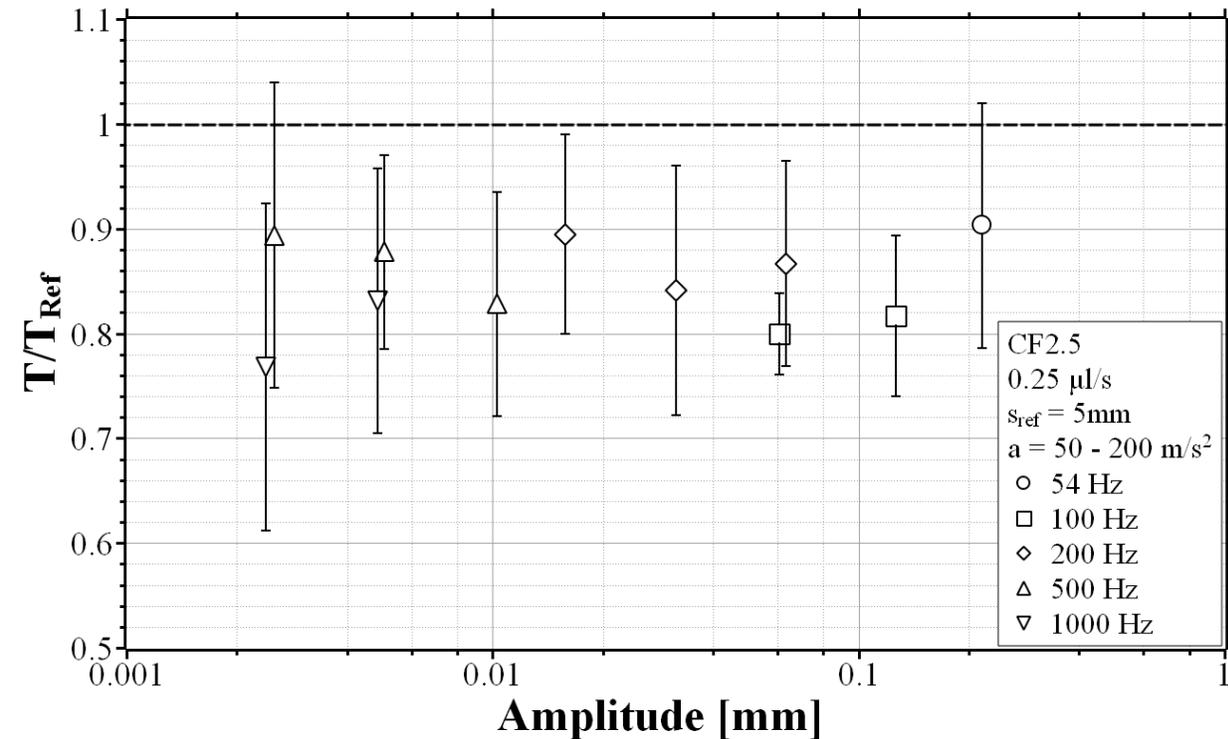
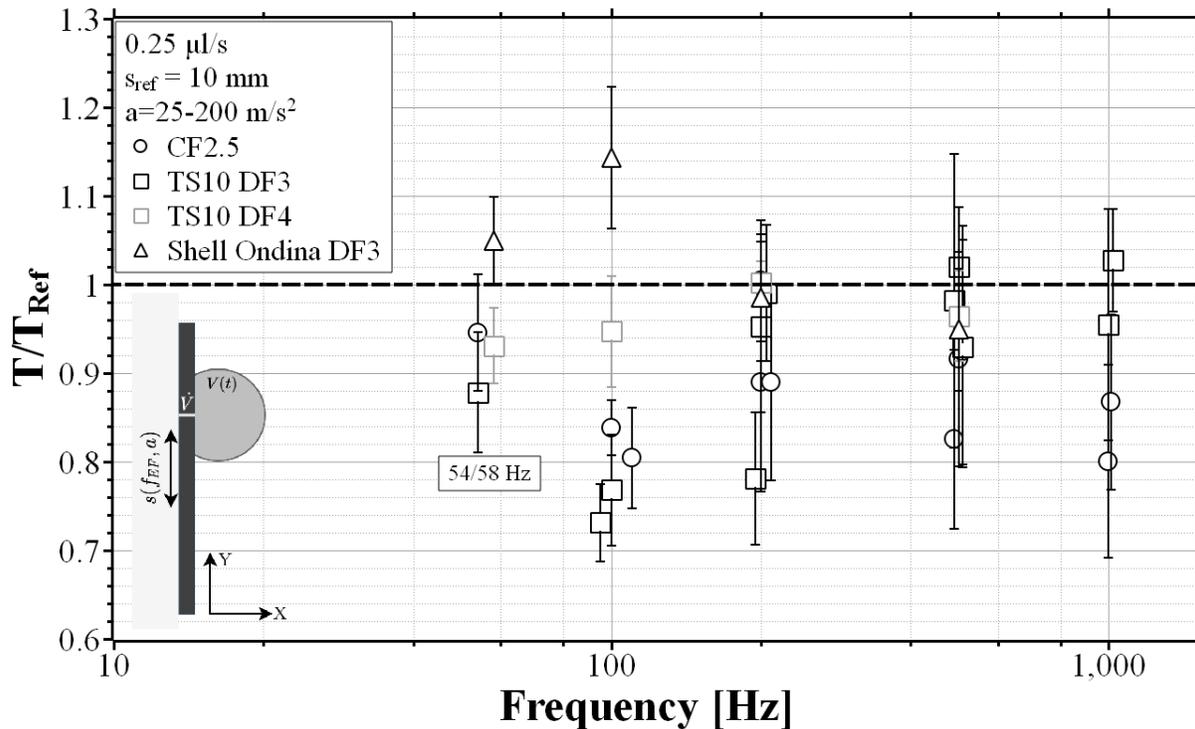
Welchen Effekt hat die Wachstumsrate?



- Drainage time depends on the volume flow of the syringe pump
- Reduced drainage time with superimposed vibration for volume flow rates below 1 microliter per second

Wachsendes Volumen, Überlagerung von Gravitation und Vibration:

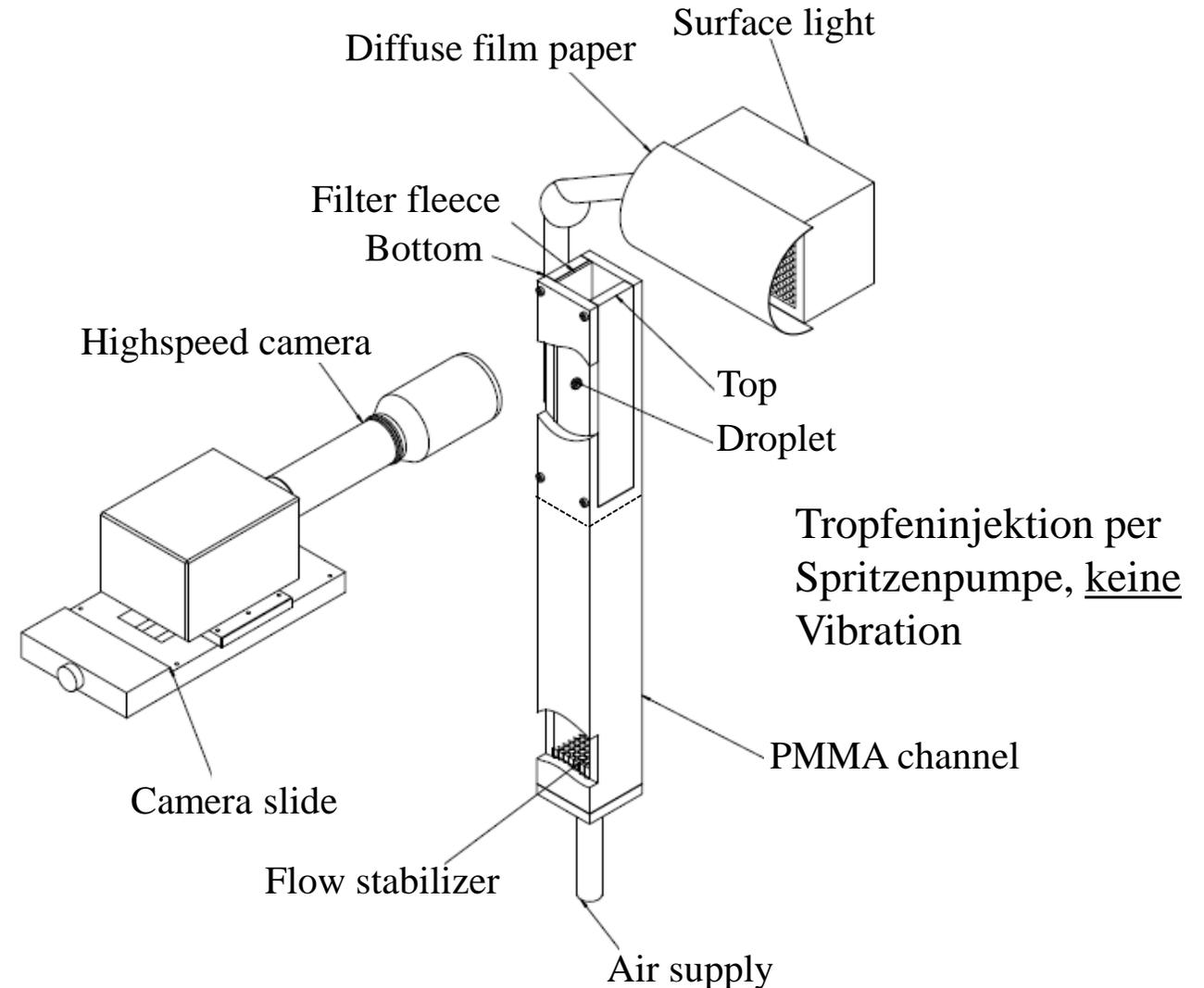
Welchen Effekt haben die Anregungsfrequenz bzw. die Amplitude?



- Time required to reach a distance of 5-10mm divided by the reference time without vibration
- Droplets reach 5-10mm faster with vibration: This can improve drainage in the filter and reduce pressure loss
- **Passt auch zu der Erkenntnis, dass für konstantes Volumen ein positiver Effekt festgestellt wird!**

Anströmung bei vertikaler Ausrichtung:

- Incoming flow of the droplet
- Acquisition of the contour with a high-speed camera
- Any inclination possible
Here: Horizontal and vertical
- Laminar
 $L = 0.06 \cdot D \cdot Re$ (Tietjens)
- Turbulent
 $L = 25 - 50 \cdot D$
 $L = 0.39 \cdot Re^{1/4} \cdot d$



Anströmung bei vertikaler Ausrichtung:

- Linear increase of the volume flow
- Start at 150 l/min
- Increase up to 600 l/min (35s)
- Frame rate: 120 fps

Tropfenablösen kaum möglich durch Querströmung; Tropfen lässt sich so nicht ausreichend zur Schwingung anregen.

DF4 (bessere Benetzung) erfordert höhere Geschwindigkeit

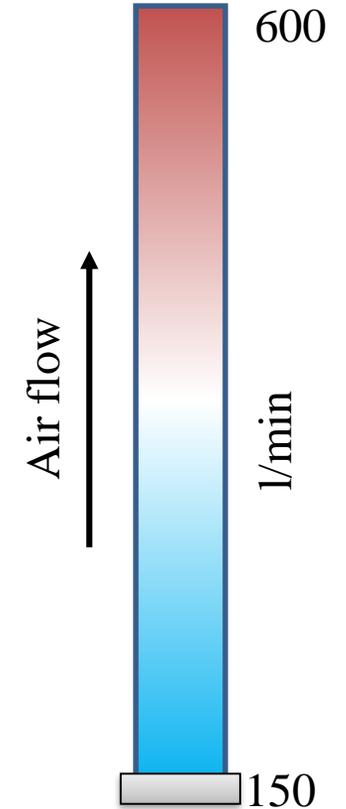
→ Anregung des Substrats oder der Strömung erforderlich

DF3



Shell Corena 46
Drop Volume: 5 μ l
Tilt angle: 90°

DF4

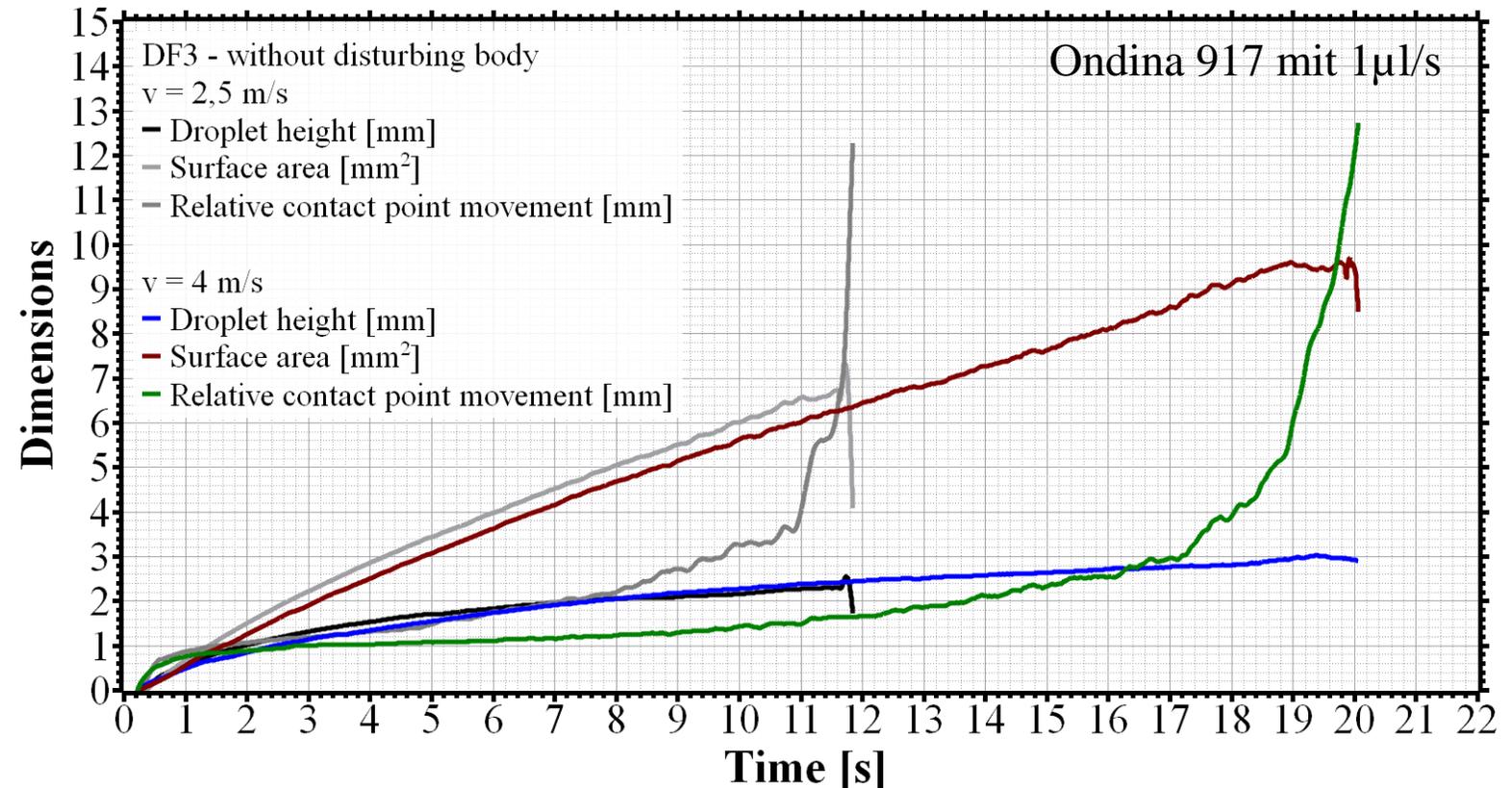


Anströmung bei vertikaler Ausrichtung:

- Slower drainage at 4m/s
- Asymptotic droplet growth in height
- Constant increase in contact point width until droplet abruptly breaks off

→ Auch anwachsende Tropfen sind bei reiner Anströmung entgegen der Gravitation problematisch.

- **Work in progress – niedrigere Viskositäten zu testen!**



Fazit der Drainage-Tests:

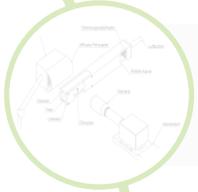
- Vibrationsanregung bei senkrechten Vlies in Gravitationsrichtung hat einen positiven Effekt, wenn die Wachstumsrate des Tropfens nicht zu groß ist
- Eine Strömung entgegen der Gravitationsrichtung wirkt auf den ersten Blick kontraproduktiv.

Es steht also noch aus:

- Tests mit vertikaler Ausrichtung, Gegenströmung und Vibration



Motivation



Analyse Tropfen und Benetzung



Vibrationsanregung und kritische Geschwindigkeit



Drainage-Tests



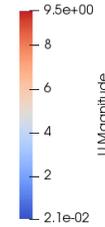
Strömungsschwingung durch Störkörper

Hintergrund:

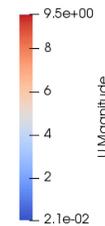
Tropfenschwingung ist mit einer Strömungssoszillation gekoppelt

Kann eine Strömungssoszillation also einen Tropfen anregen?

- Simulation of droplet drainage on an inclined wall
- Generation of droplets through pore with constant volume flow
- Air flow through fleece → redirection towards outlet → counteracts gravity
- Without and with oscillation and disturbing body



Time: 0.000000

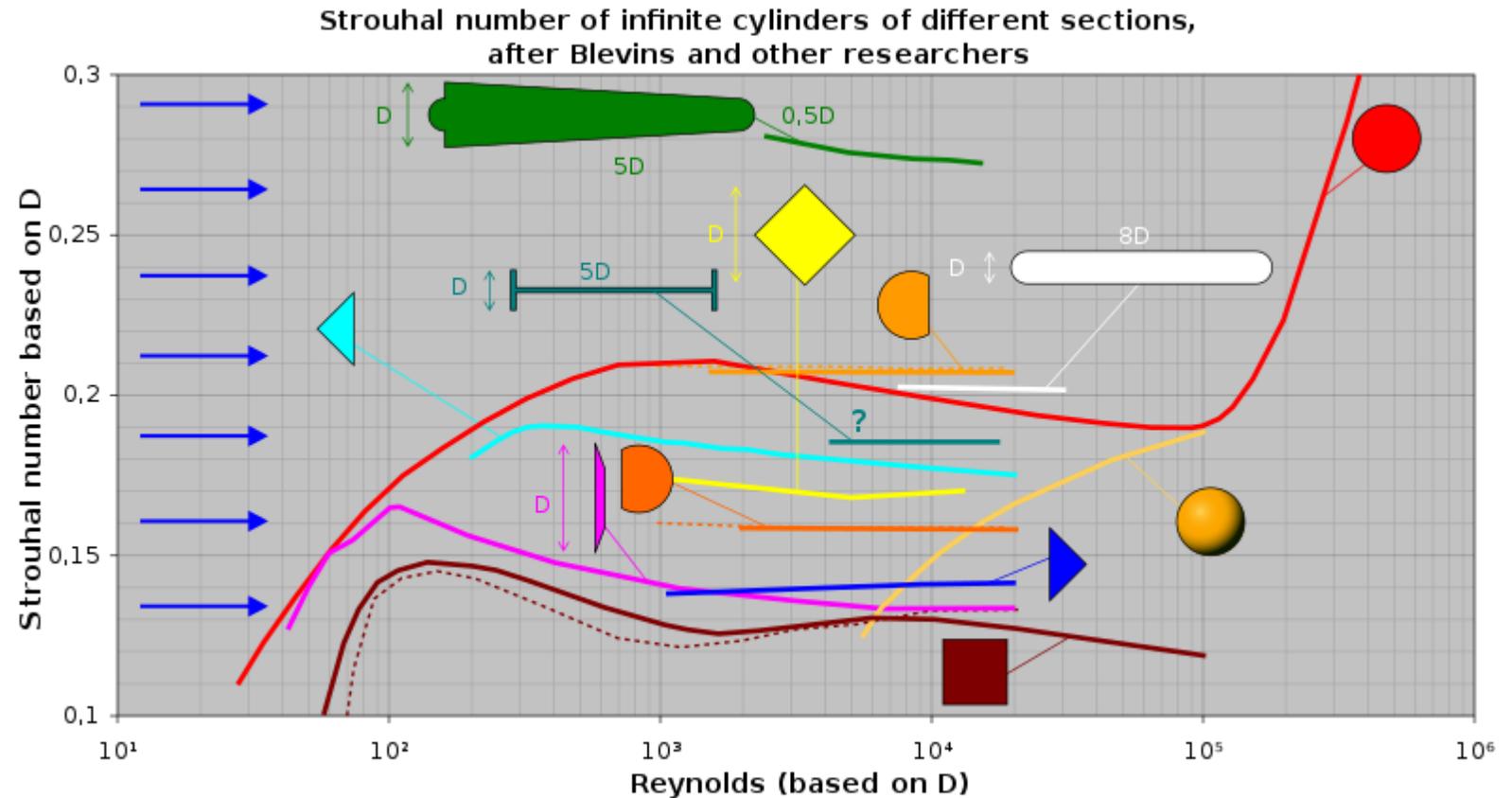


Time: 0.000000

Hintergrund:

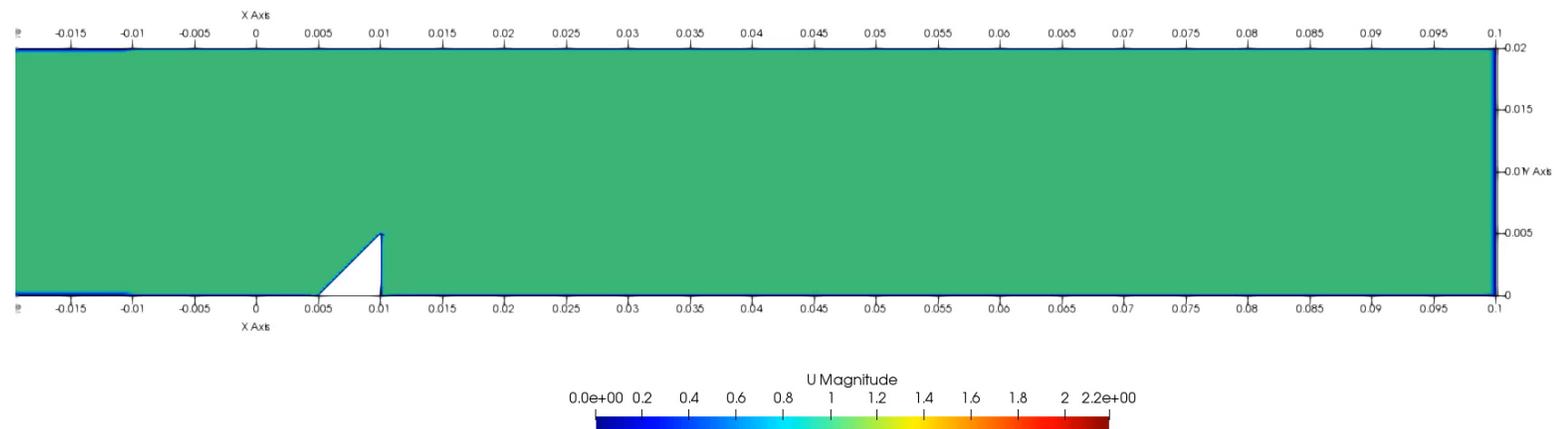
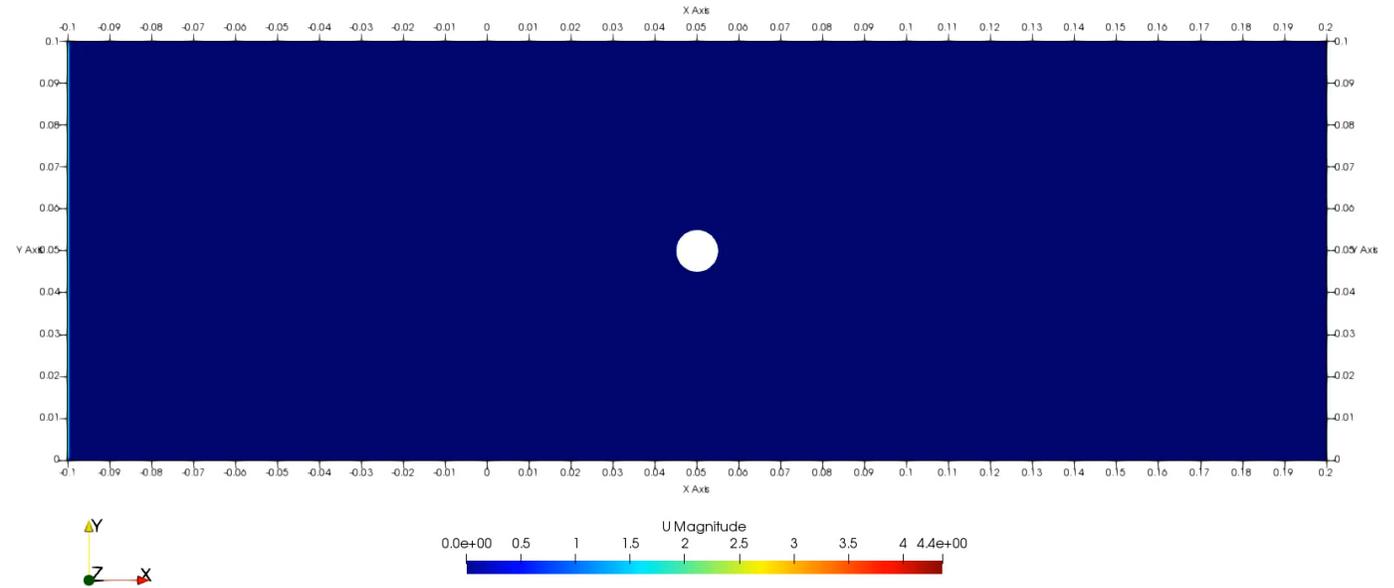
Verschiedene Körper erzeugen unterschiedliche charakteristische Wirbelfrequenzen

- Strouhal number: $St = \frac{f \cdot L}{v}$
- Vortexes detach from the body as the air flows around them
- Only applies if channel walls have sufficient distance to the body
- Measuring the speed and frequency with the hot-wire anemometer



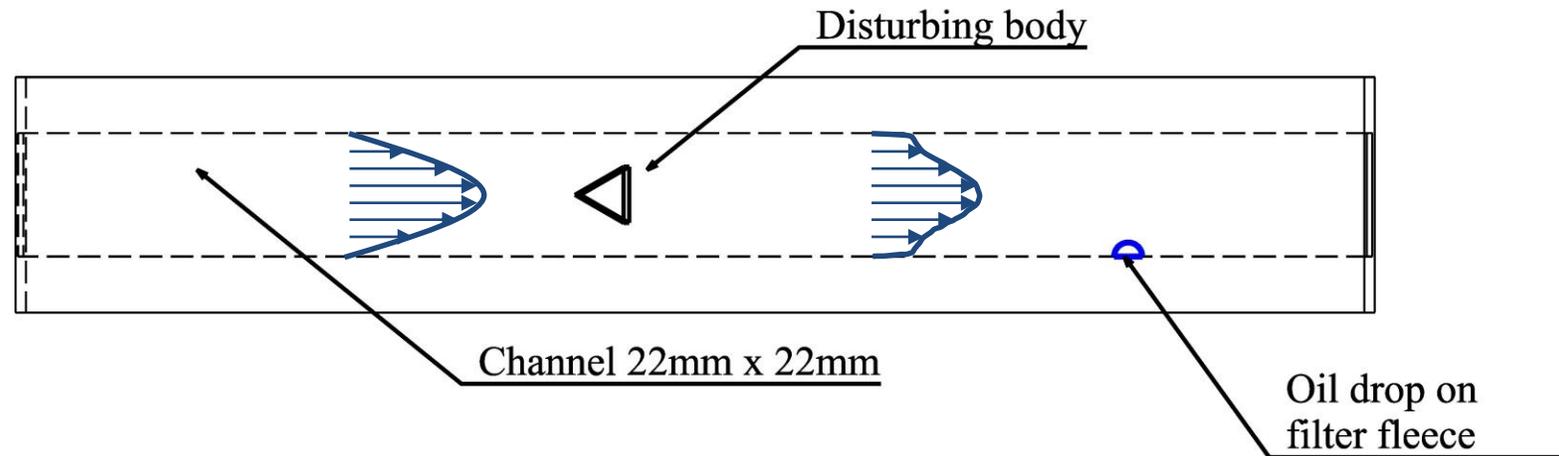
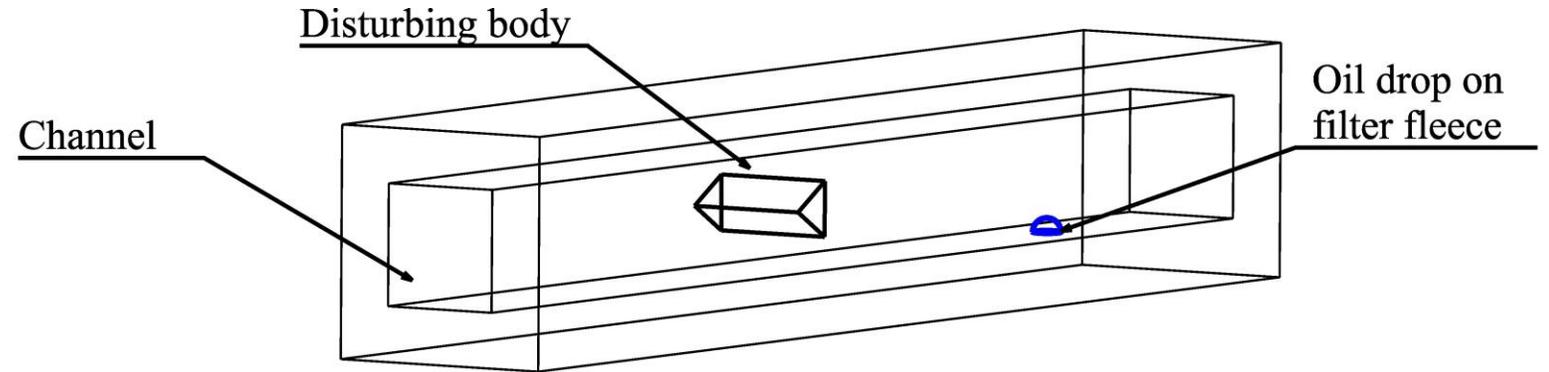
Beispiele:

- Generation of vortices through interfering bodies
- Oscillation of the air flow with mass flow controllers and/or valves is expensive and complex



Experimenteller Abgleich:

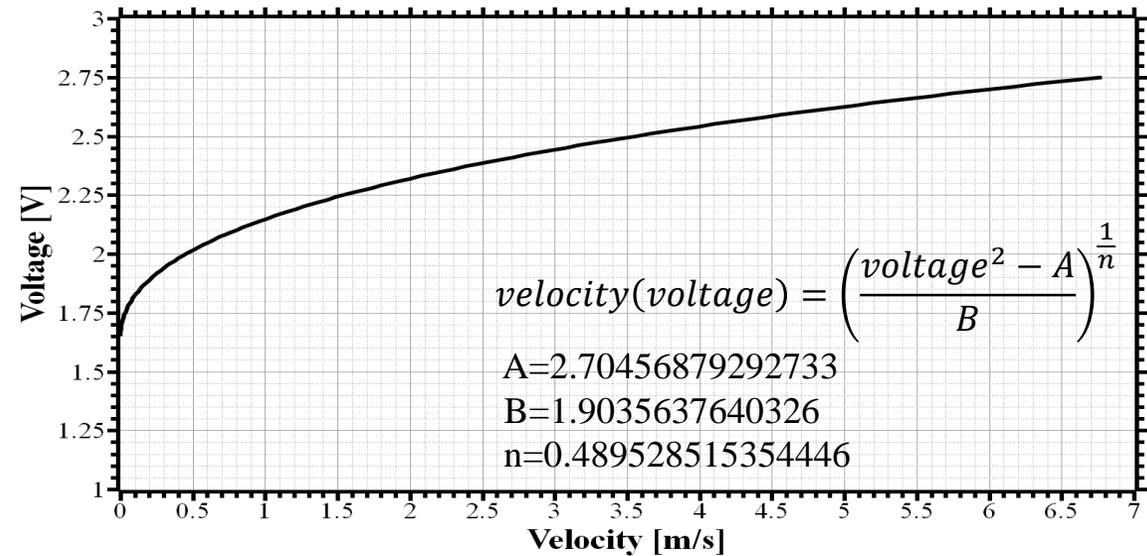
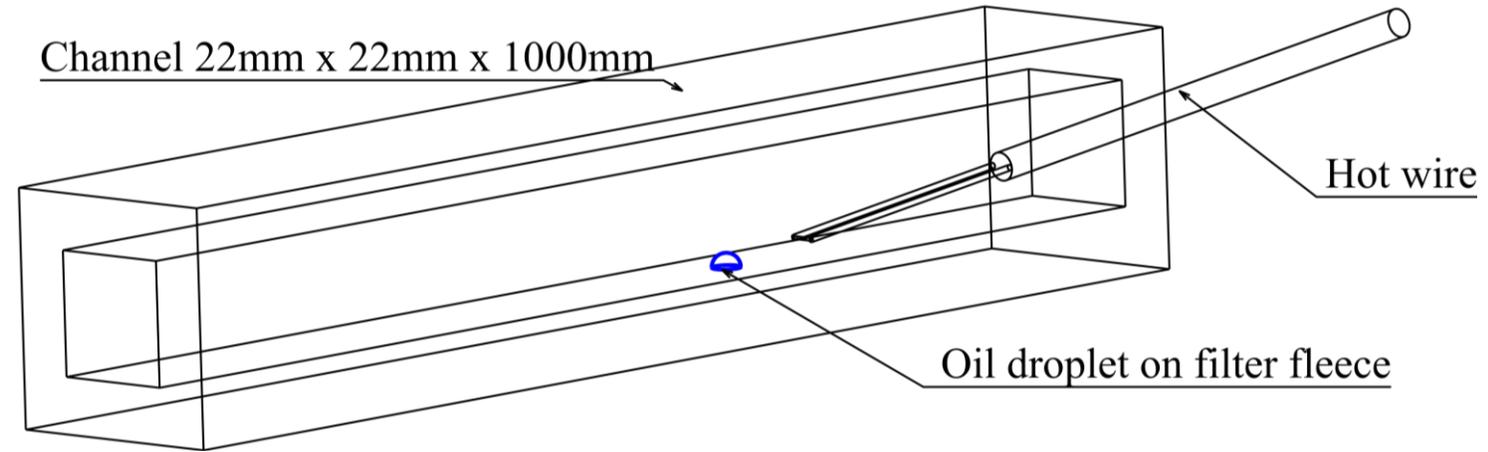
- Disturbing bodies create vortices
Cylinder and equilateral triangle
- Excitation of the droplet via air flow
- Diameter/edge length: 5mm and 10mm
- Airflow: 2.5m/s and 4m/s



Experimenteller Abgleich:

Hitzdraht

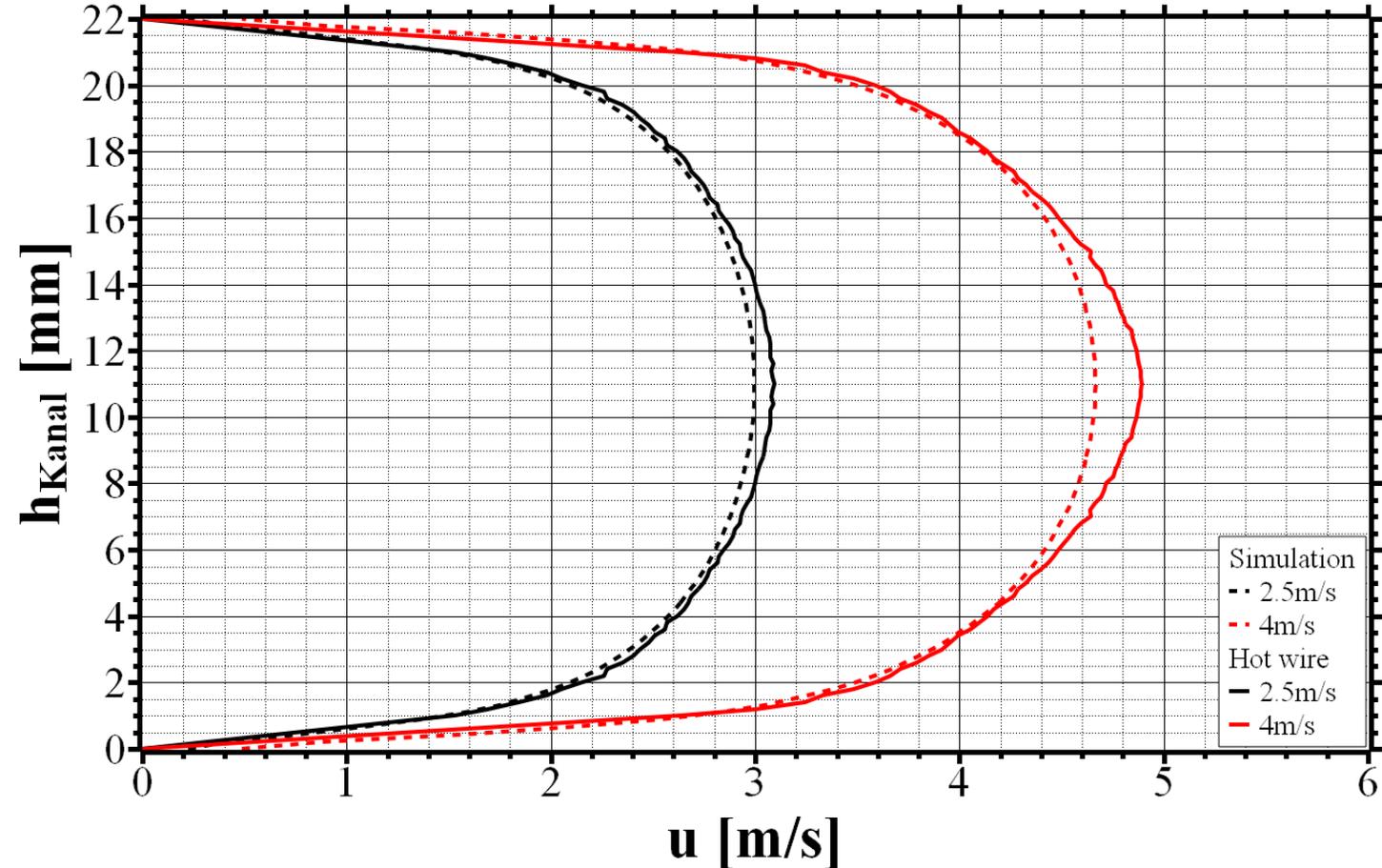
- Measuring the speed and frequency with the hot-wire anemometer
- Measuring rate: 5000 Hz for 10s
- Averaging of 50,000 measured values per position
- Different flow profiles due to interfering bodies (profile: bottom to leading edge of drop)



Experimenteller Abgleich:

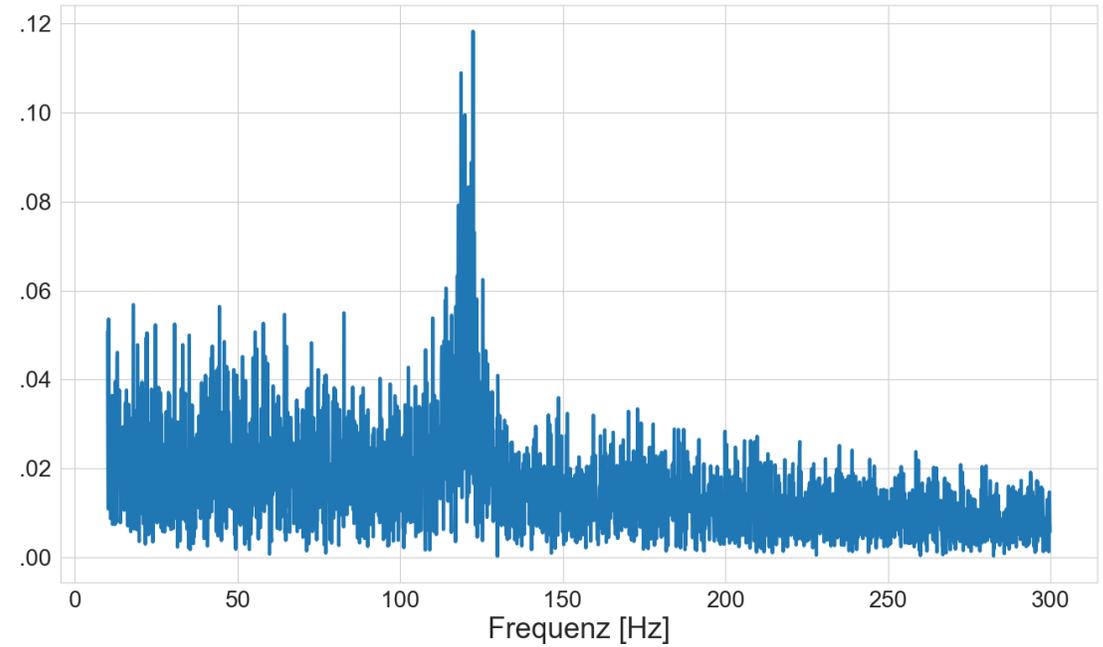
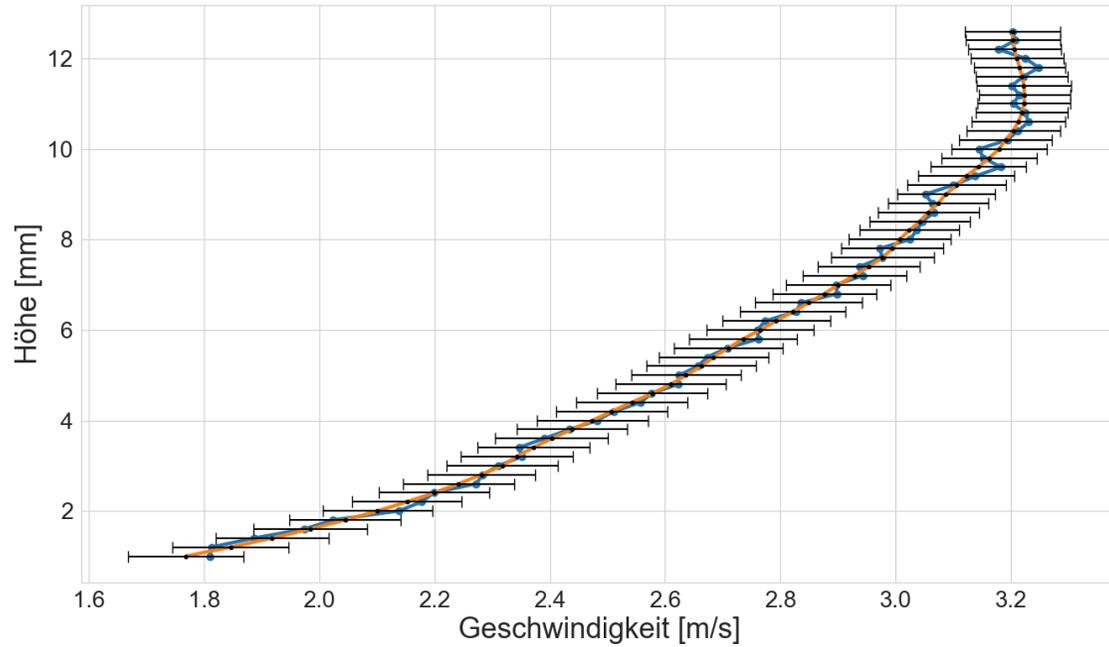
Hitzdraht

- Comparison of the flow profiles without disturbing bodies
- Good agreement between experimental and numerical data
- OpenFoam: RANS – $k\omega$ SST
- Inlet: 2.5 or 4 m/s
- The measured hot wire profile can also be defined as an inlet



Experimenteller Abgleich:

Hitzdraht



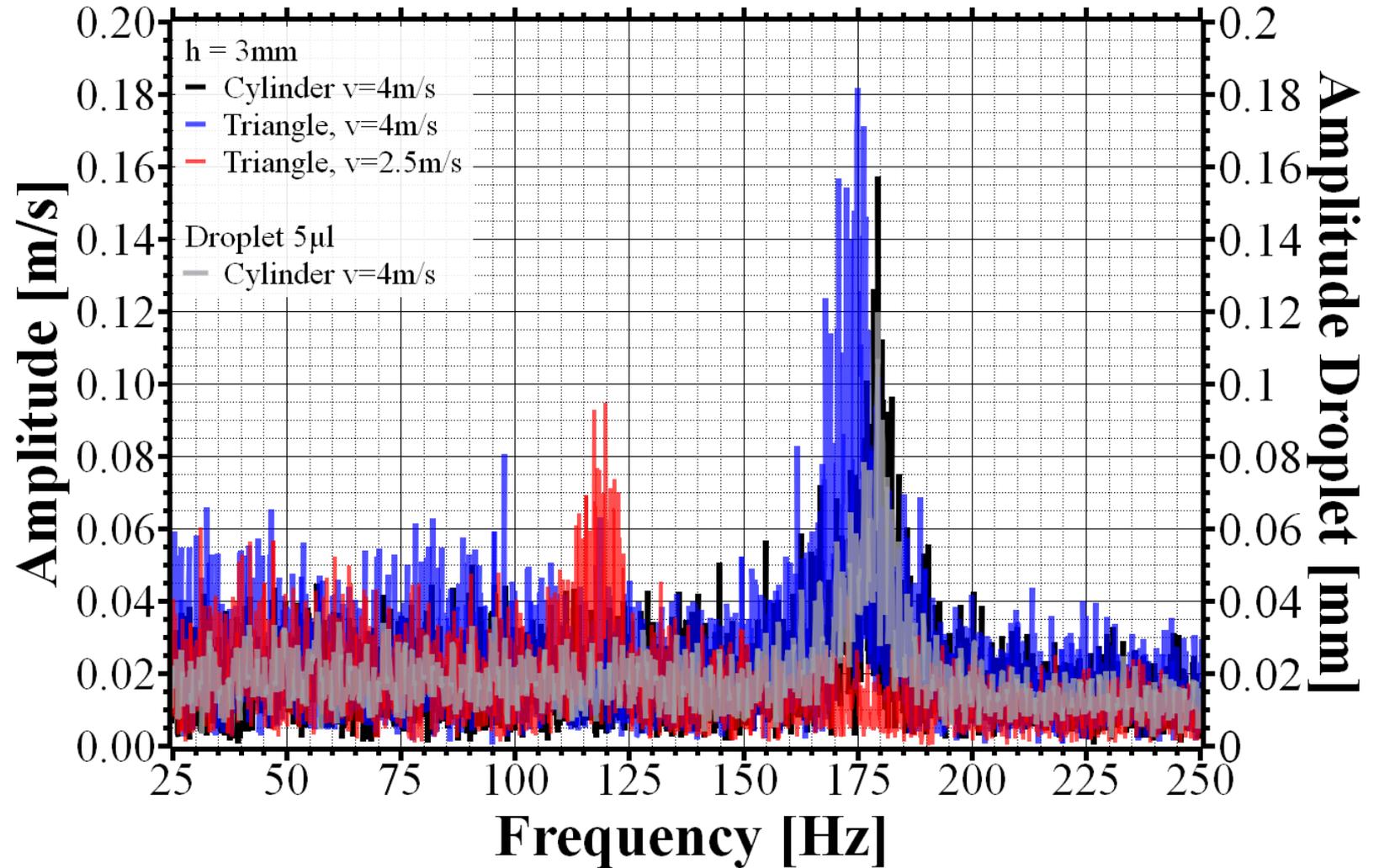
Body: Equilateral triangle
Dimension: 10mm
Incoming flow: 2.5m/s

- Hitzdrahtmessung zeigt charakteristische Strömungsszillation infolge der Störkörper und der Wirbelbildung
- Frequenz der Oszillation kann eingestellt werden

Experimenteller Abgleich:

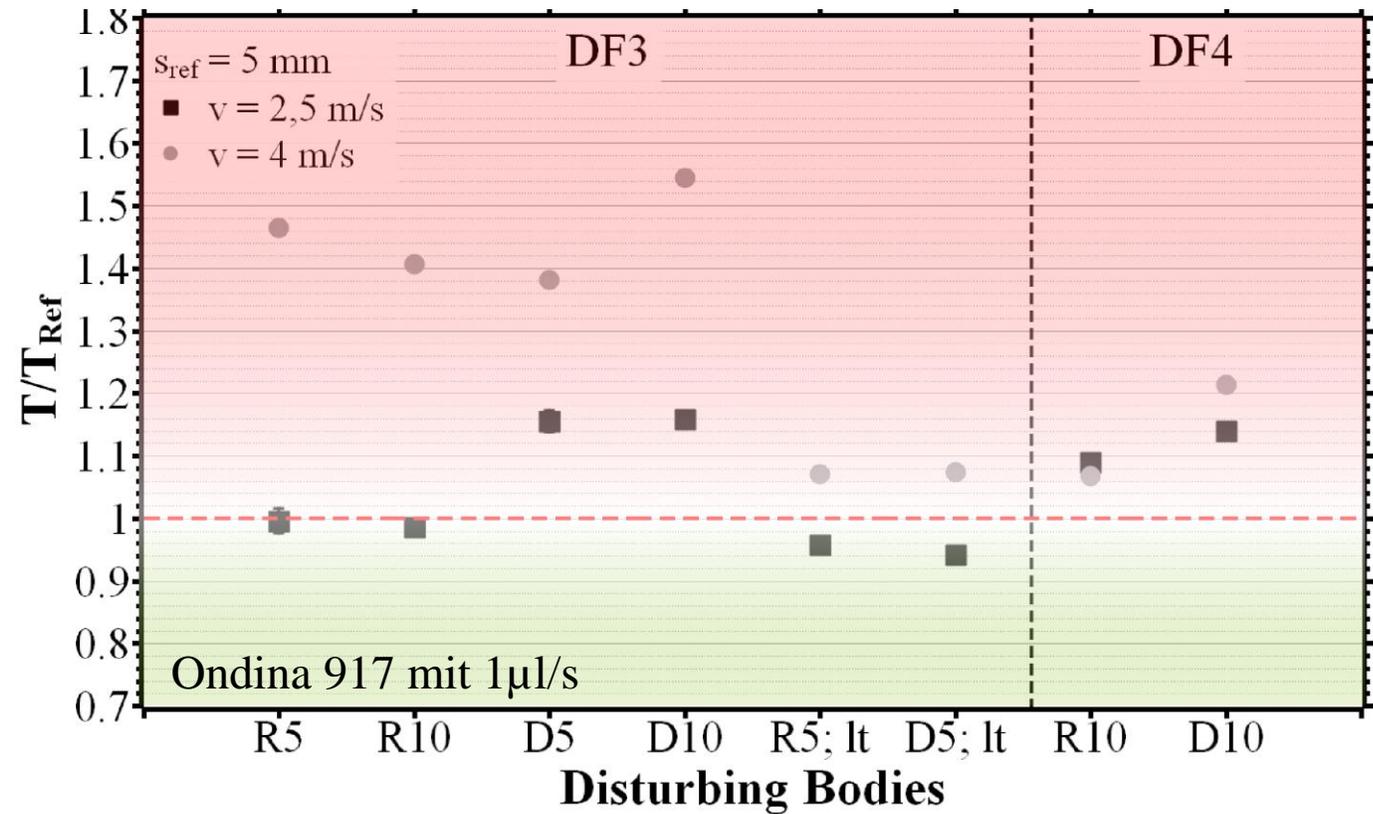
Hitzdraht

- Hitzdrahtmessung zeigt auch, dass charakteristische Strömungsszillation zu einer Anregung des Tropfens mit derselben Frequenz führt!



Drainage-Tests:

- Elapsed time divided by reference time without interfering body
- $T < T_{Ref}$: faster drainage
- $T > T_{Ref}$: slower drainage
- Drainage at 4m/s significantly slower than at 2.5 m/s (compare previous results for flow without bodies)
- Interfering bodies increase the drainage time if they are inserted in the middle
- Interfering bodies in the lower third accelerate drainage for 2.5m/s



D.h. Störkörperpositionierung (lt: „lower third“) näher an Vlies könnte zu reduzierter Anströmung des Tropfens führen.
Work in progress – niedrigere Viskositäten zu testen!



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF

**Industrielle
Gemeinschaftsforschung**

M.Sc. Andreas Metzmacher
Dr. Ing. Sebastian Burgmann
Bergische Universität Wuppertal
Chair of Fluid Mechanics
metzmacher@uni-wuppertal.de