

## Experimentelle Untersuchung des Blaseneinschlusses beim Tropfenaufprall auf festen Wänden

### Experimental investigation into the bubble-entrapment during droplet impact on solid walls

Lutz Gödeke, Sabrina Grünendahl, Frank Burzinski, Peter Ehrhard,

TU Dortmund, Bio- und Chemieingenieurwesen, Strömungsmechanik,

Emil-Figge-Str. 68, D-44227 Dortmund

Tropfenaufprall, Blaseneinschluss;

Droplet impact, bubble-entrapment;

### Zusammenfassung

Der Tropfenaufprall und die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf festen Oberflächen und das damit verbundene Phänomen des Blaseneinschlusses, spielt in unterschiedlichen industriellen Verfahren eine wichtige Rolle, beispielsweise während der Lackierprozesse im Fahrzeug- oder Flugzeugbau. Während des Tropfenaufpralls kann es unter bisher unbekanntem Bedingungen zu einem Blaseneinschluss im Flüssigkeitsfilm kommen. Die so entstehenden Blasen sind substratgebunden und somit nicht mobil. Während der anschließenden Trocknung können diese Blasen nicht durch die Oberfläche entweichen und führen so zur Entstehung von sogenannten Nadelstichen in der Lackschicht.

Die aktuelle Arbeit untersucht den dynamischen Prozess des Blaseneinschlusses unter Variation der Aufprallgeschwindigkeit und der Stoffeigenschaften von Wasser-Glycerin-Gemischen. Das Abtropfen der entsprechenden Flüssigkeiten aus einer Nadel mit einem Innendurchmesser von  $d_N = 0,15$  mm führt zu einer gleichmäßigen Tropfenbildung ( $d_T \cong 2$  mm) bei definierter Fallhöhe. Die Bilderzeugung erfolgt mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera, die über ein Makroskop unterhalb des NBK-7 Borosilikatglassubstrats normal zur Aufprallebene ausgerichtet ist und mittels Durchlichtbeleuchtung belichtet wird. Es wird eine detaillierte Dimensionsanalyse vorgestellt, mit deren Hilfe der Verlauf der substratgebundenen Blasenbildung als auch die auf den Tropfendurchmesser bezogene Blasengröße in Abhängigkeit der relevanten dimensionslosen Gruppen dargestellt wird. Weiterhin können die zeitlichen Verläufe der äußeren und inneren Kontaktlinie simultan betrachtet werden.

### Einleitung

Im Bereich der Mikroelektronik werden Halbleiter und Nanoröhren durch das Auftragen von Metalltropfen hergestellt. Bei Lötverfahren werden geschmolzene Metalltropfen verwendet, um Werkstoffe zusammenzufügen (Thoroddsen, S. T. et al. 2005). Ein weiterer Forschungsbereich ist das Drucken von Polymerschaltkreisen und Displayanzeigen zur Produktionskostensenkung (Thoroddsen, S. T. et al. 2005). Weiter zeigt der Blaseneinschluss in der Bio-

technologie zur Erzeugung von Mikroarrays, bei Reinigungsprozessen und beim Abkühlen von Oberflächen eine negative Auswirkung auf die Herstellung. Bei allen Anwendungen ist ein Blaseneinschluss unerwünscht, da die Größe der eingefangenen Blase Auswirkungen auf die Funktion des Prozesses und des Produktes, oder die Leitfähigkeit eines Materials haben kann (Josserand und Thoroddsen 2016). In verschiedenen Beschichtungsverfahren wird ein Film unter Verwendung von Flüssigkeitssprays aufgetragen. Ein Beispiel sind Lackierprozesse im Fahrzeug- oder Flugzeugbau. Bei einem Effektlack ordnen sich im Idealfall Metallpartikel im Basislack parallel zueinander an. Während des Sprühprozesses kann es durch das Einschließen von Gas im Flüssigkeitsfilm zu einem Blaseneinschluss kommen (Böhm 2002). Die parallele Ausrichtung der Metallpartikel ist dann nicht mehr möglich und verändert unter Umständen das optische Erscheinungsbild der Lackoberfläche. Der Blaseneinschluss hat somit einen direkten Einfluss auf die Qualität der Lackierung. Eingeschlossene Luftblasen können im späteren Trocknungsprozess freigesetzt werden und zu Nadellöchern im ausgehärteten Film führen. Hierdurch wird ein ungleichmäßiges optisches Erscheinungsbild verursacht und die unteren Schichten werden freigelegt, was je nach Substrat zu Korrosion führen kann. Entsprechende Reparaturarbeiten sind zeitaufwändig und somit teuer.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Versuchsaufbau zur Tropfenerzeugung zu entwickeln und den statischen und dynamischen Prozess zum Blaseneinschluss beim Tropfenaufprall zu untersuchen. Unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera sollen Aufnahmen erzeugt werden die den Blaseneinschluss zeigen. Durch Variation der Flüssigkeitszusammensetzung und der Einflussparameter wie Aufprallgeschwindigkeit  $u_T$  und Durchmesser  $d_T$  des Tropfens, wird die Bildungsgeschwindigkeit des Blaseneinschlusses gemessen. Weiter soll der Blasendurchmesser in Abhängigkeit der Einflussparameter ermittelt werden. Für die Untersuchungen werden die Dichte  $\rho_l$ , die Fluidviskosität  $\eta$ , die Oberflächenspannung  $\sigma$  und der statische Kontaktwinkel  $\Theta$  zwischen Tropfen und Substrat über die Volumenanteile der Mischungen variiert. Die Umgebungsparameter im Labor sind konstant.

Wichtige Kennzahlen sind die Tropfen-Reynolds-Zahl  $Re_T$ , die Tropfen-Weber-Zahl  $We_T$ , die daraus resultierende Ohnesorge-Zahl  $Oh$ :

$$Re_T = \frac{u_T \cdot d_T \cdot \rho_l}{\eta_l}, \quad We_T = \frac{u_T^2 \cdot d_T \cdot \rho_l}{\sigma}, \quad Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}.$$

Weiterhin ergeben sich aus den betrachteten Einflussgrößen die folgenden weiteren dimensionslosen Gruppen:

$$\hat{\rho} = \frac{\rho_g}{\rho_l}, \quad \hat{\eta} = \frac{\eta_g}{\eta_l}, \quad Fr = \frac{u_T}{\sqrt{g \cdot d_T}}$$

Sowohl die Tendenz zur Blasenbildung als auch die Charakterisierung des dynamischen Prozesses des Lufteinschlusses können mit diesen dimensionslosen Gruppen charakterisiert werden. Eine genaue Beschreibung des zugrundeliegenden Mechanismus ist Thoroddsen (2005) zu entnehmen. Eine Charakterisierung für Nicht Newtonsche Flüssigkeiten auf Basis der zugrundeliegenden Scher- und Dehnrelaxationszeiten ist über die Deborah-Zahl  $De$  prinzipiell möglich, wird aber im Rahmen dieses Beitrages nicht weiterverfolgt.

## Experimenteller Aufbau

Die experimentelle Untersuchung zur Tendenz und Dynamik des Blaseneinschlusses beim Tropfenaufprall auf festen Oberflächen erfolgt unter Variation der Stoffeigenschaften und der Aufprallgeschwindigkeit. Verschiedene Stoffeigenschaften der Fluide werden durch Wasser, Glycerin und Mischungen aus Wasser und Glycerin eingestellt. Dabei können die Flüssigkeitsdichte  $\rho_l$ , die Flüssigkeitsviskosität  $\eta_l$  und die Oberflächenspannung  $\sigma$  des Tropfens in Abhängigkeit der Volumenanteile variiert werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Stoffdaten der verwendeten Flüssigkeiten, verschiedene Glycerin-Wasser-Gemische mit den entsprechenden Volumenanteilen von Glycerin und Wasser, statischer Kontaktwinkel auf NBK-7 und unbehandeltem Borosilikatglas, gemessene Stoffdaten.

Material G/W	Dichte	Oberflächenspannung	Scherviskosität	Kontaktwinkel NBK-7/uBSG
V-% Glyc.	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/m]	[Pa · s]	[°]
50,0	1130	0,0702	0,007	28,0/50,0
75,0	1195	0,0696	0,037	27,0/48,0
87,5	1228	0,0692	0,181	26,0/46,0
93,75	1244	0,0689	0,330	25,0/44,0
99,80	1260	0,0687	0,800	24,0/42,0

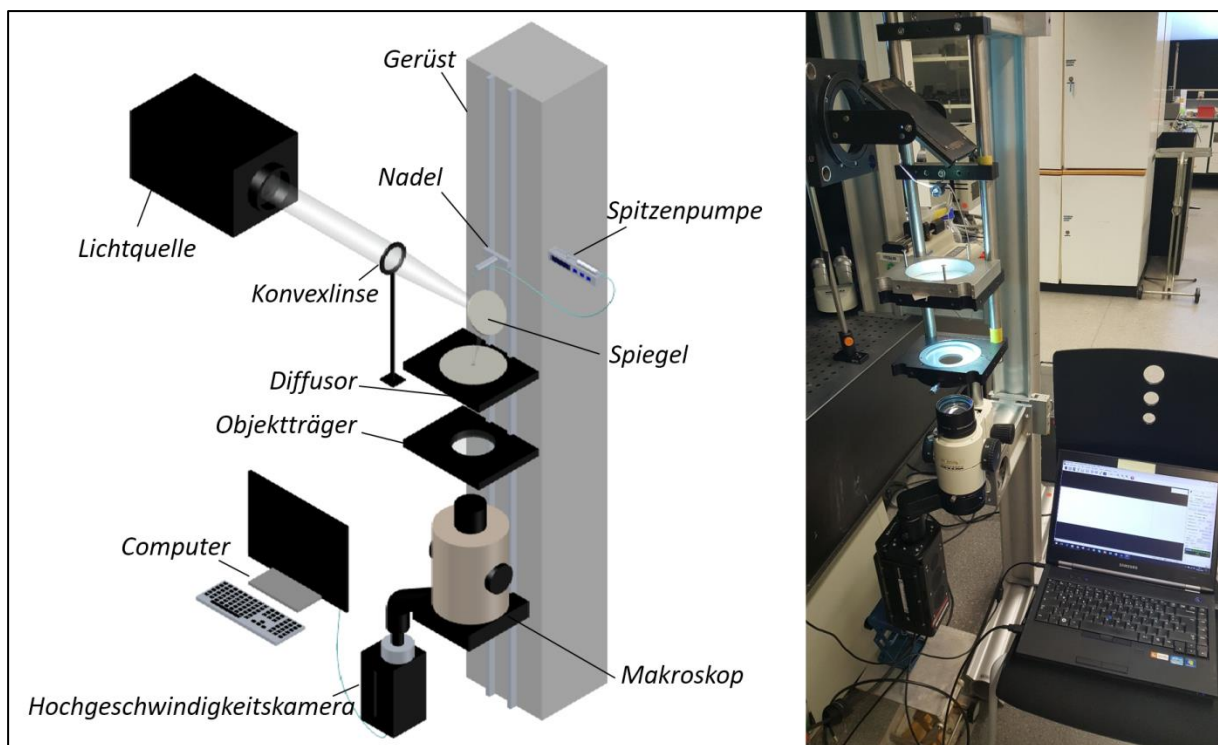


Abbildung 1: Versuchsaufbau bestehend auf Tropfenerzeugung, Beleuchtung und Hochgeschwindigkeitskamera mit angeschlossenem Makroskop

Zur Tropfenerzeugung werden eine Nadel mit dem Innendurchmesser  $d_N$ , eine 12 ml Spritze, eine Spritzenpumpe und ein Infusionsschlauch als Verbindung zwischen Spritze und Nadel genutzt. Die Verbindung vom Infusionsschlauch zur Nadel wird mit Teflonband abgedichtet. Der von der Spritzenpumpe geförderte Volumenstrom wird auf  $\dot{V} = 0,2$  ml/h eingestellt. Die Nadel wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, an einem höhenverstellbaren Element fixiert. Durch einstellbare Fallhöhen werden variable Aufprallgeschwindigkeiten erreicht. Die Höhe kann stufenlos zwischen 0,3 und 77 cm eingestellt werden. Die an der Nadel entstehenden Tropfen lösen ab und prallen auf ein festes Substrat aus poliertem Borosilikatglas NBK-7.

Für die Aufnahmen wird eine Hochgeschwindigkeitskamera des Typs MotionPro Y8-S1 mit einem vorgeschalteten Polfilter verwendet. Das Aufnahme Fenster wird so gewählt, dass bis zu 25.400 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden können. Aus seitlichen Aufnahmen kann, mit Hilfe eines Millimeterglases in der Fokusebene, Geschwindigkeit und Durchmesser des Tropfens bestimmt werden. Die Beleuchtung erfolgt frontal über eine Halogenlampe durch eine Diffusorscheibe, um ein gleichmäßiges Licht zu erzeugen. Zunächst werden mit dem seitlichen Versuchsaufbau die jeweiligen Durchmesser und Geschwindigkeiten bei verschiedenen Höhen gemessen. Dabei wird notiert, ob eine Blase eingeschlossen ist. Die Blasenentstehung kann bei Aufnahmen von der Seite nicht beobachtet werden, weswegen Aufnahmen von unten den dynamischen Prozess des Tropfenaufpralls zeigen sollen. Dafür wird der bestehende Versuchsaufbau so umgebaut, dass die Kamera, wie in Abbildung 1 gezeigt, unter dem Substrat steht. Damit eine genügend hohe Auflösung erreicht werden kann, wird ein Makroskop vor der Kamera ausgerichtet und an diese angeschlossen. Eine ausreichende Beleuchtung wird durch eine Weißlichtquelle oberhalb des Aufbaus erreicht. Das emittierte Licht wird fokussiert und mit Hilfe eines Spiegels auf eine Diffusorscheibe umgelenkt. Der verwendete Diffusor ist in der Mitte mit einer Lochbohrung versehen, sodass Tropfen aus höheren Fallhöhen durch dieses hindurchfallen können. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Beleuchtung des gesamten Feldes gleichmäßig erfolgt. Tropfen, welche aufgrund von einer gestörten Ablösung an der Nadel in ihrer Fallrichtung abgelenkt werden, können so durch die Diffusorscheibe direkt abgeschieden werden.

## Auswertung und Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Weber-Zahl über die Reynolds-Zahl aufgetragen. Dargestellt sind die Geschwindigkeitsvariationen von Wasser, Glycerin und deren Gemischen (vgl. Tab. 1). Die Bereiche der verschiedenen Blaseneinschlüsse sind durch verschiedene Farben und Symbole gekennzeichnet. Die jeweiligen Messreihen der gleichen Flüssigkeit bilden eine Gerade. Die linke Messreihe wird durch die Datenpunkte von Glycerin beschrieben. Von links nach rechts nimmt der Volumenanteil von Glycerin ab. Die rechte Messreihe gibt die Datenpunkte von Wasser wieder. Die Größenordnung der Reynolds-Zahlen wird hauptsächlich durch die Viskosität beeinflusst. Die blauen Quadrate stellen die Bereiche dar, in denen einzelne Blasen eingeschlossen werden.

Bei kleinen Weber-Zahlen und mittleren Reynolds-Zahlen ist ein Bereich zu finden, in dem keine Blasen eingeschlossen werden (orangene Rauten). Die Reynolds-Zahlen liegen hier in etwa bei  $70 < Re < 315$ , während die Weber-Zahlen in einem Bereich  $0,5 < We < 2,5$  variieren. Ebenfalls ist ein Bereich ohne Blaseneinschluss bei hohen Reynolds-Zahlen im Bereich  $850 < Re < 6800$  und hohen Weber-Zahlen im Bereich von  $50 < We < 320$  zu verzeichnen. Für alle anderen Kennzahlkombinationen sind Blaseneinschlüsse reproduzierbar zu erzeugen.

gen. Zusätzlich zum einzelnen Blaseneinschluss sind Bereiche zu beobachten in denen mehrere Blasen eingeschlossen werden.

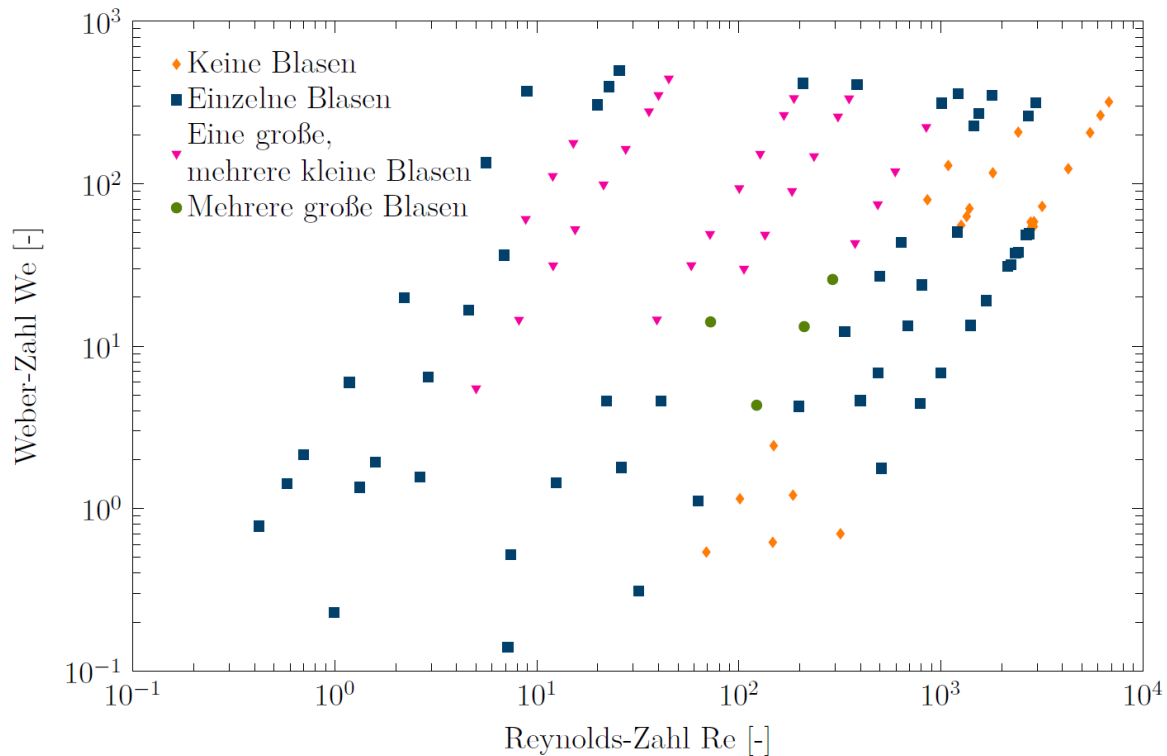


Abbildung 2: Bereiche für das Auftreten verschiedener Formen des Blaseneinschlusses für Glycerin-Wasser-Gemische. Es ist die Weber-Zahl  $We$  über die Reynolds-Zahl  $Re$  aufgetragen. Die Messreihen bilden Geraden der jeweiligen Flüssigkeiten (Glycerin (links), Gemische (mitte), Wasser (rechts)).

Bei den Gemischen  $GW_{67,5/32,5}$  und  $GW_{50/50}$  sind bei Reynolds-Zahlen  $70 < Re < 290$  Blaseneinschlüsse von zwei bis 5 Blasen zu sehen (grüne Kreise). Der andere Bereich in dem mehrere Blasen eingeschlossen werden ist größer und zeichnet sich dadurch aus, dass mittig eine größere Blase eingeschlossen wird und außen herum viele sehr kleine Blasen entstehen (pinke Dreiecke). Dies geschieht bei den Gemischen  $GW_{93,75/6,25}$  bis  $GW_{50/50}$ . Die Reynolds-Zahlen liegen hier im Bereich von  $5 < Re < 850$ , während die Weber-Zahlen im Bereich von  $5,5 < We < 450$  liegen. Die Bereiche der verschiedenen Blaseneinschlüsse werden durch Übergangsbereiche voneinander getrennt. Das heißt, dass in einem Übergangsbereich bei Formen des Blaseneinschlusses auftreten, während diese zur Mitte der Bereiche klar definiert sind. Die Geschwindigkeit und die Viskosität haben also einen großen Einfluss auf die Form des Blaseneinschlusses.

Nach Thoroddsen wird vor dem Aufprall des Tropfens auf der Substratoberfläche, durch den kurzzeitigen Anstieg des Staudrucks unter dem Tropfen, ein Luftfilm eingeschlossen. Der Tropfen deformiert sich hierdurch (Thoroddsen et al. 2005). Der entstehende Luftfilm zieht sich im Laufe des Prozesses durch die wirkenden Oberflächenkräfte zusammen und bildet bei orthogonalem Aufprall auf dem Substrat eine zentrale Blase, die in einen stationären Zustand übergeht und für Kontaktwinkel im Bereich von  $\theta \cong 20 - 70^\circ$  am Substrat haftet.

Aus den Ergebnissen in Abbildung 3 wird deutlich, dass die Aufprallgeschwindigkeit  $u_T$  einen deutlichen Einfluss auf die Zeitspanne  $\Delta t$  der Blasenbildung, bis zum Erreichen eines konstanten Blasendurchmessers, hat. Hierbei ist die dimensionslose Zeitspanne für höherviskose Medien ( $Oh > 0,08$ ) proportional zur Weber-Zahl, es gilt  $t^* \propto We^{0,144}$ . Für niedrigviskose Medien kann der Prozess mit der verwendeten Technik nicht ausreichend genau ausgewertet werden, sodass hier keine Aussage getroffen wird.

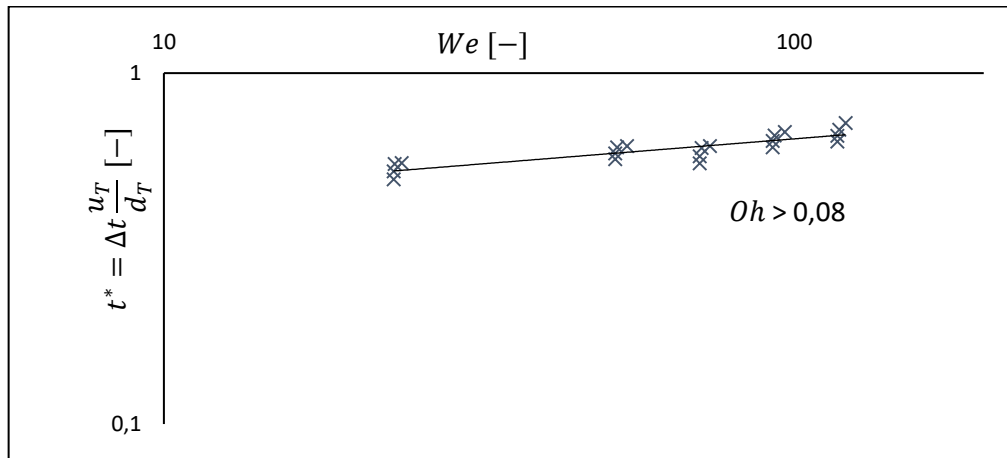


Abbildung 3: Die Dauer zur Blasenbildung nimmt mit steigender Aufprallgeschwindigkeit und abnehmender Viskosität ab.  $t^*$  ist hierbei die mit der charakteristischen Tropfendehformationszeit entdimensionierte Zeitspanne vom ersten Auftreten einer Kontaktlinie  $a(t_0)$  bis zur Ausbildung der finalen Blase.

Mehrere Aufnahmen zeigen das Phänomen einer Ringbildung aus Mikroblasen um eine zentrale Blase im Flüssigkeitstropfen. Die Mikroblasen entstehen ringförmig im Bereich der ersten Kontaktlinienposition  $a(t_0)$ . Sowohl die Kontaktlinie  $a(t_0)$ , als auch der Ringdurchmesser nach Ablauf des dynamischen Prozesses des Blaseneinschlusses weisen einen relativen Durchmesser von  $\frac{a(t_0)}{d_T} = \frac{d_R}{d_T} = 0,19$  auf (Abb. 4).

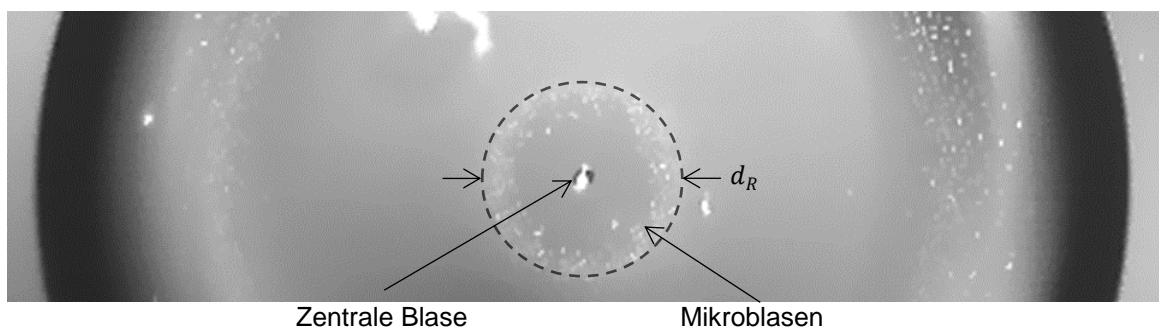


Abbildung 4: Ring aus Mikroblasen ( $d_R$ ) im Bereich der initialen Kontaktlinienposition  $a(t_0)$  (gestrichelte Linie). Gemisch  $GW_{87,5/12,5}$ ,  $Re = 12$ ,  $We = 23$ .

Der statische Kontaktwinkel kann nicht eindeutig als maßgebliche Einflussgröße auf den dynamischen Prozess des Blaseneinschlusses oder als Auswirkung auf den Blasendurchmesser nachgewiesen werden. Durch einen direkten Vergleich mit der Glycerin-Messreihe, bei unterschiedlichen Glassubstraten und somit variiertem Kontaktwinkel wird ein möglicher Einfluss verdeutlicht. Dabei zeigt Glycerin auf dem NBK-7 Borosilikatglas einen Kontaktwin-

kel von  $\theta = 24^\circ$  und auf dem unbehandelten Borosilikatglas einen Kontaktwinkel von  $\theta = 42^\circ$ . Für die Kennzahlkombination  $Re = 6$ ,  $We = 122$  zeigt sich eine veränderte Form des Blaseneinschlusses für verschiedene Kontaktwinkel (Abb. 5).

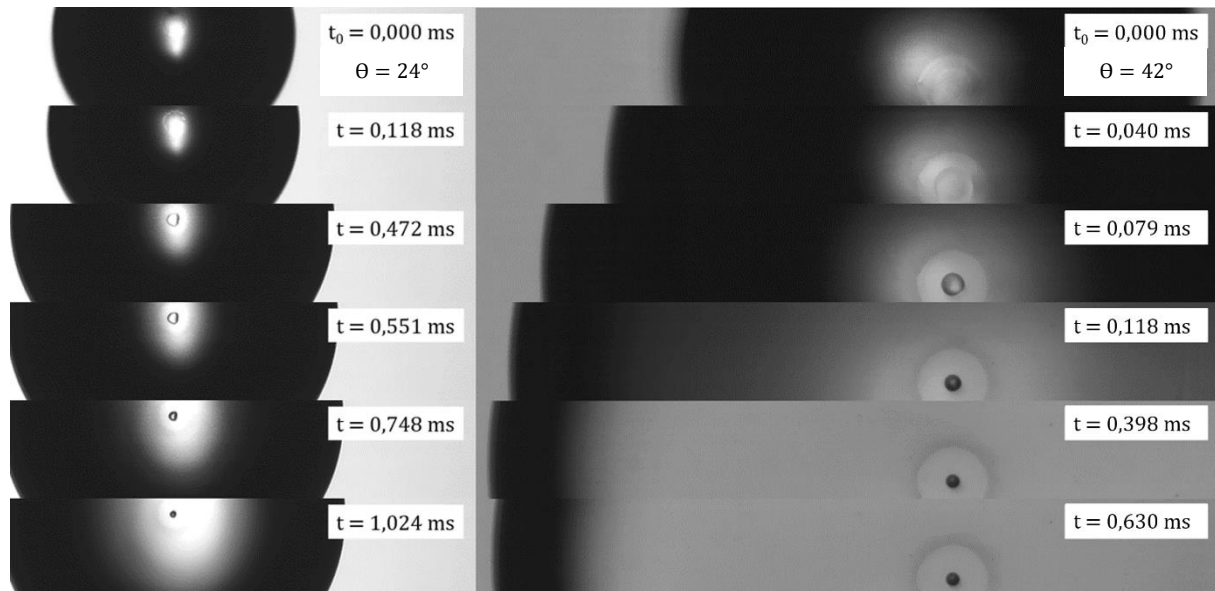


Abbildung 5: Momentaufnahme zum dynamischen Prozess des Blaseneinschlusses von Glycerin. Identische Tropfengröße, rechtes Bild zur besseren Visualisierung relativ gesehen 2,2-fach vergrößert. Parameter:  $Re = 6$ ,  $We = 122$ . Links: Kontaktwinkel  $\theta = 24^\circ$  (NBK-7 Borosilikatglas poliert). Rechts: Kontaktwinkel  $\theta = 42^\circ$  (unbehandeltes Borosilikatglas). Finaler Blasendurchmesser links:  $\frac{d_{B,end}}{d_T} = 0,0192$ , rechts:  $\frac{d_{B,end}}{d_T} = 0,0161$

Zu erwarten wäre eine Zunahme der Zeitspanne, bis zum Erreichen eines konstanten Blasendurchmessers bei einem Anstieg des Kontaktwinkels und damit schlechter werdender Benetzung. Abbildung 5 zeigt die genau gegenteilige Auswirkung. Die Zeitspanne bis zum Erreichen des statischen Kontaktwinkels nimmt bei steigendem Kontaktwinkel von  $\Delta t = 1,024$  ms auf  $\Delta t = 0,63$  ms ab.

## Literatur

Böhm, C. A.. "Wechselwirkung von Tropfen und Sprays newtonscher und nicht-newtonscher Fluide mit festen Oberflächen: Aufprall und Filmbildung." Dissertation TU Darmstadt (2002).

Thoroddsen, S. T., et al. "The air bubble entrapped under a drop impacting on a solid surface." Journal of Fluid Mechanics 545 (2005): 203-212.

Josserand, C., and Thoroddsen, S.T.. "Drop impact on a solid surface." Annual Review of Fluid Mechanics 48 (2016): 365-391.

