

Institut für
Technische Chemie und Polymerchemie



Bachelorarbeit

Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die Blasenverteilung an einem
Zylinder

Influence of the wettability on the bubble cutting by a cylinder

eingereicht von: Patrick Rohlf
Studiengang: Chemieingenieurwesen
Karlsruher Institut für Technologie

betreut durch: Marion Börnhorst, Dr. Martin Wörner
Gutachter: Prof. Dr. O. Deutschmann

Bearbeitungszeitraum: Februar 2018 - April 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Blasensäulenreaktoren	5
2.2	Aufstiegsverhalten von Einzelblasen	6
2.2.1	Kennzahlen	7
2.2.2	Blasenformen	8
2.3	Blase-Zylinder Interaktion	10
2.4	Benetzungsverhalten	10
3	Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung	15
3.1	Versuchsaufbau	15
3.2	Versuchsparameter	17
3.3	Analysemethodik	18
3.3.1	Vorversuche zur Skalierung und Validierung	18
3.3.2	Blasenerfall	21
4	Ergebnisse und Diskussion	23
4.1	Blasenaufstieg	23
4.2	Blasenzerteilung	26
4.2.1	$d_{\text{eq}} = 4,57 \text{ mm}$ ($V_B = 50\mu\text{L}$)	27
4.2.2	Kritischer Blasendurchmesser $5,76 \text{ mm} < d_{\text{krit}} < 6,6 \text{ mm}$	27
4.2.3	$d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$ ($V_B = 250\mu\text{L}$)	28
4.2.4	$d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$ ($V_B = 500\mu\text{L}$)	30
4.2.5	$d_{\text{eq}} = 12,4 \text{ mm}$ ($V_B = 1000\mu\text{L}$)	31
4.3	Bildung von Satellitenblasen	33
4.4	Einfluss des Zylinderdurchmessers auf die Blasenzerteilung und die Flüssigkeitsfilmschicht d_F	36
4.5	Einfluss des Benetzungsverhalten	39
5	Zusammenfassung und Ausblick	41

Nomenclature

Griechische Formelzeichen

η	dynamische Viskosität	$[\frac{kg}{ms}]$
λ	Wellenlänge	$[nm]$
ρ	Dichte	$[\frac{kg}{m^3}]$
σ	Oberflächenspannung	$[\frac{kg}{s^2}]$
Θ	Kontaktwinkel	$[^\circ]$

Lateinische Formelzeichen

d_{eq}	äquivalenter Blasendurchmesser	$[mm]$
d_F	Flüssigkeitsfilmschichtdicke	$[mm]$
D_{Zyl}	Zylinderdurchmesser	$[mm]$
g	Gewichtskraft	$[\frac{m}{s^2}]$
S_v	Seitenverhältnis	$[-]$
u_B	Blasenendgeschwindigkeit	$[\frac{m}{s}]$
V	Volumen	$[ml]$

Indizes

B	Blase
Ell	Ellipsoid
g	Gas
l	Flüssigkeit
$Rota$	Rotationskörper
Zyl	Zylinder

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt zu haben und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet zu haben.

Karlsruhe, den 29. Juli 2021

Patrick Rohlfs

Danksagung

Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Marion Börnhorst und meinem Betreuer Dr. Martin Wörner für die engagierte Betreuung und ausgiebige Unterstützung. Durch stetige produktive Gespräche und konstruktive Kritik verhalfen sie mir zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit. Vielen Dank für die Zeit und Mühen, die Sie in meine Arbeit investiert haben.

Auch möchte ich mich bei Hans Weickenmeier und dem Werkstattteam für die Hilfe bei der Anfertigung des Versuchsaufbaus und den Messdurchführungen bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei der Gruppe von Dr. Levkin des ITG am KIT für die Anfertigung der hydrophob beschichteten Zylindern bedanken und Herrn Klaus Simon vom WBK des KIT für die Rauigkeitsmessungen der verwendeten Materialien.

1 Einleitung

Mehrphasenreaktoren finden in der Chemie-, Petrochemie und Biochemieindustrie ein breites Anwendungsgebiet und werden zur Herstellungen von auf Erdöl basierenden Kraftstoffen oder zur Produktion von chemischen und pharmazeutischen Rohstoffen, Kunststoffen und anderen Materialien eingesetzt [6]. Für diese Prozesse werden in erster Linie Festbettreaktoren und Blasensäulenreaktoren verwendet, die jedoch mit Problemen wie Rückvermischung der Flüssigkeit sowie Blasenvereinigung zu kämpfen haben. Die Blasenvereinigung in Blasensäulen führt zu einer Abnahme der Gas-Flüssigkeit Phasengrenzfläche, welche für einen intensiven Stoffaustausch notwendig ist.

Zur Bewältigung dieser Limitierung werden interne Strukturen, wie strukturierte Packungen [11] oder Gitternetze in Blasensäulen eingesetzt, die große Blasen in kleinere zerteilen und durch die vergrößerte spezifische Grenzfläche den Gas-Flüssigkeit Stoffaustausch erhöhen. Durch ihre strukturierte Geometrie haben sie einen großen Vorteil gegenüber zufällig angeordnete Packungen und erhöhen den Wärmeaustausch durch effektive radiale Durchmischungseigenschaften [14]. Neben der Zerteilung führt die Interaktion der Blasen mit den Einbauten zu einer erhöhten Oberflächenerneuerung und kann mithilfe von katalytisch beschichteten Gitternetzstrukturen zu einem bis zu 10 mal höheren Gas-Flüssigkeit Stoffaustausch führen [9].

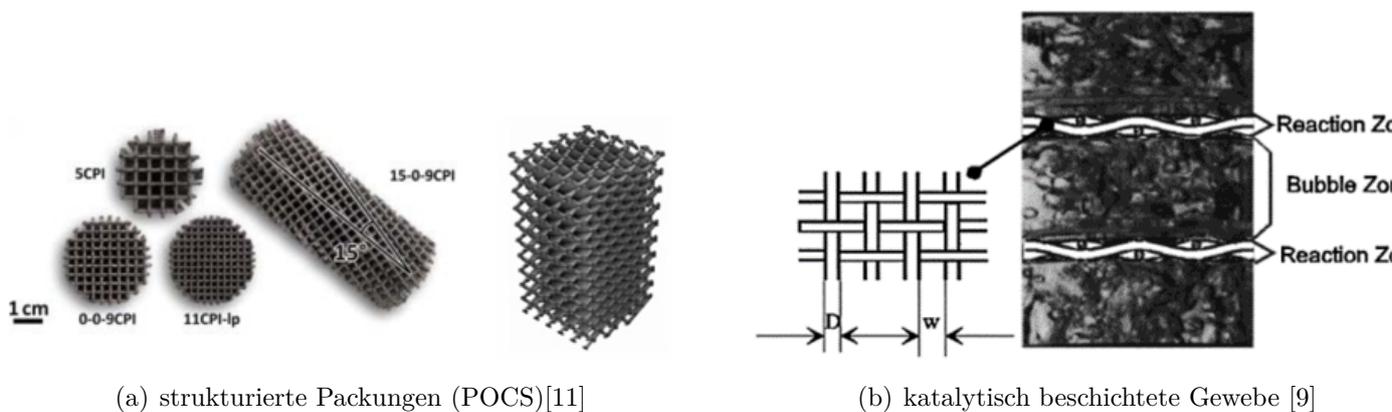


Abbildung 1: Beispiele von internen Strukturen

Das Verhalten der Blasenverteilung und die hydrodynamische Wechselwirkungen der Blasen mit Einbauten, wie strukturierten Packungen und Gitternetzen, sind jedoch noch unzureichend erforscht. Ein grundlegendes Verständnis über den Einfluss von allen relevanten Prozessparametern wie Blasengröße, Stoffeigenschaften der Flüssigkeit und Eigenschaften des Zylinders, können zur Optimierung der Bedingungen bei der Blasenverteilung beitragen. Die Blasenzerfallsversuche können sowohl numerisch als auch experimentell durchgeführt

werden. Für die Simulation der Blasen-Gitternetz Interaktion wendet Baltussen et al. [2] die VoF-IB Methode an und konnte bereits erste Eindrücke über die Einfluss- und Zerteilungskriterien sammeln. Abhängig von der Eötvös-Zahl zeigen die Blasen unterschiedliches Verhalten bei der Interaktion mit dem Gitternetz. In allen Simulationen kann eine partielle Entnetzung des Gitternetzes beobachtet werden. Segers [16] hat in Experimenten das Zerteilungsverhalten von Blasen an einem einzelnen Zylinder als Modell für strukturierte Packungen untersucht. Die Versuche sind bei unterschiedlichen Blasengrößen, Viskositäten der Flüssigkeit und Zylinderdurchmessern durchgeführt worden. In seinen Beobachtungen hat sowohl die Viskosität der Flüssigkeit als auch der äquivalente Blasendurchmesser einen Einfluss auf das Blasenzerteilungsverhalten, wohingegen die Variation des Zylinderdurchmessers keine Änderung bewirkte. Segers [16] konnte ein Zerteilungskriterium charakterisieren, ab dem Blasen sich an dem Zylinder zerteilen und ihm nicht mehr ausweichen oder an der ihm haften bleiben. Mittels der Phasenfeld-Methode erstellten Cai et al. [4] Simulationen der hydrodynamischen Interaktionen einer Blase an strukturierten Packungen mit unterschiedlichem Kontaktwinkel, die einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf und das Zerteilungsverhalten bei der Blase-Zylinder Interaktion zeigen. Experimentelle Arbeiten im Bezug auf die Benetzungseigenschaften bei der Blasenzerteilung sind bis jetzt noch nicht bekannt.

Auf Basis der von Cai et al. [4] entwickelten Simulationen und dem experimentellen Aufbau von Segers [16] soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine experimentelle Untersuchung des Einflusses des Benetzungsverhaltens auf die Blasenzerteilung stattfinden. Dabei soll ergänzend zu der Arbeit von Segers [16] ein Modellexperiment aufgebaut werden, an dem die Blasenzerteilung an Zylindern mit unterschiedlichen Benetzungsverhalten durchgeführt wird. Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen des Kontaktwinkels auf den Aufbruch einer Blase an einem einzelnen Zylinder zu untersuchen und die Simulationen von Cai et al. [4] zu validieren/falsifizieren. Die Erkenntnisse sollen dazu beitragen, den hydrodynamischen Ablauf der Interaktion von Blasen mit internen Strukturen und den Einfluss von Flüssigkeits- und Zylindereigenschaften auf die Blasenzerteilung besser zu verstehen und im realen Betrieb in einer Blasensäule oder anderen Mehrphasenreaktoren umsetzen zu können.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zum Aufstiegsverhalten von Einzelblasen sowie bereits bestehende Literatur vorgestellt.

2.1 Blasensäulenreaktoren

Blasensäulenreaktoren werden für die Vermischung und die chemische Reaktion von Gas und Flüssigkeiten eingesetzt. Ein Gas wird am Boden einer mit Flüssigkeit gefüllten Blasensäule durch ein Einsteckrohr oder ein gelochtes Blech bzw. Begasungsrohr im Gleich- oder Gegenstrom eingeleitet und steigt in Blasenform in der kontinuierlichen Flüssigkeit auf. Hierbei nehmen die Blasen in ihrer Grenzschicht Flüssigkeit von unten nach oben mit sich und führen zu einer Durchmischung. Abhängig davon in welcher Phase sich das Endprodukt befindet, lässt es sich mit dem ausgehenden Flüssigkeits- oder Gasstrom entnehmen [12]. Aufgrund des hohen Flüssigkeitsanteils und der vergleichsweise geringen Phasengrenzfläche, eignen sich Blasensäulen hauptsächlich für Gas/Flüssigkeitsreaktionen, welche ein großes Flüssigkeitsvolumen benötigen und keine große Abhängigkeit der Phasengrenzfläche haben. Für viele Einsatzgebiete wird daher versucht die Phasengrenzflächen zu erhöhen, um die Prozessbedingungen zu optimieren. Bei Blasensäulen treten im Vergleich zu anderen Mehrphasenreaktoren einige nachteilige Faktoren ein, wie Blasenvereinigung, Rückvermischung der Flüssigkeit oder einen niedrigen Gas/Flüssigkeit Stoffaustausch.

Zur Reduzierung der bei einfachen Blasensäulen auftretenden Rückvermischungen und Erhöhung des Wärme- und Stoffaustausches, können Böden oder interne Strukturen wie Packungen [18] und Gitternetze (Periodic Open Cellular Structures, POCS) (Abb. 1a)[11, 10] eingebaut werden [20]. Strukturierte Packungen haben aufgrund ihrer hohen Porosität, großen spezifischen Oberfläche und dabei geringen Druckverlustes gute Wärmeleitfähigkeitseigenschaften und eine hohe mechanische Beanspruchbarkeit. Durch zusätzlich auftretende radiale Durchmischung bieten POCS einen großen Beitrag für einen intensiven Wärme- und Stoffaustausch [11]. Gitternetze bewirken eine Zerteilung der Blasen in kleinere Blasen, was zur Erneuerung der Oberflächen, Ausbildung größerer Phasengrenzflächen und damit erhöhtem Gas-Flüssigkeit Stoffaustausch [2].

Einen weiteren Einfluss auf den Prozess haben Form und Material der internen Strukturen. Höller et al. [9] haben in ihrer Arbeit die katalytische Beschichtung von gewebten Fasernetzen für den Einsatz in Blasensäulen untersucht. Das Konzept ist die Unterteilung der Blasensäule durch Fasernetze in zwei Zonen - eine Blasenzone und eine Reaktionszone. In der Blasenzone kommt es zu einer radialen Durchmischung der zwei Phasen und Sättigung der Flüssigkeitsphase, in der Reaktionszone reagieren Gas und Flüssigkeit durch Interaktion mit den katalytisch beschichteten Fasern (Abb. 1b) [9].

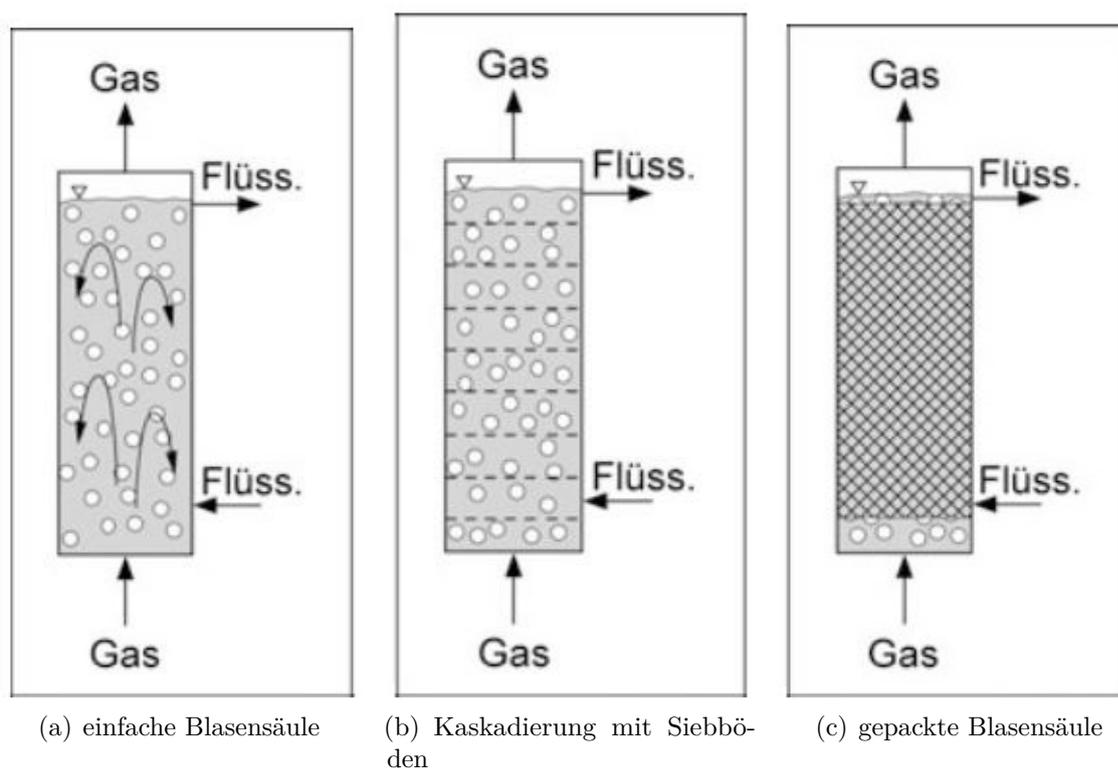


Abbildung 2: Bauarten von Blasensäulen [12]

2.2 Aufstiegsverhalten von Einzelblasen

Bei dem Aufstieg einer Luftblase in einer Flüssigkeit wirkt neben der Auftriebskraft auch die entgegengesetzte Widerstandskraft der Flüssigkeit. In der Beschleunigungsphase überwiegt die Auftriebskraft der Widerstandskraft und die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase nimmt zu. Mit zunehmender Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase nimmt auch die entgegengesetzte Widerstandskraft der kontinuierlichen Phase zu bis es zu einem Gleichgewicht der beiden Kräfte kommt und sich die Endgeschwindigkeit u_B der Blase einstellt. Die durch die Flüssigkeit wirkende Widerstandskraft F_R ist in Gleichung (1) dargestellt, wobei η_l die dynamische Viskosität der kontinuierlichen Phase bezeichnet, u_B die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase und d_{eq} den äquivalenten Blasendurchmesser entsprechend (2).

$$F_R = 3 \cdot \pi \cdot \eta_l \cdot u_B \cdot d_{eq} \quad (1)$$

Der volumenäquivalente Durchmesser d_{eq} gibt den Durchmesser einer Kugel mit gleichem Volumen an wie die betrachtete Blase. Das Blasenvolumen ist hierbei als V_B gekennzeichnet.

$$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_B}{\pi}} \quad (2)$$

Die Auftriebskraft F_A wird durch die Dichtedifferenz $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$ des Gases der Blase und der umgebenden Flüssigkeit, der Gewichtskraft g und des Blasenvolumens V_B bestimmt.

$$F_A = g \cdot \Delta\rho \cdot V_B \quad (3)$$

2.2.1 Kennzahlen

Zur Beschreibung des Aufstiegsverhaltens einer Luftblase dienen verschiedene charakteristische Kennzahlen.

Die **Reynoldszahl** bildet das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften und dient zur Kennzeichnung der dimensionslosen Steiggeschwindigkeit der Blase. Sie berechnet sich aus der Dichte der Flüssigkeit ρ_l , der Blasenendgeschwindigkeit u_B , dem äquivalenten Durchmesser der Blase d_{eq} und der dynamischen Viskosität der Flüssigkeit η_l .

$$Re = \frac{\rho_l \cdot u_B \cdot d_{\text{eq}}}{\eta_l} \quad (4)$$

Die **Eötvös-Zahl** bildet das Verhältnis von Auftriebskraft zu Oberflächenspannung. Sie beschreibt die Blasengröße als Quadrat des dimensionslosen Äquivalentdurchmessers der Blase. $\Delta\rho$ bezeichnet hierbei die Dichtedifferenz der Flüssigkeitsphase und der Gasphase, g die Gewichtskraft und σ die Oberflächenspannung.

$$Eo = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_{\text{eq}}^2}{\sigma} \quad (5)$$

Die Eigenschaften der Phasen werden durch die **Morton Zahl** beschrieben, die lediglich von den Stoffwerten der Flüssigkeitsphase und der Luft abhängig ist.

$$Mo = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot \eta_l^4}{\sigma^3 \cdot \rho_l^2} \quad (6)$$

Die Blasenform und die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase ist sowohl von der Eötvös- als auch der Morton Zahl abhängig [8].

Die **Weber-Zahl** dient zur Beschreibung der Interaktion zwischen Blase und Zylinder. Sie setzt sich aus dem Verhältnis von kinetischer Energie und Oberflächenenergie zusammen.

$$We = \frac{\rho_l \cdot u_B^2 \cdot d_{\text{eq}}}{\sigma} \quad (7)$$

2.2.2 Blasenformen

Die Form einer aufsteigenden Blase unter Einfluss der Schwerkraft lässt sich in drei Kategorien einteilen:

- a.) Sphärisch
- b.) Ellipsoidisch
- c.) Kugel-/Ellipsoidkappen

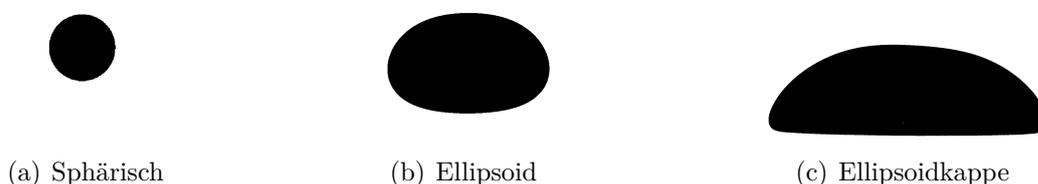


Abbildung 3: Blasenformen

Sehr kleine Blasen haben eine sphärische Form. In diesem Bereich überwiegt die Oberflächenspannung und bringt die Blase in die stabilste Form, in dem eine möglichst kleine Oberfläche ausgebildet wird. Größere Blasen erfahren aufgrund ihrer höheren Auftriebskraft und damit schnelleren Aufstiegsgeschwindigkeit auch größere Widerstandskräfte durch die Flüssigkeit. In diesem Fall haben die Widerstandskräfte einen deutlich stärkeren Einfluss im Vergleich zu der Oberflächenspannung und führen zu einer ellipsoiden Verformung der Blase. Bei sehr große Blasen ist die Oberflächenspannung im Gegensatz zu den hydrodynamischen Kräften zu vernachlässigen. Für diesen Fall haben die Blasen eine Form ähnlich einer Kugel- oder Ellipsoidkappe [8].

Diese Bereiche können abhängig von der Eötvös-, Reynolds- und Morton Zahl ausgedrückt werden. Eine Darstellung zeigt Abb. 4 von Clift et al. [5]. Die Linien kennzeichnen die logarithmischen Iso-Linien der Morton Zahlen. Die Viskosität der kontinuierlichen Phase hat im gezeigten Bereich wenig bis keinen Einfluss auf die Blasenform [5]. Während Blasen ellipsoider Form lediglich bei hohen Reynoldswerten und im mittleren Bereich der Eötvös-Zahl auftreten, kommen sphärische und kappenförmige Blasenformen hauptsächlich bei sowohl hohen Reynoldswerten als auch hohen Eötvös-Werten vor. Der in dieser Arbeit untersuchte Bereich ist in Abb.4 rot markiert.

Für die Charakterisierung der Blasenform wird das Seitenverhältnis der Blase definiert als $S_v = \frac{h}{w}$ und berechnet sich aus dem Quotienten von Blasenbreite und Höhe (Abb.

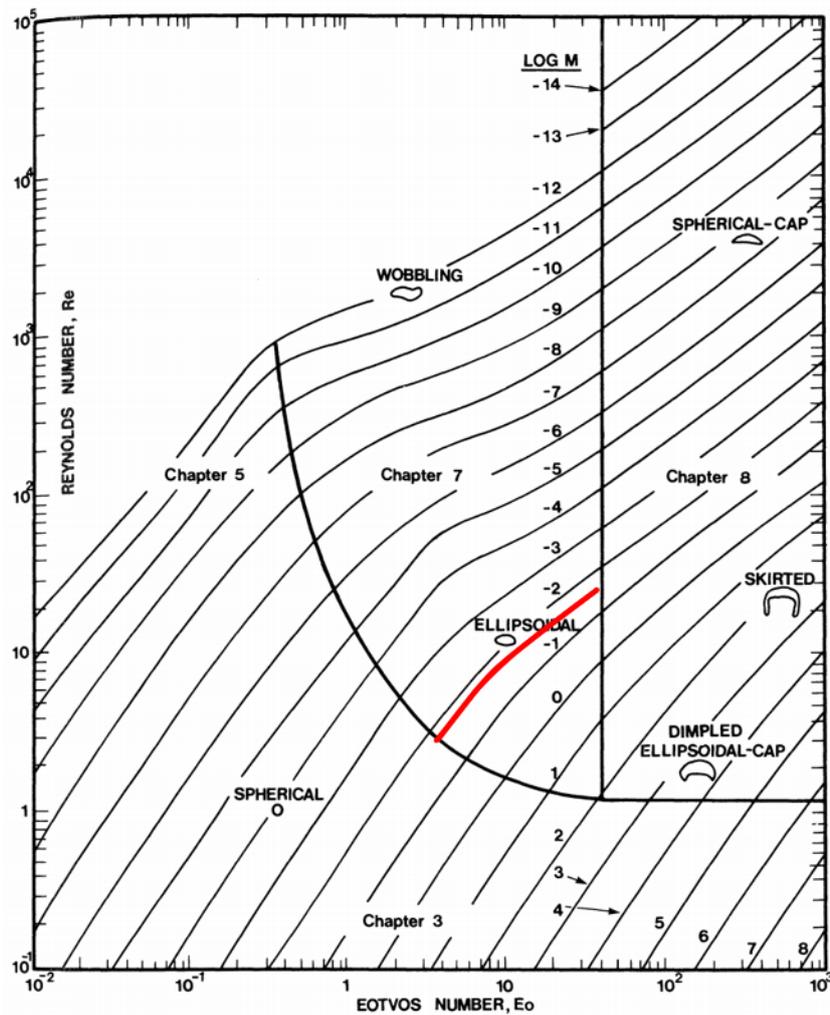


Abbildung 4: Charakteristik von Blasen im Schwerfeld in Flüssigkeiten [5]

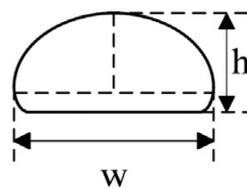


Abbildung 5: Seitenverhältnis einer Blase [13]

5). Ein Seitenverhältnis des Wertes 1 entspricht daher einer ideal sphärischen Blase. Ein Seitenverhältnis <1 einer ellipsoiden Blase.

Aoyama et al. [1] stellt in seiner Arbeit eine Korrelation des Seitenverhältnis S_v einer Blase über die dimensionslose Kennzahl Ω nach Gleichung (9) auf, welche beide aus der Reynolds-Zahl und der Eötvös-Zahl abgeleitet werden und eine Beziehung des Seitenverhältnisses und der Morton-Zahl des Systems herstellen.

$$S_v = \frac{1}{(1 + 0,016 \cdot Eo^{1,12} \cdot Re)^{0,388}} \quad (8)$$

$$\Omega = Eo^{1,12} \cdot Re \quad (9)$$

2.3 Blase-Zylinder Interaktion

Bei der Interaktion einer aufsteigenden Blase mit einem Gitternetz oder einem einzelnen Zylinder führen eine Reihe an Einflussfaktoren zu unterschiedlichen Vorgängen. Die genauen hydrodynamischen Vorgänge und Mechanismen der Blasenzerteilung sind bis heute noch größtenteils unbekannt.

Baltussen et al. [2] untersucht in Ihrer Arbeit numerisch die Wechselwirkungen zwischen einer einzelnen Blase und einem Gitternetz mithilfe der kombinierten VoF-IB Methode. Das Ergebnis zeigt, dass kleinere Blasen und/oder kleinere Gitteröffnungen dazu führen, dass die Blase an der Gitternetz-Unterseite hängen bleibt, wohingegen größere Blasen $Eo > 4$ sich stärker verformen und sich durch das Gitternetz drücken. Dabei hat neben der Gitterstruktur auch der Zylinderdurchmesser einen Einfluss auf die Blasenzerteilung. Alle Simulationen zeigen eine partielle Entnetzung der Zylinderoberfläche bei der Interaktion mit der Blase, wodurch die Benetzungseigenschaften des Zylindermaterials einen Einfluss auf die Zerteilung haben können.

Segers [16] führt in seiner Arbeit unter anderem experimentelle Versuche zur Blasenzerteilung an einem einzelnen Zylinder in Abhängigkeit der Blasenposition, Zylinderdurchmesser, Blasengröße und Eigenschaften der Flüssigkeitsphase durch, welche neben einem besseren Verständnis des Verhaltens und den Kriterien bei der Blasenzerteilung auch zur Validierung vorhergehender Simulationen dienen soll. Die Experimente zeigen, dass Flüssigkeiten mit niedrigeren Viskositäten zu einer deutlich höheren Blasenzerteilungsrate führen als bei höheren Viskositäten. Dies ist auf die höhere Reynoldszahl zurückzuführen, welche dazu führt, dass sphärische Blasen in eine ellipsoide Form übergehen und damit eine größere Kontaktfläche für die Zylinderinteraktion besitzen. Ein Einfluss des Zylinderdurchmessers auf das Blasenzerteilungsverhalten konnte nicht beobachtet werden. Der Einfluss des Benetzungsverhaltens bleibt aber noch unbekannt und stellt ein wichtiges Kriterium für den Blasenzerfall an einem Zylinder da.

2.4 Benetzungsverhalten

Das Benetzungsverhalten eines Materials ist abhängig von der Oberflächenenergie. Diese bestimmt, ob eine Oberfläche von einer Flüssigkeit benetzt wird oder die Flüssigkeit abperlt. Der Kontaktwinkel Θ ist hierbei ein Maß für die Benetzbarkeit und beschreibt den Winkel zwischen Materialoberfläche (Kontaktlinie zwischen Flüssigkeit und Feststoff) und Tropfenrand. Bei einem Kontaktwinkel von 0° ist die Oberfläche vollständig benetzt. Bei einem Kontaktwinkel kleiner 90° findet eine partielle Benetzung statt. Ab einem Kontaktwinkel von 90° gilt eine Oberfläche als schlecht benetzbar. Der theoretische Grenzwert liegt in diesem Fall jedoch bei 180° . Diesem Grenzwert kommen superhydrophobe Materialien

sehr nahe, wobei in diesem Fall der Flüssigkeitstropfen annähernd kugelförmig auf der Oberfläche aufliegt [7].

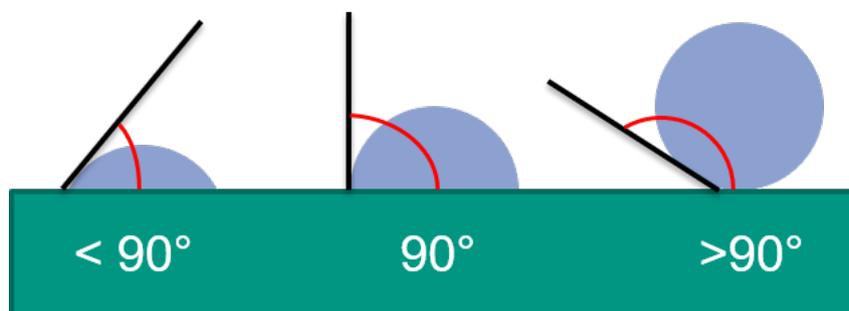


Abbildung 6: Kontaktwinkel von Tropfen auf einer Oberfläche

Die Youngsche Gleichung (siehe Abb. 7) stellt an dieser Stelle die Beziehung zwischen Oberflächenspannung der Flüssigkeit, Oberflächenenergie des Festkörpers und der Grenzflächenenergie zwischen Flüssigkeit und Festkörper im Bezug auf den Kontaktwinkel her [19].

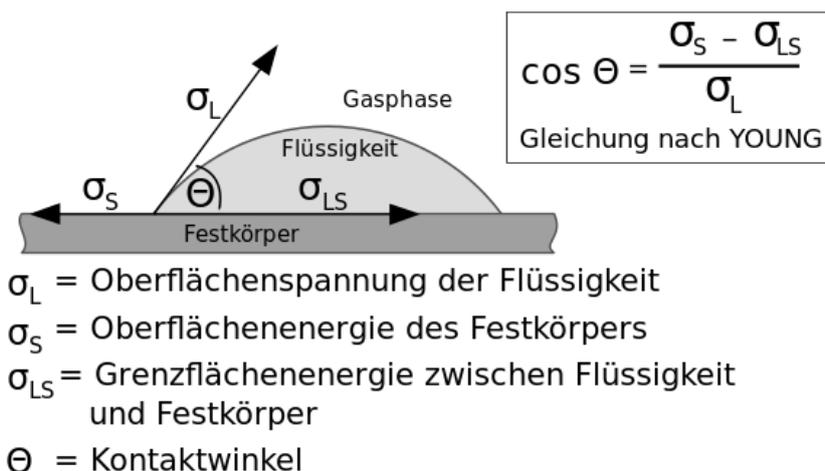


Abbildung 7: Youngsche Gleichung (Quelle:www.kruss.de)

Der Benetzungsgrad ist somit ausschlaggebend für die Wechselwirkungen zwischen einer Luftblase und einem Festkörper in einer Flüssigkeit. Bei großen Kontaktwinkeln wird ein Zylinder in einer Flüssigkeit schlecht bis gar nicht von der umgebenden Flüssigkeit benetzt. Bei niedrigen Kontaktwinkeln kommt es aufgrund einer hydrophilen Eigenschaft des Zylinders zu keiner Entnetzung des Zylinders durch eine auftreffende Luftblase.

Cai et al. [4] untersuchten in ihrer Arbeit die Abhängigkeit der Zerteilung einer aufsteigenden Luftblase in einer Flüssigkeit an einem horizontalen Zylinder von dem Kontaktwinkel des Zylindermaterials anhand numerischer Simulationen. Die Simulationen wurden mit den Versuchsdaten $Mo = 0,064$, $\rho_l = 1237,42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, einem Zylinderdurchmesser $D_{Zyl} = 3,1 \text{ mm}$ und der Blasengröße $d_{eq} = 9,14 \text{ mm}$ durchgeführt. Das Ergebnis zeigt,

dass der Kontaktwinkel einen Einfluss auf die Blasenverteilung und auf die Blasenform während der Interaktion mit dem Zylinder hat. Aus den Vorhersagen der Simulationen lässt sich schließen, dass niedrigere Kontaktwinkel sich für den industriellen Einsatz zur Erhöhung von Stoffaustausch und katalytischer Unterstützung des Prozesses aufgrund besserer Blasenverteilungseigenschaften vorteilhaft sind.

In Abb. 8 sind die Vorhersagen der Simulationen einer Blasenverteilung an einem Zylinder mit 30° , 60° und 90° Kontaktwinkel dargestellt. Die Simulationen bei einem Kontaktwinkel von 30° und 90° müssen noch experimentell validiert werden.

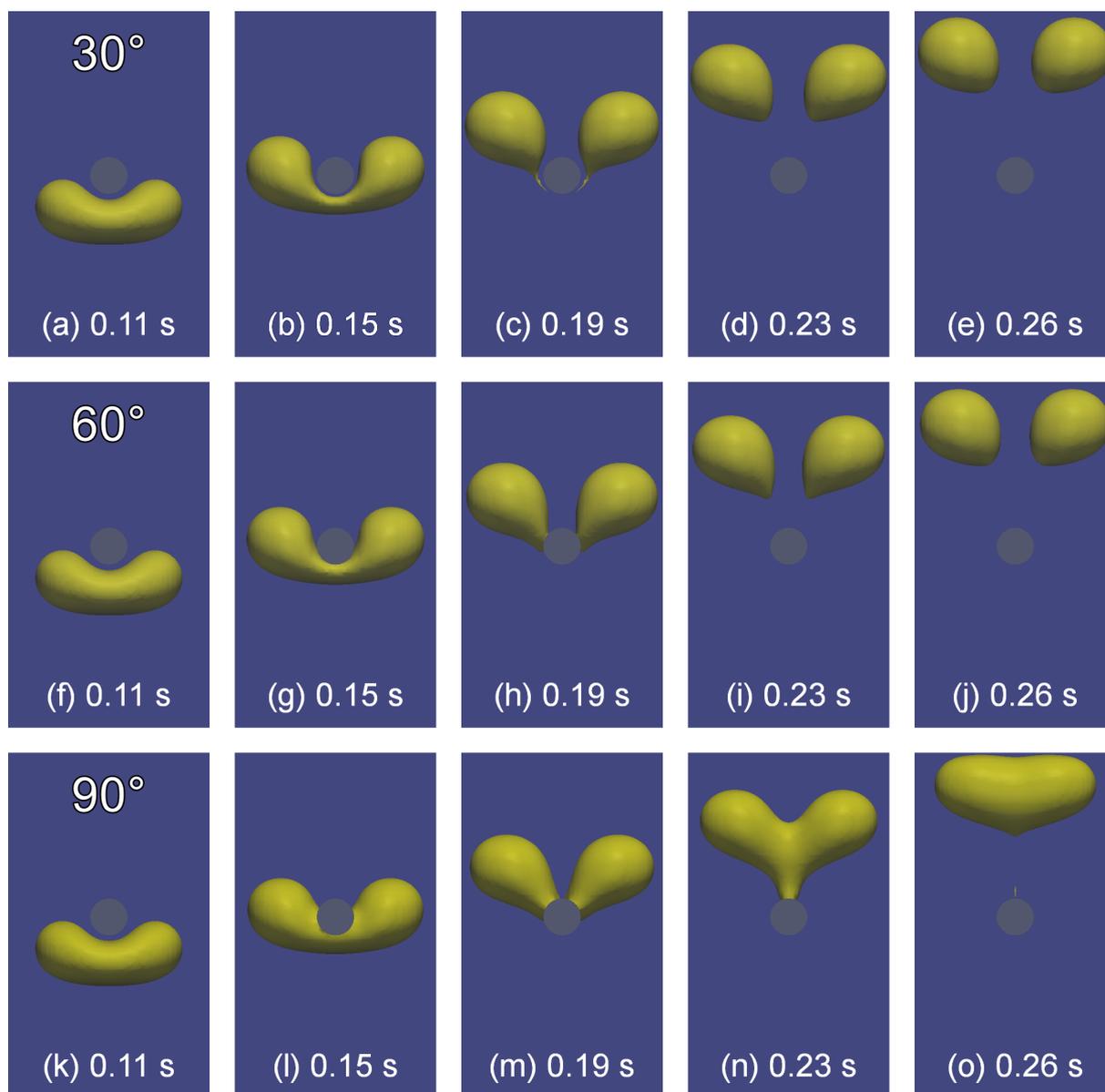


Abbildung 8: Simulation, Blasenzerfall an einem Zylinder mit 30° , 60° und 90° [4]

Das Verhalten bei der Interaktion einer Blase mit einem einzelnen Zylinder lässt sich folglich in drei unterschiedliche Fälle unterteilen. Abhängig von den Eigenschaften der Blase, der Flüssigkeitsphase und dem Zylinder weicht die Blase dem Zylinder entweder

aus, wird zerteilt oder verformt sich und entnetzt den Zylinder partiell [2, 4].

1.) Blase weicht Zylinder aus - keine Zerteilung

Blasen kleiner Größe und sphärischer Form neigen dazu, bei Kontakt mit dem Zylinder an der Unterseite hängen zu bleiben oder dem Zylinder auszuweichen [2]. Durch ihre sphärische Form besitzen sie im Gegensatz zu ellipsoiden Blasen nur eine relativ kleine Kontaktfläche, die mit dem Zylinder interagieren kann [16]. In diesem Fall zerteilt sich die Blase an dem Zylinder nicht.

2.) Zerteilung der Blase in zwei Tochterblasen

Blasen ab einem bestimmten äquivalenten Blasendurchmesser mit einer Ellipsoid-/ Ellipsoidkappenform und einer ausreichend hohen Aufstiegsgeschwindigkeit u_B zerteilen sich bei dem Auftreffen auf den Zylinder in zwei Tochterblasen. Ein Kriterium für die Zerteilung einer Blase an einem Zylinder ist die Weber-Zahl (7). Anhand der Weber Zahl lässt sich sagen, ob es beim Aufprall der Blase auf den Zylinder zu einer Zerteilung kommt oder die Blase nur von dem Zylinder abprallt. In diesem Fall existiert ein kritischer Wert $1 < We < 5$, ab dem eine Blasenzerlegung stattfindet. Eine höhere Viskosität der kontinuierlichen Phase führt hierbei zu einer Verringerung der kinetischen Energie und damit auch zu einer kleineren Weber-Zahl [16].

3.) Umschließung und partielle Entnetzung des Zylinders - keine Zerteilung

Größere Blasen besitzen auch eine größere Kontaktfläche zwischen Blase und Zylinder und umschließen den Zylinder während der Interaktion. Weißt die Zylinderoberfläche einen Kontaktwinkel $\geq 90^\circ$ auf, wird die Zylinderoberfläche teilweise entnetzt und die Blase vereinigt sich nach passieren des Zylinders wieder, sodass keine Zerteilung stattfindet (Abb. 8 k-o) [4].

Plateau-Rayleigh-Instabilität Bei der Zerteilung von Blasen kann es zur Bildung von kleinen Satellitenblasen kommen, welche aus einem feinen Gasfaden entstehen, der unter dem Zylinder die beiden Tochterblasen verbindet und mit fortschreitendem Aufsteigen der Blase sich immer weiter verdünnt bis er einen kritischen Wert überschreitet und reißt [2][16].

Die treibende Kraft für diesen Vorgang ist die Plateau-Rayleigh-Instabilität, welche auf der Tendenz von Flüssigkeiten ihre Oberfläche aufgrund der Oberflächenspannung zu minimieren, beruht. Grund hierfür ist der energetisch günstigere Zustand einer Flüssigkeit, wenn sie von gleichartigen Molekülen umgeben ist. Die Zahl der entstehenden Satellitenblasen ist abhängig von der Länge des sich bildenden Gasfadens [3].

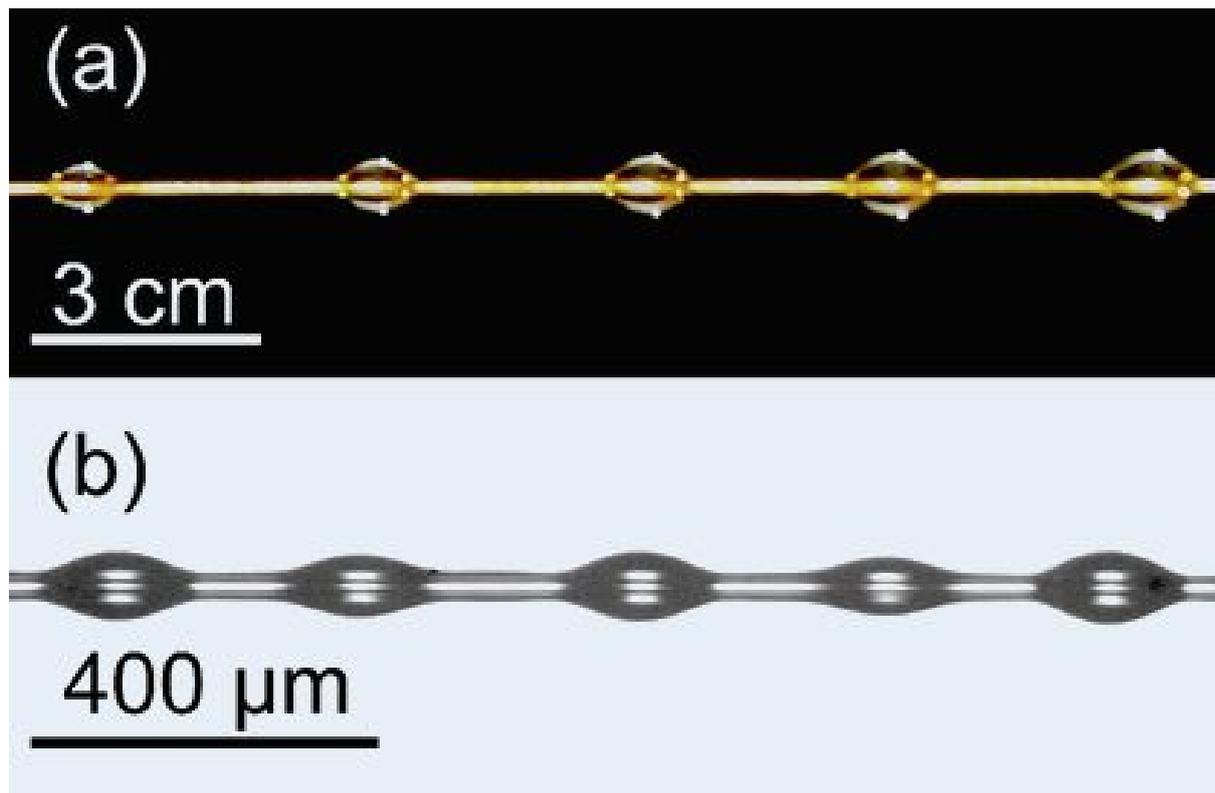


Abbildung 9: Zerfall eines a.) Honigfilms und b.) Lackfilms in kleine Tropfen
(Quelle: H.&S. Haefner&AG Jacobs)

Für einen zylindrischen Fluidfaden mit dem Radius r_f und einer sinusförmigen Störung $R = r_f + \Delta r_0 \cdot \sin(\frac{2\pi x}{\lambda})$ breiten sich Störungen mit einer Wellenlänge von $\lambda > 2 \cdot \pi r_f$ mit der Zeit deutlich aus. Störungen mit einer Wellenlänge von $\lambda_m = 8,89r$ wachsen am schnellsten und führen letztendlich zu einem Zerfall des Gasfadens in kleine Kugeln mit einem durchschnittlichen Abstand von λ_m und einem Durchmesser von $d_k = 3,78r_f$ [17].

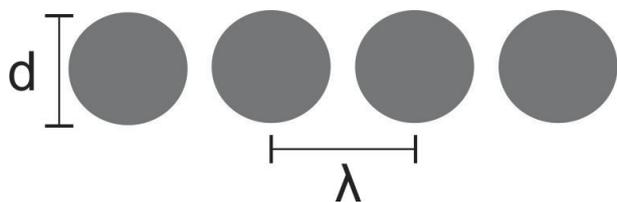


Abbildung 10: Plateau-Rayleigh Wellenlänge

3 Experimenteller Aufbau und Versuchsdurchführung

In diesem Abschnitt wird der experimentelle Aufbau gezeigt, mit dem die Versuche zur Blasenverteilung an einem Zylinder durchgeführt wurden. Der Versuchsaufbau orientiert sich an dem von Segers [16].

3.1 Versuchsaufbau

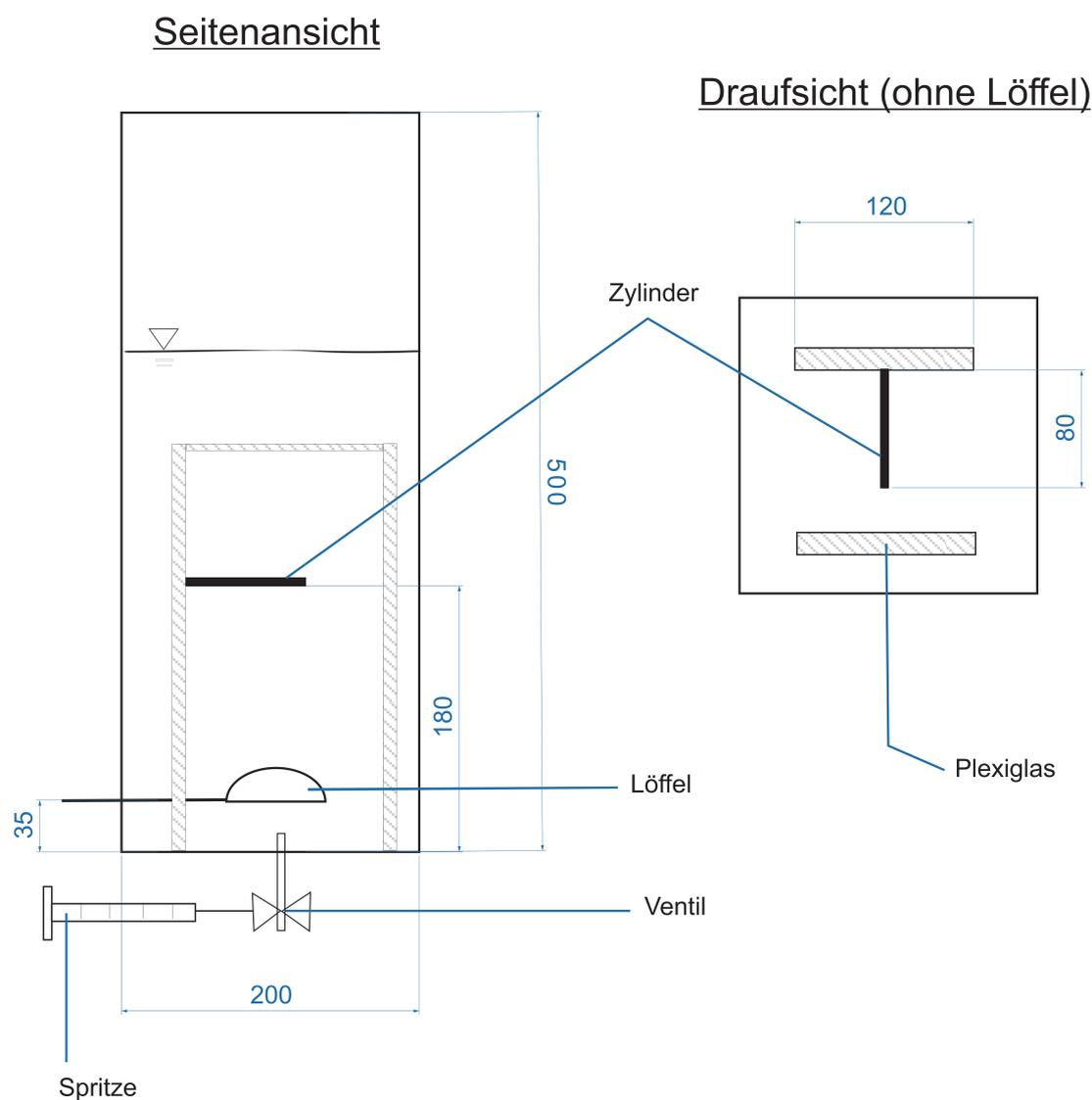


Abbildung 11: Experimenteller Aufbau (alle Angaben in mm)

Für die Experimente wird ein optisch zugänglicher Plexiglas Behälter mit den Abmessungen $[H \times B \times T]$ $500 \times 200 \times 200$ verwendet. Als Modellflüssigkeit kommt wie bei Segers [16] eine Glycerin-Wasser Mischung zum Einsatz, die sich aufgrund der hohen Viskosität besonders

gut für die Untersuchungen der Blasenverteilung eignet, da sich so eine stabile Blasenform ausbilden kann und Vorgänge aufgrund der niedrigeren Aufstiegs geschwindigkeit besser beobachtet werden können.

Die Glycerin-Wasser Mischung in dem Plexiglas Behälter wird zu Beginn der Arbeit selbst gemischt und enthält 90 Massen-Prozent Glycerin. Die Stoffwerte der verwendeten Flüssigkeit sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Dichte wird mithilfe eines Pyknometers durch vier Messungen bei 25°C bestimmt. Die Viskosität wird bei 25°C mit einem ARES-G2 Rotationsrheometer ermittelt. Die Oberflächenspannung ist von einer Glycerin-Wasser-Mischung mit ähnlicher Dichte, Viskosität und Morton Zahl der Literatur entnommen [13].

Gewichtsprozent Glycerin	90%
Dichte ρ_l	1233 $[\frac{kg}{m^3}]$
Viskosität η_l	0,1567 $[\frac{kg}{m \cdot s}]$
Oberflächenspannung σ_l	66 $[\frac{g}{s^2}]$
Morton-Zahl	0,0167

Tabelle 1: Stoffwerte der Glycerin-Wasser Mischung bei 25°C

Am Boden des Behälters kann durch einen Einlass ein festgelegtes Volumen Luft mittels einer Spritze injiziert werden. Die Luft wird anschließend mit einem Löffel, welcher im Inneren des Behälters direkt über dem Einlass befestigt ist, aufgefangen und zu einer Blase vereinigt. Durch Drehen des Löffels lässt sich die Luftblase zu einem bestimmten Zeitpunkt kontrolliert aufsteigen. Im oberen Abschnitt des Behälters ist direkt über dem Löffel ein horizontaler Zylinder befestigt auf den die Blase beim Aufstieg trifft.

Zur Aufnahme des Blasen aufstiegs und des Blasenzerfalls wird eine Hochgeschwindigkeitskamera (PCO.1200 HS) horizontal auf das Zylinderende gerichtet und zeichnet mit 639 Bildern pro Sekunde auf. Als Objektiv ist ein F/4 60mm Objektiv mit einem 25mm Zwischenring an der Kamera angebracht. Für eine gleichmäßige Ausleuchtung ohne Überbelichtung ist eine Belichtungszeit von 0,8ms gewählt worden. Durch die geringe Belichtungszeit ist eine sehr helle Lichtquelle notwendig, welche ein Veritaslight Constellation 120E LED Strahler liefert.

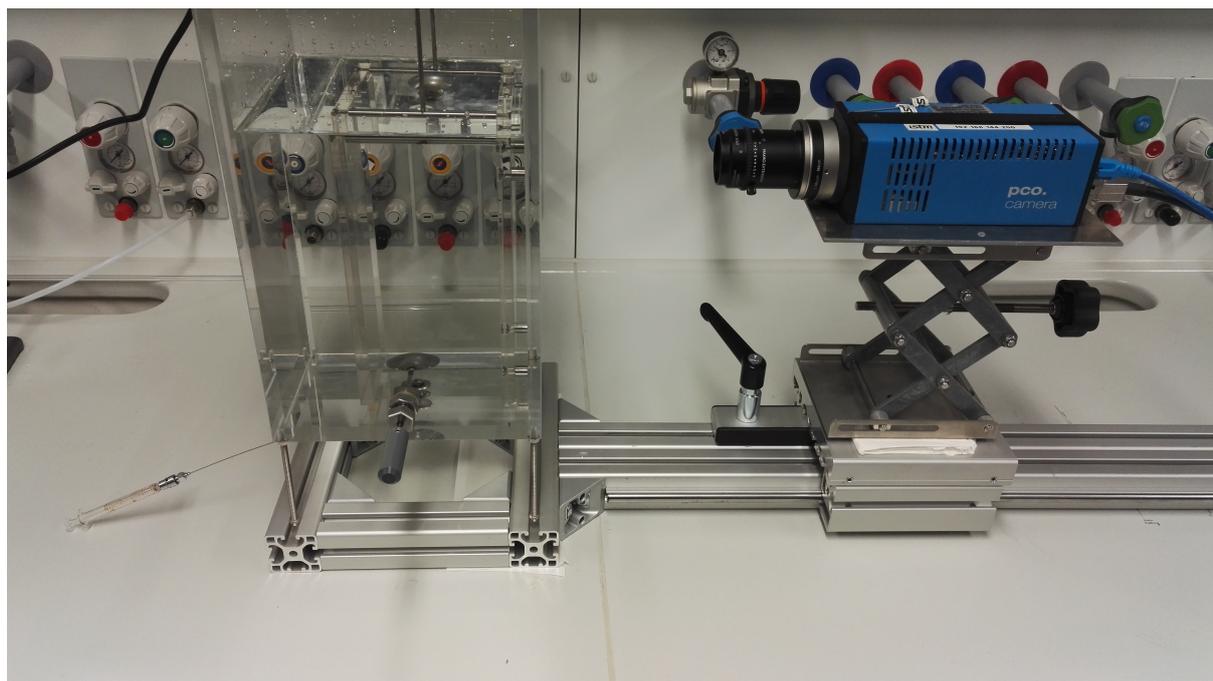


Abbildung 12: Versuchsaufbau mit Kamera

Für die Experimente ist die Kamera auf die Ebene des Zylinderendes fokussiert, sodass sowohl Zylinder als auch Blase scharf gestellt sind. Die Position des Zylinders und des Löffels müssen so gewählt werden, dass die Blase so nah wie möglich am Zylinderende auftritt, ohne über das Zylinderende herauszuragen. In den Versuchen treffen die Blasen 5-10 mm hinter dem Zylinderende auf.

3.2 Versuchsparameter

Zur Bestimmung der Abhängigkeit des Blasenzerfalls von dem Kontaktwinkel werden vier verschiedene Zylindermaterialien mit unterschiedlichen Benetzungseigenschaften ausgewählt. Um einen möglichst großen Bereich der Benetzungseigenschaften abzudecken werden für die Versuche Zylinder aus Glas, Edelstahl, Teflon und einem hydrophob beschichteten Glasstab verwendet, um sowohl kleine als auch große Kontaktwinkel zu gewährleisten, welche den vorausgehenden Simulationen sehr nahe kommen. Die hydrophobe Beschichtung der Zylinder wurde vom Institut für Toxikologie und Genetik (ITG) (Gruppe P. Levkin) des KIT angefertigt. Der Kontaktwinkel der verwendeten Materialien ist mit der Aufnahme eines einzelnen Tropfens der Glycerin-Wasser Mischung auf einer planen Platte und anschließender Messung über die Bildbearbeitungssoftware *ImageJ* (<https://ImageJ.nih.gov/>) bestimmt worden.

Der Kontaktwinkel bei den getesteten Materialplatten entspricht bei Glas 40° , Edelstahl 60° und Teflon 90° . Die hydrophobe Beschichtung weist einen Kontaktwinkel von 150° auf

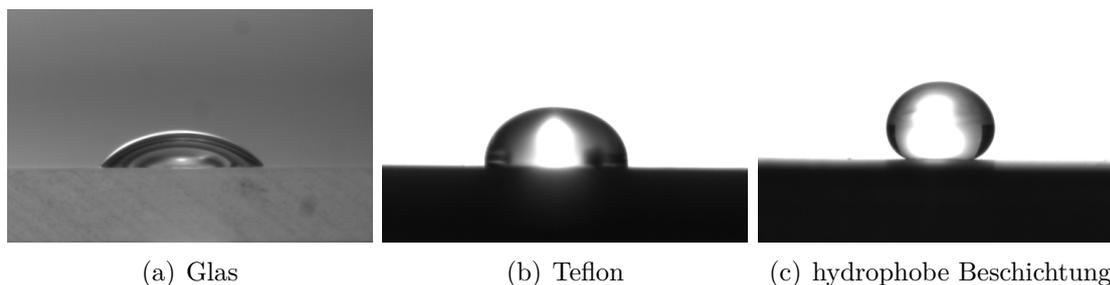


Abbildung 13: 90% Glycerin Topfen auf a) Glas b) Teflon c) hydrophober Beschichtung

(Abweichungen $\pm 2^\circ$).

Zusätzlich werden ebenfalls die Zylinderdurchmesser variiert und Versuche von jedem Material mit einem Zylinderdurchmesser von 3 mm, 4 mm und 5 mm angefertigt.

Als Blasenvolumen werden die in Tabelle 2 aufgelisteten Volumina mit ihrem entsprechenden Äquivalentdurchmesser in der Arbeit untersucht.

Blasenvolumen V_B [μL]	50	100	150	250	500	750	1000
Äquivalentdurchmesser d_{eq} [mm]	4,57	5,76	6,59	7,82	9,85	11,27	12,41

Tabelle 2: Untersuchte Blasengrößen

3.3 Analysemethodik

Die Versuchsaufnahmen werden vollständig mit dem Bildanalyseprogramm *ImageJ* ausgewertet.

3.3.1 Vorversuche zur Skalierung und Validierung

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit und Validität der Experimente, werden zu Beginn Vorversuche durchgeführt. Ziel der Vorversuche ist eine möglichst geringe Abweichung der berechneten Volumina aus den Aufzeichnungen in Bezug auf das injizierte Luftvolumen zu erreichen und die Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen mit Daten aus der Literatur zu vergleichen. Zudem ist eine kleine Varianz der einzelnen Versuche untereinander notwendig, damit Ergebnisse mit verschiedenen Parametern verglichen werden können.

Hierfür ist es notwendig die Skalierung der Kameraaufnahmen zu bestimmen. Die Skalierung in *ImageJ* wird anhand der bekannten Maße der Zylinder und mithilfe von Millimeterpapier berechnet und beträgt 32 Pixel pro Millimeter. Die Skalierung ist notwendig, um die Pixel in eine Längeneinheit umzurechnen und somit Abmessungen der Blase und die Kriterien bei der Blasenverteilung anhand der Aufnahmen bestimmen zu können.

Um die Einspritzung eines genauen Volumens zu gewährleisten, werden für die Vorversuche die Blasen volumina 250 μL , 500 μL und 1000 μL gemäß der Spritzenskala ausgewählt. Die Aufzeichnung der Blase beim Aufstieg werden 150 mm über dem Startpunkt, direkt unter dem Zylinder angefertigt. Diese wurden anschließend zur Messung des Blasen volumens und der Aufstiegsgeschwindigkeit verwendet. Zur Analyse über *ImageJ* wird für jedes Volumen eine Fitting-Methode festgelegt, um das Blasen volumen mithilfe von geometrischen Körpern möglichst genau zu bestimmen. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Blase rotationssymmetrisch ist. Da sich die Blasenform mit steigendem Volumen ändert, wird für jedes Blasen volumen eine andere Fitting-Methode verwendet. Für die Blasenform mit dem Volumen 250 μL werden zur Anpassung zwei unterschiedlich große Ellipsoid-Hälften eingesetzt.

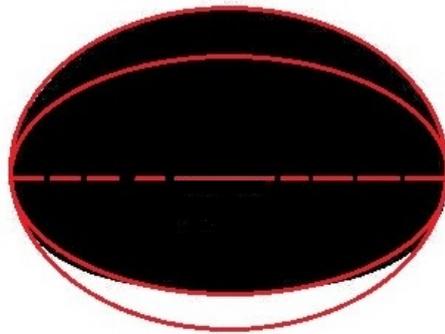


Abbildung 14: Fitting-Methode bei 250 μL Blasen

Das Volumen berechnet sich dann wie folgt:

$$V_{250} = 0,5 \cdot (V_{Ell,o} + V_{Ell,u}) \quad (10)$$

$$V_{Ell} = 4/3 \cdot \pi \cdot h_{Ell,o} \cdot r_{Blase}^2 \quad (11)$$

Bei 500 μL Volumen wird die Blasenkappe mit einer Ellipsoid-Hälfte beschrieben, der untere Bereich setzt sich aus einem Zylinder und einem Rotationskörper zusammen.

Das entsprechende Volumen berechnet sich wie folgt:

$$V_{500} = 0,5 \cdot (V_{Ell,o} + V_{Zylinder} + V_{Rota}) \quad (12)$$

$$V_{Ell} = 4/3 \cdot \pi \cdot h_{Ell,o} \cdot r_{Blase}^2 \quad (13)$$

mit

$$V_{Zylinder} = \pi \cdot h_{Zylinder} \cdot R_{Zylinder}^2 \quad (14)$$

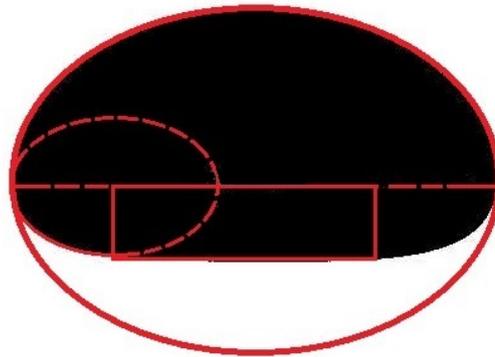


Abbildung 15: Fitting-Methode bei 500 µL Blasen

und

$$V_{Rota} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot a^2 \cdot h_{Zylinder}}{3} + h_{Zylinder} + R_{Zylinder}^2 \right) \quad (15)$$

Bei 1000 µL Volumen ist für die Blasenkappe die Beschreibung mittels einer Ellipsoidkappe notwendig. Der Blasenboden wird analog zu Blasen mit 500 µL Volumen aus einem Zylinder und einem Rotationskörper zusammengesetzt.

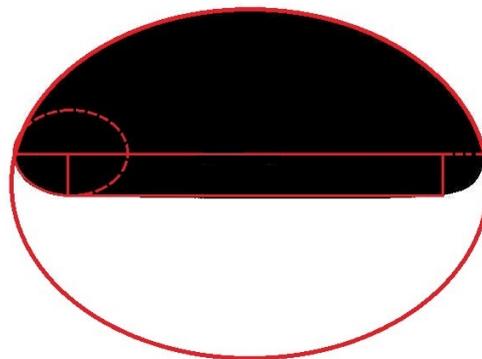


Abbildung 16: Fitting-Methode bei 1000 µL Blasen

Die Ergebnisse der Volumenberechnungen über *ImageJ* werden mit dem über die Spritze injizierten Volumen verglichen, um die Genauigkeit der graphischen Analysemethoden zu überprüfen. Bei einer Skalierung von 32 px/mm wurden mit dieser Methode 6,6% Abweichung bei 250µL Blase, 1,93% 500µL und 3,38% bei 1000µL Blasenvolumen erzielt. Die zunehmende Abweichung bei größeren und kleineren Blasen als 500µL ist aufgrund der Tiefenschärfe zu erklären. Bei 32 px/mm ist die Schärfenebene auf den Bereich eingestellt an dem sowohl 500µL große Blasen als auch das Zylinderende scharf gestellt ist. Größere Blasen müssen aufgrund ihres größeren Blasendurchmesser weiter hinten aufgestiegen lassen werden, damit sie nicht über das Zylinderende herausragen. Dadurch liegen sie

weiter von der eingestellten Ebene der Tiefenschärfe entfernt. Eine höhere Tiefenschärfe und damit Genauigkeit für die Messungen lässt sich durch die Wahl eines Objektivs mit geringerer Brennweite und kleinerem Blendenwert erzielen.

Zusätzlich werden die Aufnahmen des Blasenauftriebs für die Berechnung der Blasesgeschwindigkeit herangezogen und analysiert. In *ImageJ* wird die y -Position der Blasen Spitze jedes 10. Bildes der Kameraaufnahme gemessen, was einem Zeitabstand von 0,0156 Sekunden zwischen den Positionsmesswerten entspricht. Die y -Messwerte werden gegen die Zeit aufgetragen, um anhand des Verlaufes festzustellen, ob die Blase bereits ihre Endgeschwindigkeit erreicht hat oder es in diesem Bereich noch zu Änderungen der Aufstiegs geschwindigkeit kommt. Zur Validierung und Auswertung wird der Mittelwert aller gemessenen Blasesgeschwindigkeiten gebildet und mit der aus Gleichung (16) gezeigten Korrelation von Park et al. [15] zur Berechnung der Aufstiegs geschwindigkeit einer Luftblase in einer verunreinigten Flüssigkeit verglichen, wobei f_{sc} den Grad der Verunreinigung definiert.

$$v_b = \frac{1}{\sqrt{f_{sc}^2 \cdot \left(\frac{144 \cdot \mu_l^2}{g^2 \cdot \rho_l^2 \cdot d_{eq}^4} + \frac{\mu^{4/3}}{0,14425^2 \cdot g^{5/3} \cdot \rho_l^{4/3} \cdot d_{eq}^3} \right) + \frac{1}{\frac{2,14 \cdot \sigma_l}{\rho_l \cdot d_{eq}} + 0,505 \cdot g \cdot d_{eq}}}} \quad (16)$$

mit

$$f_{sc} = 1 + \frac{0,5}{1 + \exp\left(\frac{\log E_o + 1}{0,38}\right)}$$

3.3.2 Blasenzerfall

Hinsichtlich der Untersuchung von Abweichungen beim Blasenzerfall an dem Zylinder werden ausschließlich Aufnahmen beim Blasenzerfall in zwei gleich große Tochterblasen für die Analyse verwendet.

Es werden mit den Blasendurchmessern (4,57 / 5,75 / 6,6 / 7,8 / 9,84 / 12,4) mm für jedes Zylindermaterial und jeden Zylinderdurchmesser jeweils 10 Aufnahmen angefertigt, bei denen sich die Blase in zwei gleichgroße Tochterblasen zerteilt hat oder falls keine Zerteilung stattfindet den Zylinder mittig getroffen hat.

Für einen Vergleich werden von jeder Aufnahmereihe die besten drei Versuche ausgewählt und Einzelbilder von der ersten Verformung der Blase bei der Interaktion mit dem Zylinder bis zur vollständigen Zerteilung in *ImageJ* ausgewertet. Dazu wurde ein Schwarz/Weiß Schwellenwert von 3,5 Prozent eingestellt, um nicht benötigte Bild Information herauszulöschen. Die Sequenzen wurden anschließend in direkter Nebeneinanderstellung verglichen.

Als Vergleichskriterien wurde der Verlauf der Blasen zerteilung mit eventuellen Wechselwirkungen von Blase und Zylinder und die Flüssigkeit-Filmschicht-Dicke zwischen Blase und

Zylinder festgelegt. Die Filmschichtdicke δ_F wurde definiert als geringster Abstand der Blase bei der Zerteilung zu dem mittleren Punkt der Zylinderunterseite.

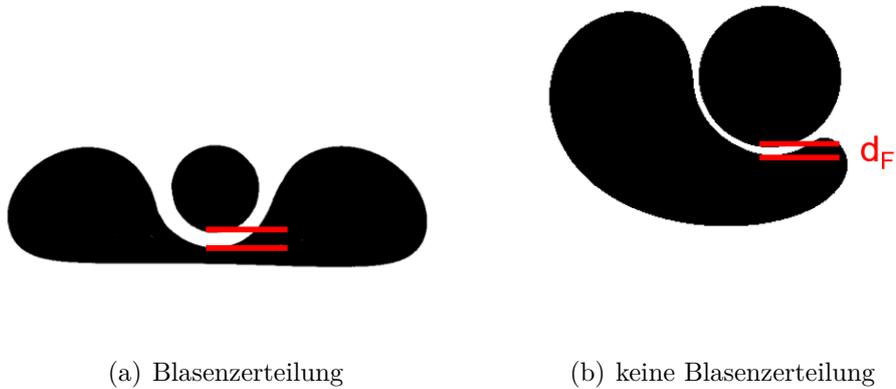


Abbildung 17: Definition Filmschichtdicke d_F Blase-Zylinder

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen des Blasenauftiegsverhaltens und der Blasenverteilung mit unterschiedlichen Blasengrößen an Zylindern aus vier verschiedenen Materialien und drei unterschiedlich großen Durchmessern erläutert.

4.1 Blasenauftieg

Die Aufstiegs geschwindigkeit der Blase erhöht sich mit steigendem äquivalenten Blasendurchmesser (siehe Abbildung 18). Im Bereich unter dem Zylinder ändert sich die Aufstiegs geschwindigkeit nicht mehr und die Blase hat bereits ihre Endgeschwindigkeit erreicht.

In Abbildung 18 ist die Endgeschwindigkeit über dem äquivalenten Blasendurchmesser aufgetragen. Der Verlauf der Kurve ist abhängig von der Morton-Zahl. Bei kleinen Morton Zahlen ist ein großer Anstieg der Aufstiegs geschwindigkeit im Bereich von $2,7 \text{ mm} < d_{\text{eq}} < 7,8 \text{ mm}$ zu erkennen, wohingegen die Änderung der Aufstiegs geschwindigkeit ab einem Blasendurchmesser von 15,6 mm abflacht und sich asymptotisch einem Grenzwert zu nähern scheint. Bei großen Morton Zahlen erhöht sich die Aufstiegs geschwindigkeit mit steigendem Blasendurchmesser annähernd linear [13]. Die Ergebnisse der Aufstiegs geschwindigkeitsmessungen stimmen mit dem Verlauf der berechneten Werte der Korrelation von Park et al. [15] nach Gleichung (16) überein. Die Ungenauigkeiten bei größeren Blasen sind auf Abweichungen der Skalierung und den damit verbundenen Messungenauigkeiten zurückzuführen. Verglichen mit den Ergebnissen von Liu et al. [13] liegen die Messungen bei $Mo = 0,0166$ wie erwartet zwischen den beiden Kurven mit den Morton-Zahlen von 0,253 und 0,004887.

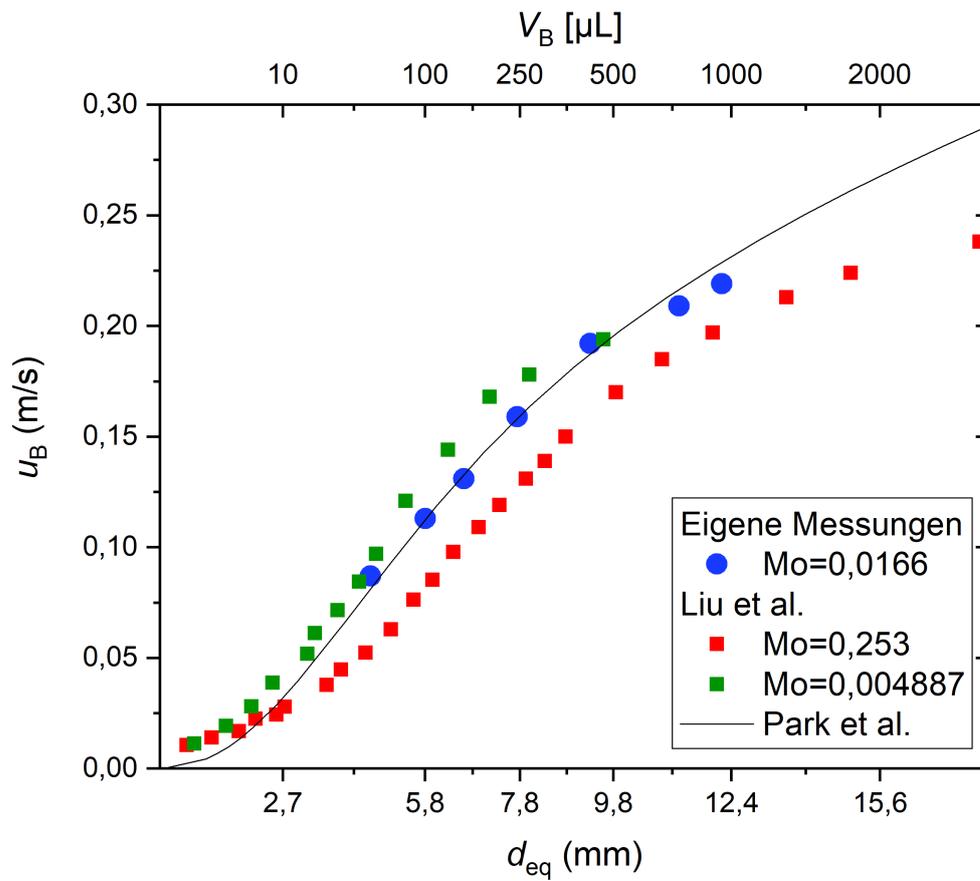


Abbildung 18: Endgeschwindigkeit über Äquivalentdurchmesser

Die Daten der Geschwindigkeitsmessungen der Blasen entsprechend ihrem äquivalenten Durchmesser und der dazugehörigen Reynolds- und Eötvös-Zahl sind in Tabelle 3 dargestellt. Im Bereich der Blasen mit einem Durchmesser von 4,57 bis 12,2 mm befindet sich die Reynolds-Zahl zwischen 3,5 und 21 und die Eötvös-Zahl zwischen 3,8 bis 28,2. Der Bereich der untersuchten Blasen ist in Abbildung 4 rot markiert und liegt vollständig im Gebiet der ellipsoiden Blasenformen.

V_B [μl]	d_{eq} [mm]	u_B [mm/s]	Reynolds-Zahl	Eötvös-Zahl
50	4,57	97,4	3,5	3,83
100	5,76	126,6	5,7	6,07
150	6,59	146,6	7,6	7,96
250	7,82	159,56	9,5	11,18
500	9,85	192,8	14,1	17,75
1000	12,41	219,44	21,0	28,18

Tabelle 3: Eigenschaften und Kennzahlen der Blasen

In Abbildung 19 ist das Seitenverhältnis der Blase über den Äquivalentdurchmesser aufgetragen und zeigt somit den Verlauf der Blasenform mit steigendem Blasendurchmesser.

Wie man in Abbildung 19 sehen kann, liegt das Seitenverhältnis bei $d_{eq} < 3$ mm bei 1, was einer sphärischen Blasenform entspricht. Ab Durchmessern von 3 mm verringert sich das Seitenverhältnis und die Blasen weisen eine ellipsoide Form auf. Die gemessenen Blasengrößen 7,8 mm, 9,8 mm und 12,4 mm liegen alle im Bereich ellipsoider Blasen. Auch in dieser Abbildung ist eine asymptotische Annäherung des Seitenverhältnis ab Blasendurchmessern von 15,6 mm zu erkennen.

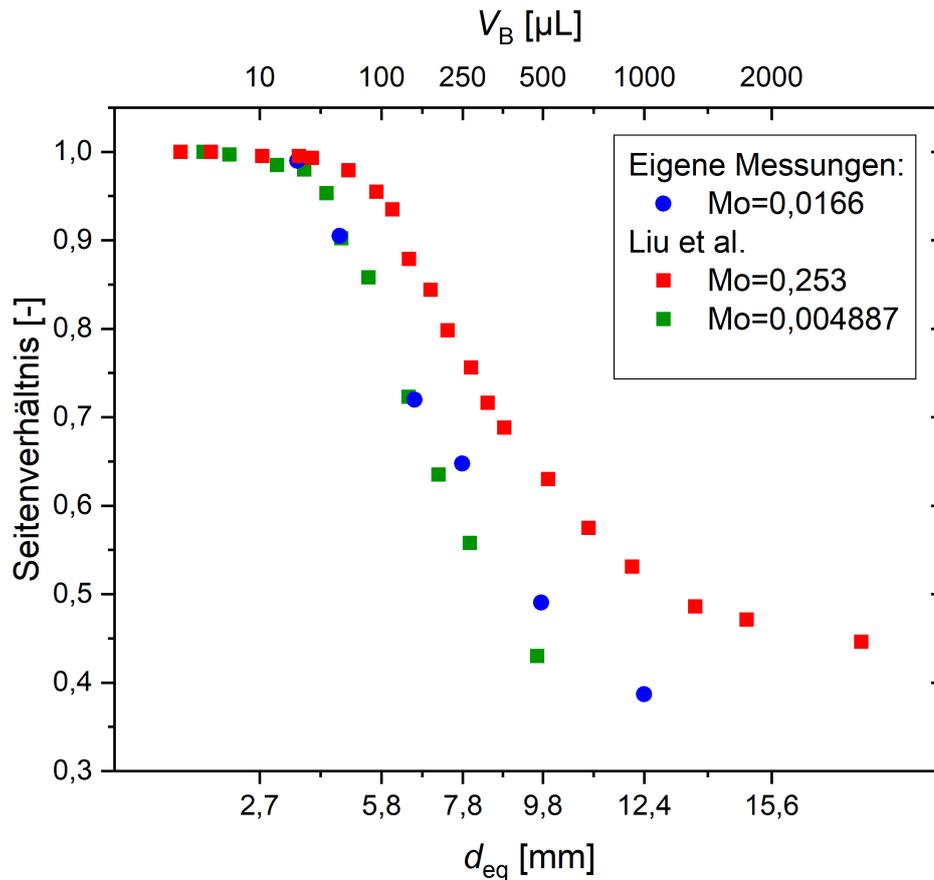


Abbildung 19: Seitenverhältnis über Äquivalentdurchmesser

In Abbildung 20 ist das Seitenverhältnis der Blasen über $\Omega = Eo^{1,12} Re$ aufgetragen und zeigt in einem Vergleich der eigenen Messdaten mit denen nach Gleichung (8) berechneten Werten der Korrelation von Aoyama et al. [1] eine genaue Übereinstimmung.

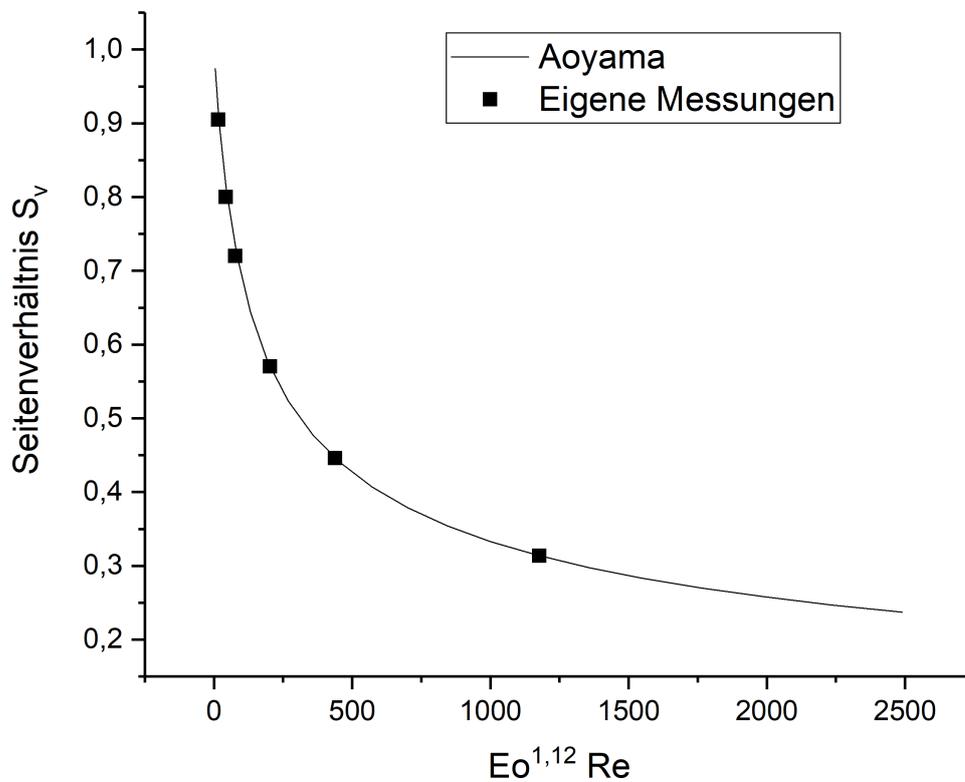


Abbildung 20: Vergleich der Messdaten mit der Korrelation von Aoyama et al. [1]

4.2 Blasenverteilung

Die Blasenverteilung ist abhängig von der Blasengröße und damit dem äquivalentem Blasendurchmesser. Die folgenden Abbildungen 21 - 32 zeigen einen Vergleich der Ergebnisse einer Interaktion von Einzelblasen mit den Durchmessern 3,6 mm - 12,4 mm an einem Zylinder mit 4 mm Durchmesser. Die Interaktion der Blasengröße $d_{eq} = 3,6$ mm ist an einem hydrophob beschichteten Zylinder und die Blasen mit $d_{eq} = 4,57 - 6,6$ mm an einem Glaszylinder untersucht worden. Die Verteilung der Blasengrößen 7,8 mm, 9,8 mm und 12,4 mm sind sowohl an Glas- als auch an an Teflon Zylindern und hydrophob beschichteten Glaszylindern mit 4 mm Durchmesser untersucht worden, um einen Einfluss des Kontaktwinkels in diesem Bereich auf die Blasenverteilung festzustellen. Es wurden ebenfalls Versuche mit einem Edelstahl-Zylinder durchgeführt, die ein übereinstimmendes Verhalten mit den Ergebnissen von Segers [16] zeigen und daher im folgenden Ergebnisteil nicht mit aufgeführt werden.

4.2.1 $d_{\text{eq}} = 4,57 \text{ mm}$ ($V_B = 50 \mu\text{L}$)

Luftblasen mit einem Blasendurchmesser von 4,57 mm sind mit einem Seitenverhältnis von $S_v = 0,9$ annähernd sphärischer Form.

Abbildung 21 zeigt die Wechselwirkungen zwischen Blasen mit $d_{\text{eq}} = 4,57 \text{ mm}$ an einem Glas Zylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$). Sobald die Blase auf den Zylinder trifft, verformt sie sich und rutscht seitlich an dem Zylinder vorbei ohne sich zu zerteilen. Die Blase verformt sich bereits kurz vor dem Zylinder und es bildet sich im kompletten Verlauf eine dünne Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder aus.

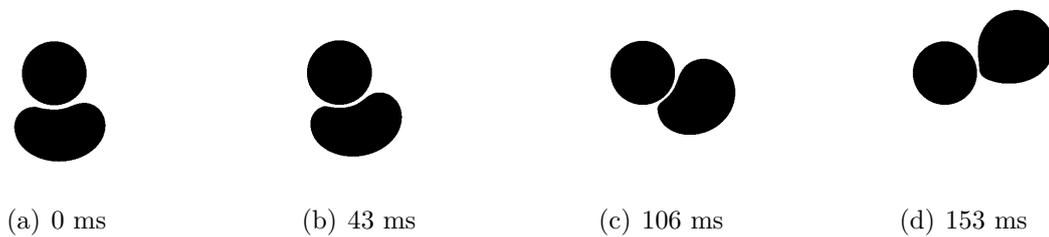


Abbildung 21: Interaktion einer Blase ($d_{\text{eq}} = 4,57 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

4.2.2 Kritischer Blasendurchmesser $5,76 \text{ mm} < d_{\text{krit}} < 6,6 \text{ mm}$

Zwischen den Blasendurchmessern von $d_{\text{eq}} = 5,76 \text{ mm}$ und $d_{\text{eq}} = 6,6 \text{ mm}$ existiert für alle untersuchten Zylindermaterialien ein kritischer Blasendurchmesser, ab dem es zu einer Blasenzerteilung bei Kontakt von Blase und Zylinder kommt. Dieser Bereich kann durch die Weber Zahl (Gl. 7) dargestellt werden und wurde auch von Segers [16] in seiner Arbeit beobachtet. Blasen mit einem Durchmesser von 6,6 mm ergeben eine kritische Weber-Zahl von $We_{cr} = 2,65$ und liegen damit in dem von Segers [16] definierten Bereich $1 < We_{cr} < 5$, ab dem es zu einer Blasenzerteilung kommt. Gemäß Abbildung 19 besitzen die Blasen in diesem Bereich ein Seitenverhältnis von $S_v < 1$ und somit eine ellipsoide Form, welche eine Blasenzerteilung durch eine größere Kontaktfläche mit dem Zylinder begünstigen.

Blasen mit einem Durchmesser von 5,76 mm weisen ein ähnliches Verhalten wie kleinere Blasen auf und weichen unter Verformung und Bildung einer dünnen Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Zylinderoberfläche und Blase dem Zylinder aus (Abbildung 22). In den Simulationen von Baltussen et al. [2] zeigen sich vergleichbare Verhalten, bei denen kleine Blasen den Zylindern ausweichen oder an der Zylinderunterseite haften bleiben, ohne zerteilt zu werden.

Blasen ab einem Durchmesser von 6,6 mm weisen eine größere Blasenoberseite auf und umschließen den Zylinder beim Auftreffen beidseitig. Bei mittigem Auftreffen der Blase

auf den Zylinder bildet sich an der Unterseite ein Gasfaden aus, der mit fortschreitendem Aufsteigen der Blase immer dünner wird, bis er reißt und die Blase sich anschließend in zwei kleinere Tochterblasen zerteilt (Abbildung 23).

Bei senkrechtem Auftreffen der Blasen mit $d_{\text{eq}} = 6,6 \text{ mm}$ auf die Mitte der Zylinderunterseite kommt es in jedem Fall zu einer Zerteilung, wohingegen bei nicht mittigem Auftreffen die Blasen sich an dem Zylinder vorbei drücken oder abprallen und es zu keiner Zerteilung kommt. Die Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder verhindert in beiden Fällen einen direkten Kontakt zwischen Blase und Zylinder und ist bei einer Blasenzerteilung an der Zylinderunterseite dicker als an den Seiten.

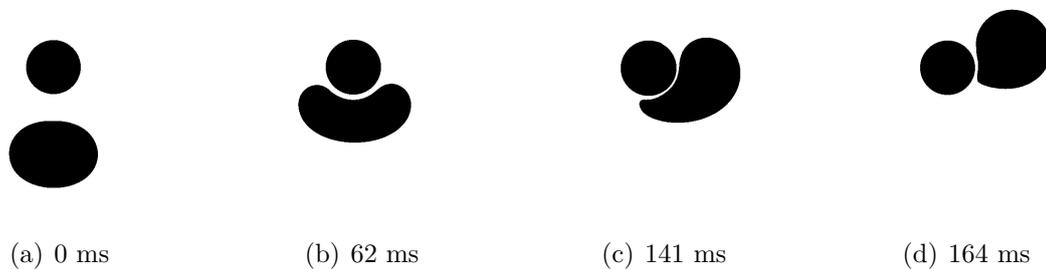


Abbildung 22: Interaktion einer Blase ($d_{\text{eq}} = 5,76 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

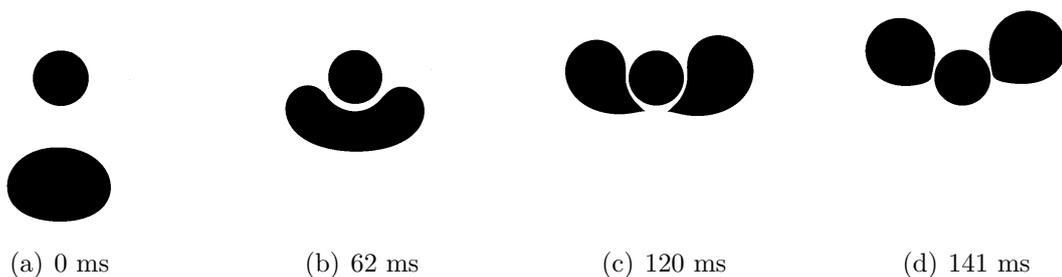


Abbildung 23: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 6,6 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

4.2.3 $d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$ ($V_{\text{B}} = 250 \mu\text{L}$)

Blasen ab $d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$ zerteilen sich an dem Zylinder unabhängig von der Position des Auftreffens an der Zylinderunterseite. Bei mittigem Auftreffen zerteilt die Blase sich in

zwei gleich große Tochterblasen, trifft die Blase nicht exakt mittig den Zylinder, zerteilt sie sich in zwei unterschiedlich große Tochterblasen. Im Gegensatz zu kleineren Blasen kommt es zur Bildung einer kleinen Satellitenblase, nachdem der Gasfaden, welcher die Blase bis zum letzten Zeitpunkt verbindet, reißt. Dieser ist auf den Aufnahmen jedoch nur unter starker Vergrößerung zu erkennen. Genauere Aufzeichnungen des Gasfadens und der Bildung von Satellitenblasen sind in Kapitel 4.3 aufgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Verlauf der Blasenzerteilung an einem Glaszylinder (Abb. 24), Teflonzylinder (Abb. 25) und hydrophob beschichteten Zylinder (Abb. 26). Es ist kein Einfluss der Benetzungseigenschaften der Zylinder auf das Blasenverhalten zu beobachten.

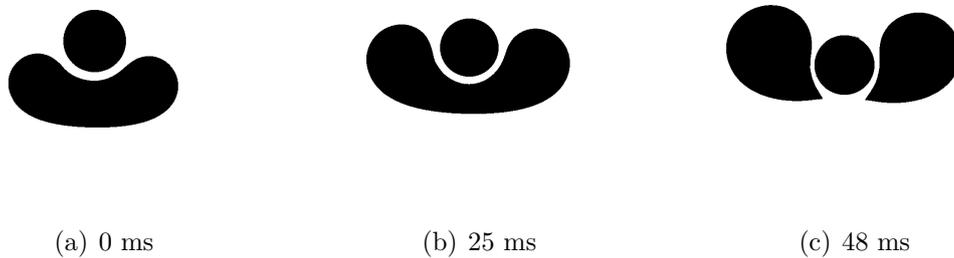


Abbildung 24: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

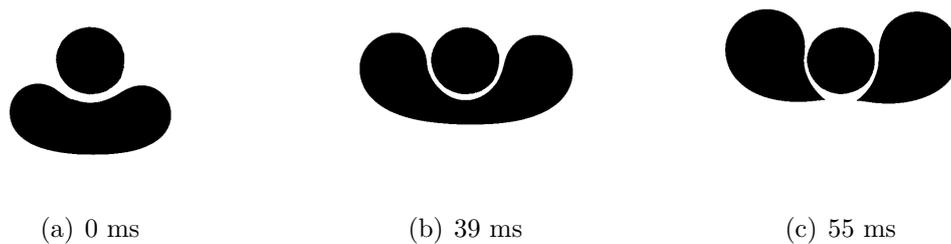


Abbildung 25: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$) an einem Teflonzylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

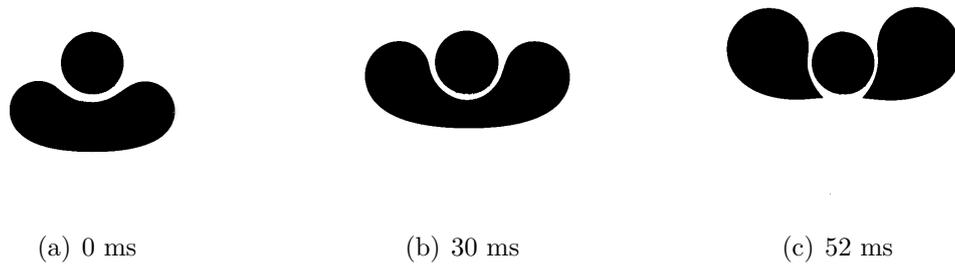


Abbildung 26: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 7,8 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder mit hydrophober Beschichtung ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

4.2.4 $d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$ ($V_{\text{B}} = 500 \mu\text{L}$)

Die Abbildungen 27-29 zeigen die Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$) an einem Glas-, Teflon- und hydrophob beschichteten Zylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$). Bei Blasendurchmessern von $9,8 \text{ mm}$ bilden sich bei der Zerteilung der Blasen am Zylinder zusätzlich drei kleine Satellitenbläschen, wobei die mittlere Satellitenblase an der Unterseite vom Zylinder haften bleibt und vor dem nächsten Versuch entfernt werden muss. Bei der Zerteilung an einem hydrophoben Zylinder wird die mittlere Satellitenblase nach kurzer Zeit von der Beschichtung des Zylinders absorbiert. Die äußeren beiden Satellitenblasen steigen seitlich am Zylinder vorbei nach oben. Segers [16] hat in seiner Arbeit ein identisches Verhalten der Zerteilung von Blasen dieser Größe und der Entstehung von drei Satellitenblasen beobachtet.

Die Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder ist bei Blasendurchmessern von $9,8 \text{ mm}$ deutlich dicker und besitzt eine minimale Dicke, ab der die Filmschicht nicht mehr dünner wird. Der restliche Ablauf der Blasenzerlegung ist ansonsten vergleichbar mit der Zerteilung von kleineren Blasen. Auch in diesem Fall bildet sich eine Filmschicht zwischen Blase und Zylinder und es sind keine Abweichungen des Zerteilungsverhaltens bei anderen Zylindermaterialien zu beobachten.

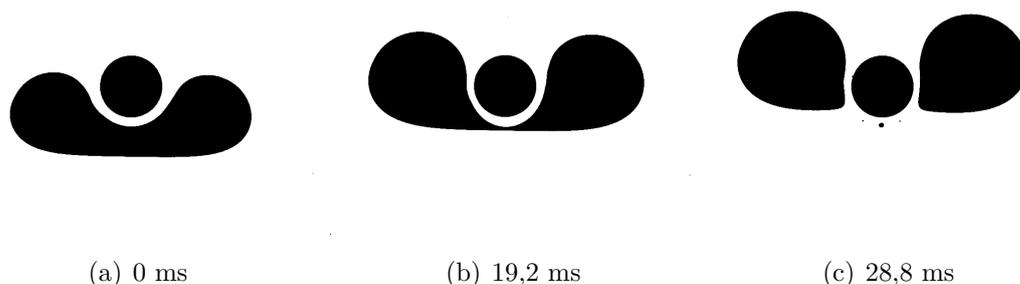


Abbildung 27: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

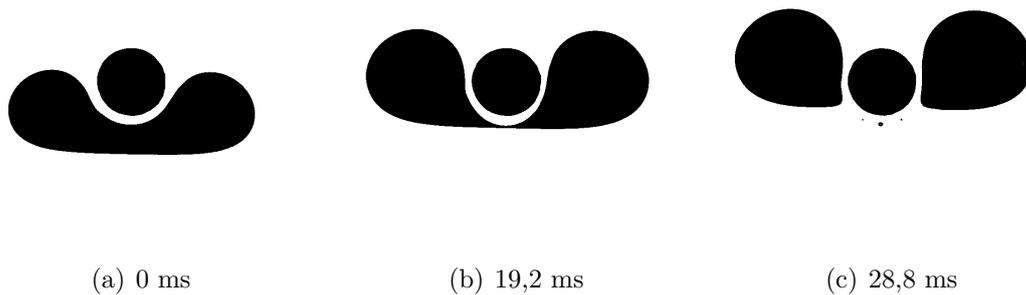


Abbildung 28: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$) an einem Teflonzylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

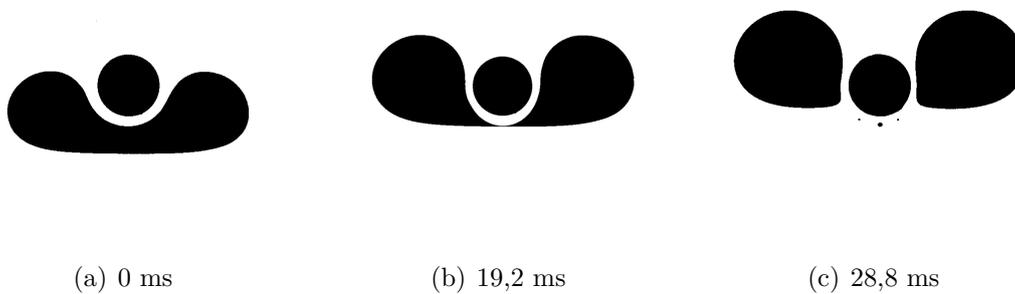


Abbildung 29: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 9,8 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder mit hydrophober Beschichtung ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

4.2.5 $d_{\text{eq}} = 12,4 \text{ mm}$ ($V_{\text{B}} = 1000 \mu\text{L}$)

Blasen mit einem Durchmesser von 12,4 mm weisen ein sehr ähnliches Zerteilungsverhalten gegenüber kleineren Blasen mit 9,8 mm Durchmesser auf. Kurz vor dem Zylinder verformen sich die Blasen und umschließen den Zylinder zum Teil bis sie sich in zwei Tochterblasen teilen. Je größer das Blasenvolumen ist, desto geringer ist dabei der Anteil der mit dem Zylinder interagierenden Blasenoberfläche. Wie bei Blasen mit $d_{\text{eq}} = 9,6 \text{ mm}$ entstehen durch das Reißen des Gasfadens, der bis zuletzt die beiden Tochterblasen verbindet, drei Satellitenblasen. Sowohl die Satellitenblasen als auch die Filmschicht d_F sind größer gegenüber Blasen mit $d_{\text{eq}} < 12,4 \text{ mm}$. Die mittlere der drei Satellitenblasen haftet bei Zylindern mit einem Kontaktwinkel von $\Theta \leq 90^\circ$ an der Unterseite und muss manuell entfernt werden. Bei Zylindern mit hydrophober Beschichtung wird sie schneller als bei Blasen mit 9,8 mm Durchmesser absorbiert.

Die Abbildungen 30-32 zeigen, dass während der Interaktion der Blase mit dem Zylinder bei Kontaktwinkeln von 40° , 90° und 150° kein Unterschied zu erkennen ist und das Verhalten bei allen Zylindermaterialien gleich ist. Die Aufzeichnungen von Segers [16] bei der Zerteilung von 12,4 mm großen Blasen in einer 90% Glycerin-Wasser Mischung an

einem Zylinder mit 6 mm Durchmesser zeigen ein exakt übereinstimmendes Verhalten. Sowohl der Zylinderdurchmesser als auch das Zylindermaterial zeigen keinen Einfluss auf die Blasenverteilung.

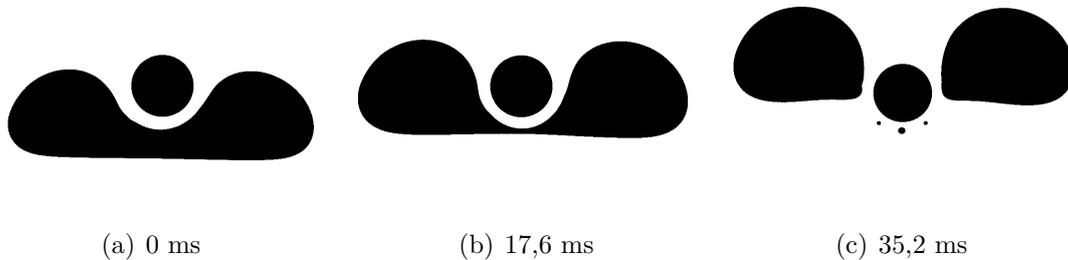


Abbildung 30: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 12,4 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

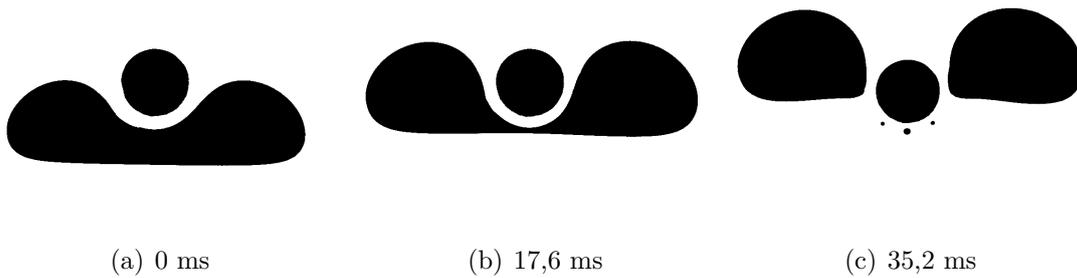


Abbildung 31: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 12,4 \text{ mm}$) an einem Teflonzylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

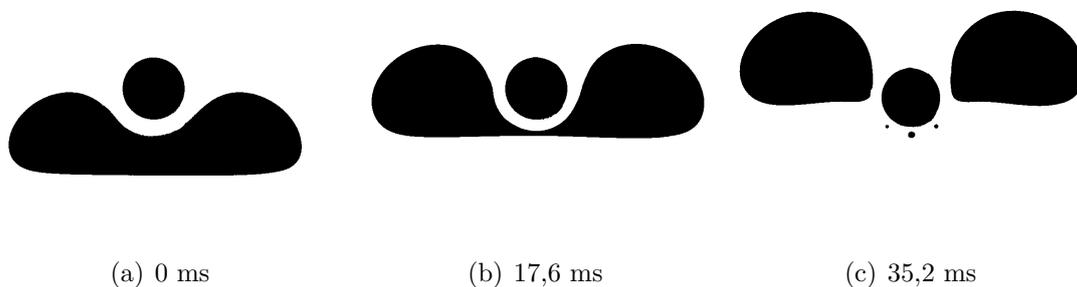


Abbildung 32: Zerteilung einer Blase ($d_{\text{eq}} = 12,4 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder mit hydrophober Beschichtung ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

4.3 Bildung von Satellitenblasen

Die Experimente zeigen eine Bildung von drei Satellitenblasen ab 500 μL Volumen, welche abhängig von dem Kontaktwinkel des Zylinders an der Zylinderunterseite haften bleiben oder vom Zylinder absorbiert werden.

Zur genaueren Untersuchung der Bildung und des Verhalten von Satellitenblasen bei der Blasenzerteilung ist der Übergangsbereich, ab dem es erstmals zur Bildung von Satellitenblasen kommt, genauer untersucht worden. Nach jedem Versuch sind an dem Zylinder zurück gebliebene Satellitenblasen entfernt worden, sodass sie folgende Untersuchungen nicht beeinflussen.

Bei Blasenvolumen von 250 μL bildet sich in den Versuchen erstmals eine sehr kleine Satellitenblase bei der Zerteilung, welche in den Aufzeichnung jedoch nur schwer zu erkennen ist. Ab einem Blasenvolumen von 350-375 μL bildet sich regelmäßig eine Satellitenblase bei der Blasenzerteilung, welche auf den Aufzeichnungen der Highspeed Kamera, aufgrund des größeren Volumen deutlich zu erkennen ist. Die gebildete Satellitenblase steigt langsam auf und haftet im Falle eines senkrechten und mittigen Auftreffens der Blase auf den Zylinder an der Zylinderunterseite fest. Im Bereich zwischen 375 μL und 425 μL entstehen zwei Satellitenblasen, welche seitlich am Zylinder vorbei aufsteigen.

In seltenen Fällen werden im Bereich von 350-425 μL anstatt 1-2 Satellitenblasen 5-8 sehr kleine Satellitenbläschen gebildet. Dieser Fall kann aber nur bei Blasendurchmessern in diesem Bereich reproduziert werden, bei denen der Gasfaden sehr dünn ist.

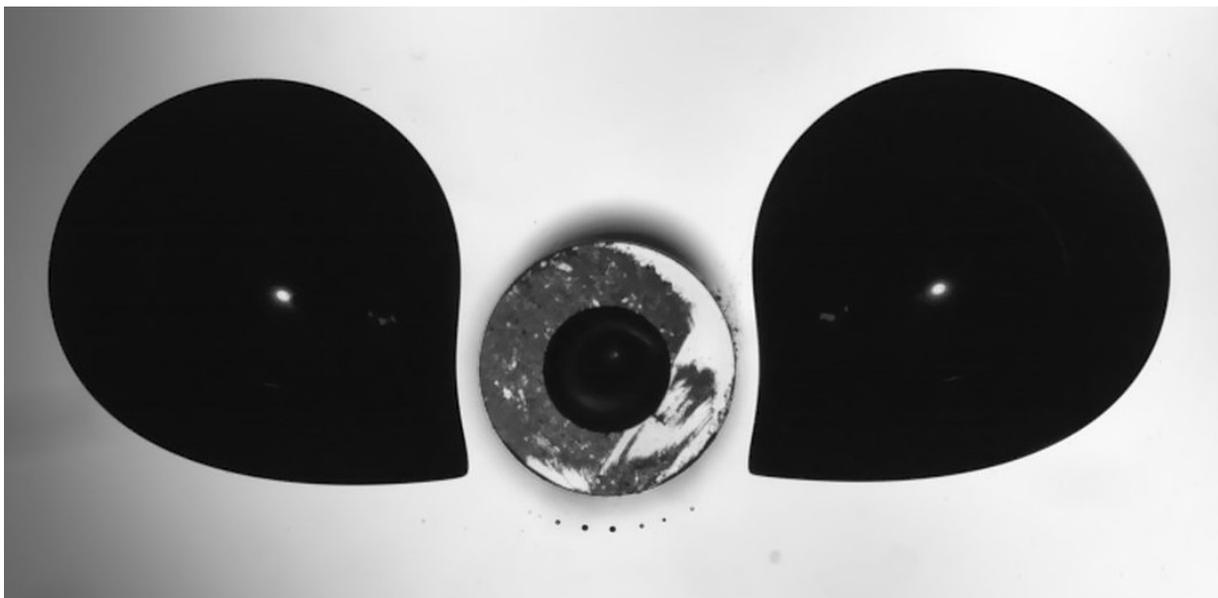


Abbildung 33: Sonderfall: Bildung von 8 Satellitenbläschen

Ab einem Blasenvolumen von 450 μL bis zu den untersuchten 1000 μL bilden sich in jedem Versuch drei Satellitenblasen, wobei die mittlere Satellitenblase die größte ist.



Abbildung 34: Bildung von 5 Satellitenblasen bei 425 μ L Blasenvolumen

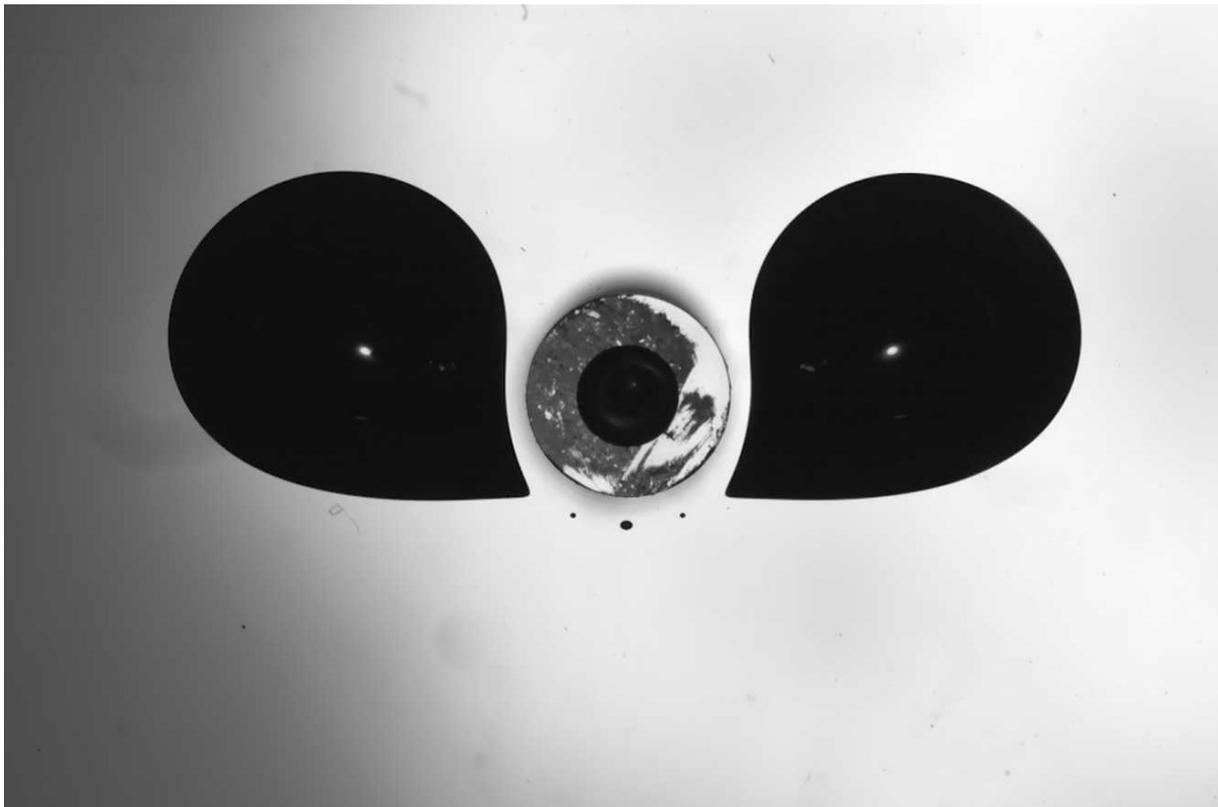


Abbildung 35: 3 Satellitenblasen bei 450 μ L Blasenvolumen

Im Bezug auf die Satellitenblasen hat das Benetzungsverhalten einen Einfluss auf die Interaktion von Satellitenblase und Zylinder. Während bei einem Kontaktwinkel von $\Theta = 90^\circ$ oder weniger die mittlere Satellitenblase an der Zylinderunterseite haften bleibt und vor dem nächsten Versuch per Hand entfernt werden muss, entnetzt sie bei Glaszylindern mit hydrophober Beschichtung den Zylinder von der Flüssigkeit und wird von dem Zylinder absorbiert. Dies tritt nur bei der Entstehung von einer oder drei Satellitenblasen auf. Entstehen zwei Satellitenblasen, weichen diese dem Zylinder aus und steigen seitlich auf. Bei größeren Blasen bilden sich ebenfalls größere Satellitenblasen, die schneller von dem Zylinder absorbiert werden als kleinere. Abhängig von dem injizierten Blasenvolumen, hat sich nach weiteren vier bis acht Versuchsdurchläufen die Luft der Satellitenblasen direkt über dem Zylinder als Luftblase angesammelt. Diese Luftansammlung lässt sich nicht durch einen Stab verdrängen. Erst nach zwei bis vier Tagen Wartezeit hat sich

die Luftansammlung an dem Zylinder durch Diffusion der Luft in das Glycerin-Wasser Gemisch verringert und die Experimente können fortgesetzt werden.

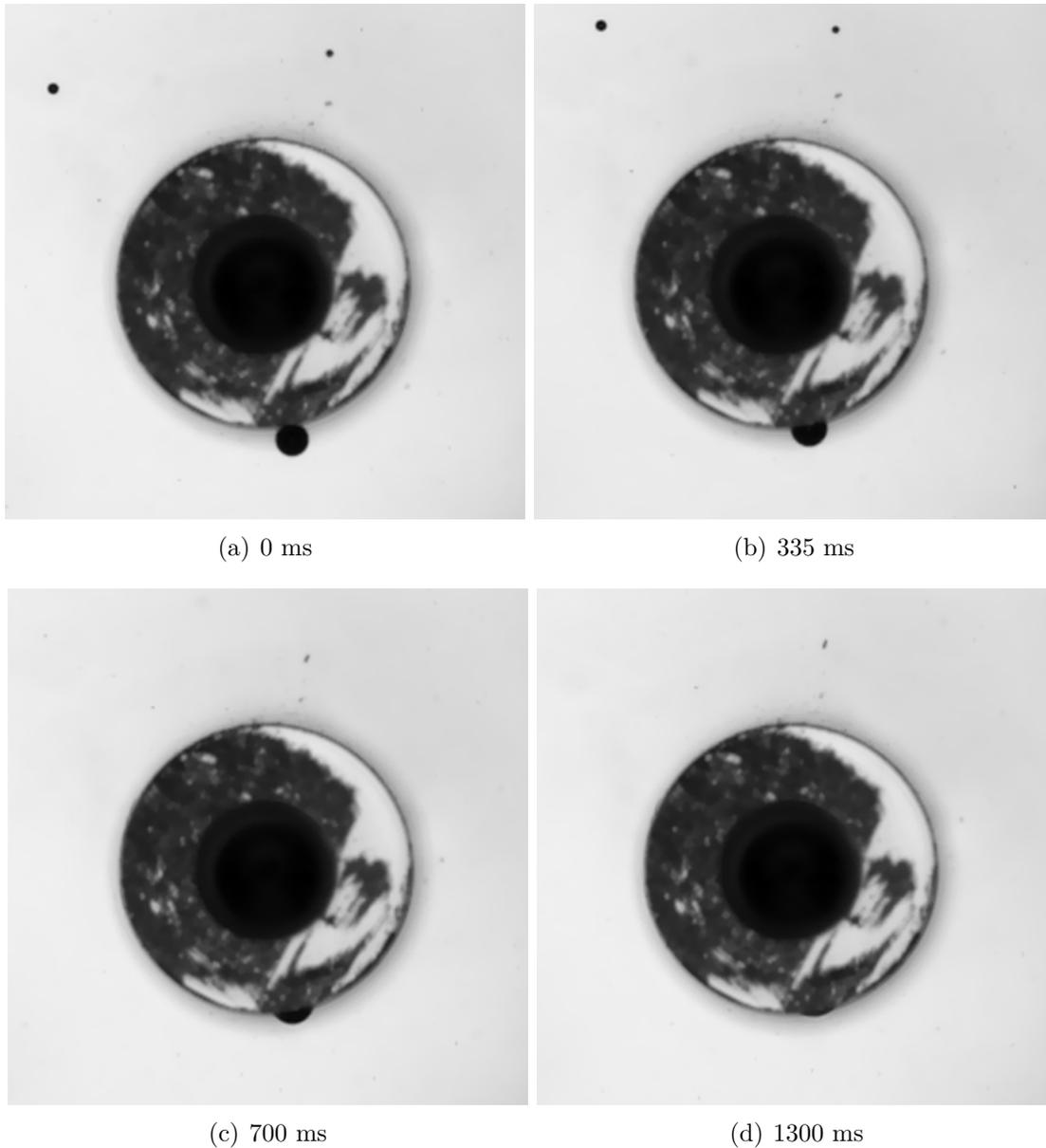


Abbildung 36: Absorbierung einer Satellitenblase an einem hydrophoben Zylinder

Für den realen Betrieb stellt die Bildung von Satellitenblasen ein wichtiges Kriterium für die Blasenverteilung dar, weil zurückgebliebene Satellitenblasen am Zylinder das Interaktionsverhalten von nachfolgenden Blasen, die auf den Zylinder treffen, beeinflussen könnten. Bei hydrophoben Zylindern werden die nach jeder Blasenverteilung entstehenden Satellitenblasen absorbiert und sammeln sich als Luftblase über dem Zylinder an. Die Luftschicht um den Zylinder vergrößert sich und kann ebenfalls Auswirkungen für nachfolgende Blasen haben, die sich an dem Zylinder zerteilen. Genauere Beobachtungen gibt es

zu diesem Thema jedoch noch nicht.

4.4 Einfluss des Zylinderdurchmessers auf die Blasenverteilung und die Flüssigkeitsfilmschicht d_F

Der Einfluss des Zylinderdurchmessers auf die Blasenverteilung ist anhand von drei unterschiedlichen Zylinderdurchmessern in Experimenten untersucht worden. Die Ergebnisse der Blasenverteilungen an Glas, Teflon und hydrophob beschichteten Zylindern in den Durchmessern 3 mm, 4 mm und 5 mm lassen keine Auswirkungen des Zylinderdurchmessers auf die Blasenverteilung erkennen. Die Abbildungen 37, 38 und 39 zeigen die Blasenverteilung mit dem kritischen Blasendurchmesser von 6,6 mm, ab dem sich Blasen bei senkrechtem Auftreffen auf den Zylinder zerteilen, an Zylindern mit 3 mm, 4 mm und 5 mm Durchmesser. Der Zylinderdurchmesser hat bei senkrechtem Auftreffen der Blase auf die Zylinderunterseite keinen Einfluss auf die Blasenverteilung und den kritischen Blasendurchmesser. Auch Segers [16] beobachtete keinen Einfluss des Zylinderdurchmessers auf das Verteilungsverhalten von Blasen.

Bei einem Blasendurchmesser von 6,6 mm bildet sich bei der Zerteilung an Zylindern mit 5 mm Durchmesser eine gleichmäßigere und geringfügig dünnere Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder aus, als bei Zylindern mit 3 mm oder 4 mm.

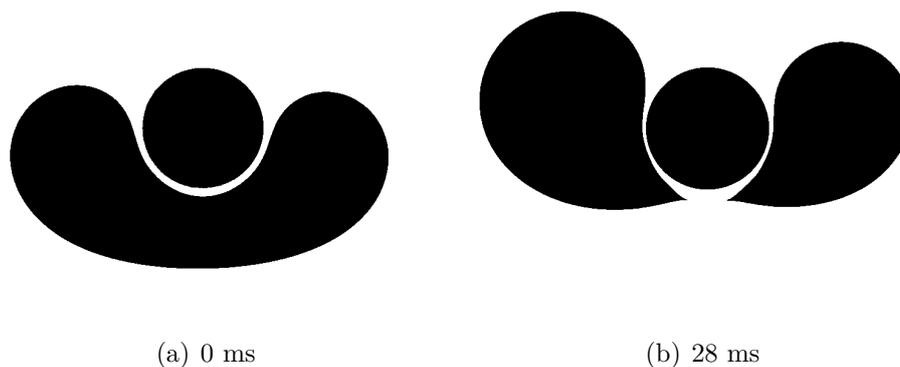


Abbildung 37: Blasenverteilung einer 6,6 mm großen Blase an einem 3 mm dicken Zylinder

Wie in der Abbildung 21-32 zu sehen ist, bildet sich bei allen Versuchen eine Flüssigkeitsfilmschicht zwischen der Blase und dem Zylinder, welche einen direkten Kontakt verhindert. Aus diesem Grund ist das Ergebnis der Experimente zu erklären, dass es zu keinen Abweichungen bei der Blasenverteilung zwischen den Zylindermaterialien mit

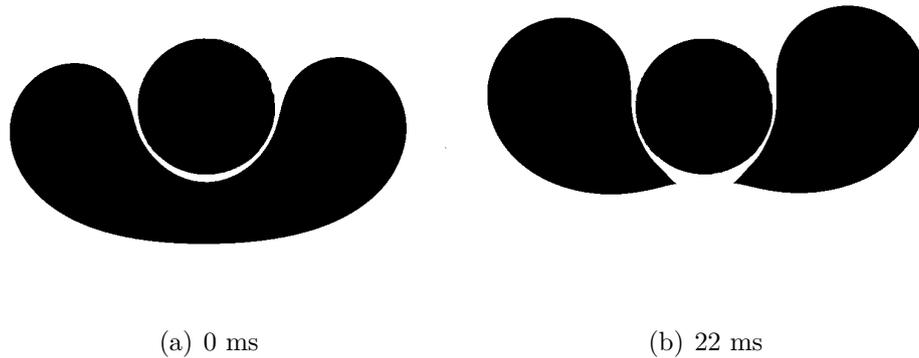


Abbildung 38: Blasenzerfallung einer 6,6 mm großen Blase an einem 4 mm dicken Zylinder

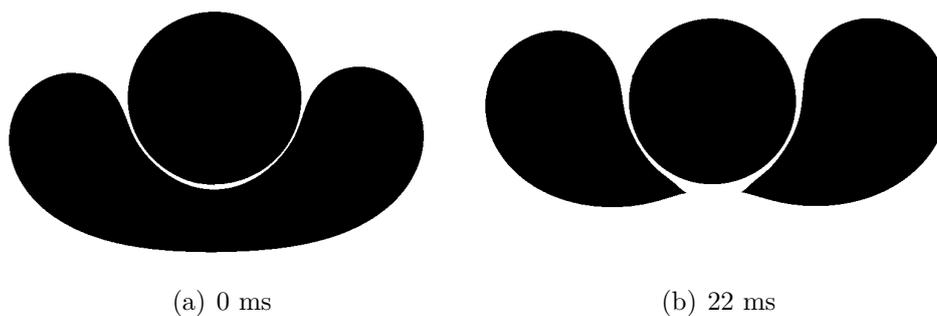


Abbildung 39: Blasenzerfallung einer 6,6 mm großen Blase an einem 5 mm dicken Zylinder

unterschiedlich großen Kontaktwinkeln kommt. Da die Blase den Zylinder nicht berührt, hat das Benetzungsverhalten bei den untersuchten Bedingungen auf diesen Vorgang keinen Einfluss. Segers [16] beobachtete ebenfalls eine Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder, jedoch wurde sie im weiteren Verlauf seiner Arbeit nicht genauer untersucht.

Um die Abhängigkeit der Filmschichtdicke von Blasen- und Zylinderdurchmesser darzustellen, ist in Abbildung 40 die Filmschichtdicke d_F gegen den äquivalenten Blasendurchmesser bei den Zylinderdurchmessern 3 mm, 4 mm und 5 mm aufgetragen. Es sind jeweils 10 Versuche bei 6 unterschiedlichen Blasendurchmessern zwischen 4,6 mm und 12,4 mm durchgeführt und ausgewertet worden. Aus Abbildung 40 wird ersichtlich, dass die Filmdicke mit steigendem Blasendurchmesser und damit höherer Aufstiegs geschwindigkeit der Blase linear zunimmt, da die Flüssigkeit zwischen Blase und Zylinder weniger Zeit hat, um verdrängt zu werden. Segers [16] beobachtet in seiner Arbeit zudem einen Einfluss der Viskosität auf die Filmdicke und ist zu der Erkenntnis gekommen, dass mit steigender Viskosität die Filmdicke d_F zunimmt. Ein Einfluss des Zylinderdurchmessers auf die

Filmdicke ist jedoch nicht bestätigt und es sind keine Abweichungen der Filmdicke bei Änderung des Zylinderdurchmessers zu beobachten.

Die rot-gestrichelte Linie kennzeichnet den Bereich, ab dem es zur einer Blasenzerteilung kommt. Eine Blasenzerteilung tritt ab einem Blasendurchmesser von $d_{\text{eq}} > 6,2$ mm auf, wobei der Zylinderdurchmesser keinen Einfluss auf den kritischen Blasendurchmesser hat, ab dem es zu einer Zerteilung kommt. Die kritische Weber-Zahl dient hierbei als Kriterium für den Blasenzerfall [16].

Die Ungenauigkeiten in Abb. 40 bei $d_{\text{eq}} = 4,6$ mm und $d_{\text{eq}} = 12,4$ mm sind möglicherweise auf die Abweichungen der Skalierung der Aufzeichnungen zurückzuführen, da die Skalierung für die Mitte der Schärfeebene bestimmt worden ist und kleine Blasen ganz vorne am Zylinderende auftreffen wohingegen große Blasen den Zylinder weiter hinten treffen, sodass sie nicht das Zylinderende überragen.

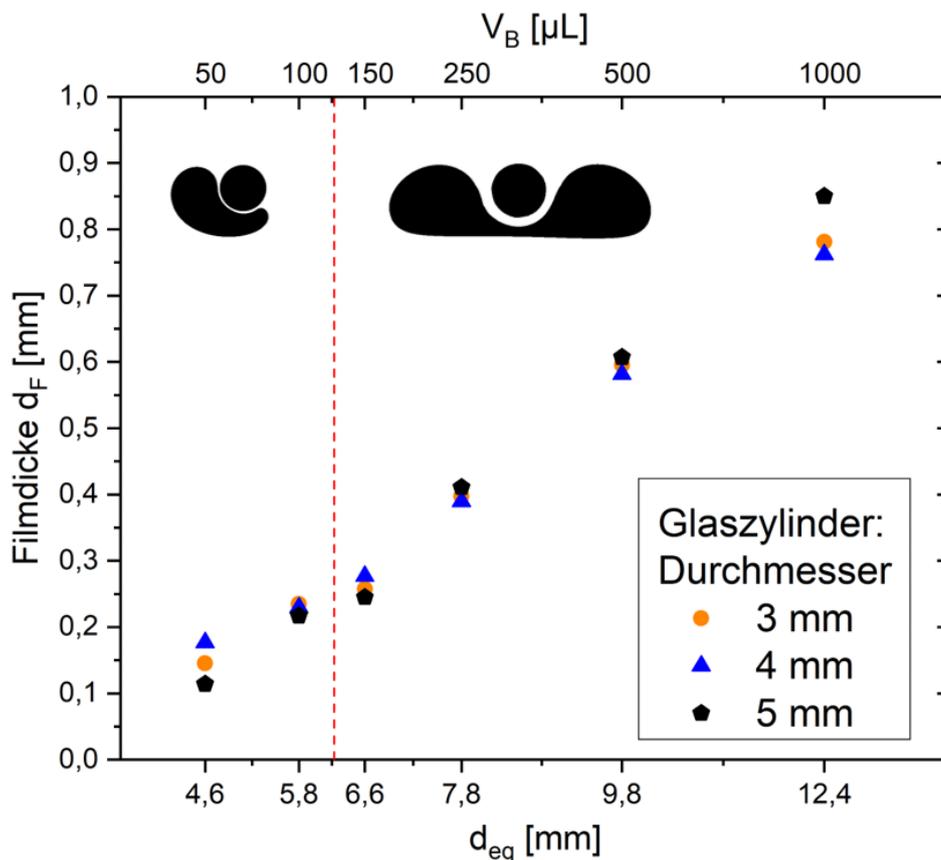


Abbildung 40: Abhängigkeit der Filmdicke d_F von der Blasengröße und dem Zylinderdurchmesser

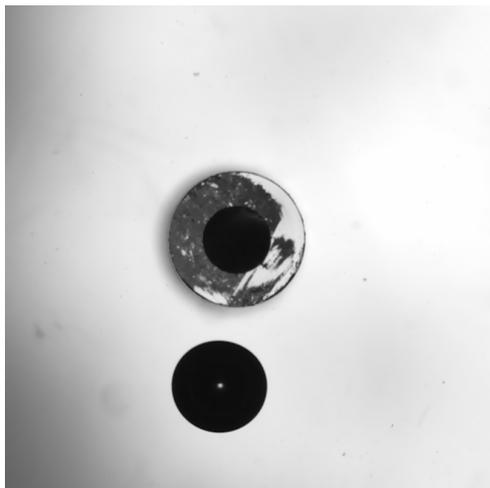
4.5 Einfluss des Benetzungsverhalten

Wie in Abbildung 41 zu erkennen ist, bildet sich bei sehr kleinen Blasengrößen mit $d_{\text{eq}} = 3,6$ mm oder weniger nur eine sehr dünne Flüssigkeitsfilmschicht aus und die Blase berührt den Zylinder ohne ihn partiell zu entnetzen. Die Ergebnisse der Versuche zeigen bei der Interaktion von Blasen mit einem Durchmesser von 3,6 mm bis 12,4 mm an Glas-, Teflon- und hydrophob beschichteten Zylindern mit 3/4/5 mm Durchmesser keine Auswirkungen des Kontaktwinkels auf den Verlauf der Blasenverteilung. Der untersuchte Bereich des Kontaktwinkels $40^\circ < \Theta < 150^\circ$ zeigt eine Übereinstimmung der Simulationen von Cai et al. [4] bei Kontaktwinkeln von $\Theta = 60^\circ$ oder weniger. Der in den Simulationen gezeigte Einfluss des Benetzungsverhaltens bei Kontaktwinkeln von $\Theta \geq 90^\circ$ kann anhand der durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigt werden.

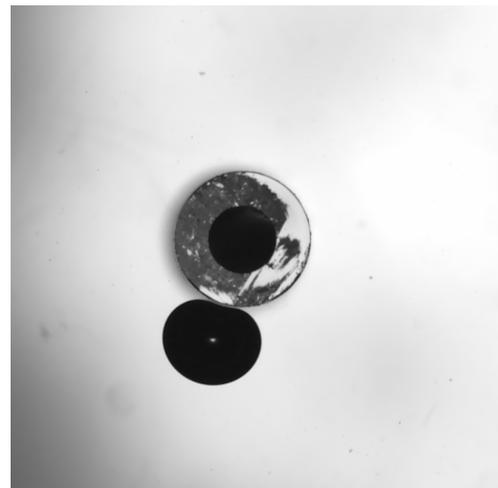
Bei kleinen Blasen und Flüssigkeiten mit geringer Viskosität fällt die Filmschicht zwischen Blase und Zylinder sehr klein aus und die Blasen könnten den Zylinder direkt berühren, sodass das Benetzungsverhalten unter diesen Bedingungen einen Einfluss auf die Blasenverteilung haben könnte.

Ein Beispiel für den Einfluss des Benetzungsverhaltens bei sehr kleinen Blasen bieten die Wechselwirkungen bei Satellitenblasen, welche bei Zylindern mit $\Theta \leq 90^\circ$ an der Zylinderunterseite haften bleiben und bei Zylindern mit $\Theta \geq 90^\circ$ nach kurzer Zeit von dem Zylinder absorbiert werden.

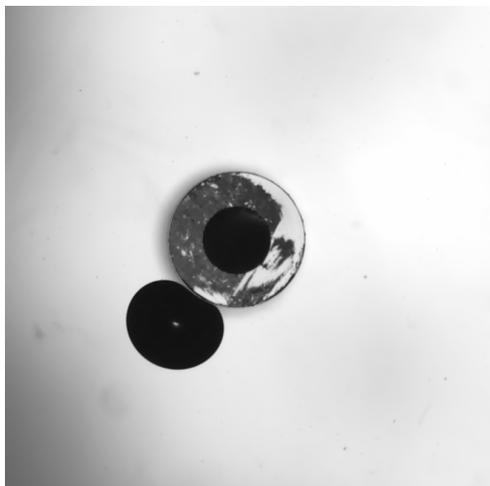
$d_{\text{eq}} = 3,6$ mm ($V_{\text{B}} = 25\mu\text{L}$) In einem Einzelversuch zeigt Abbildung 41 die Interaktion einer Blase mit $d_{\text{eq}} = 3,6$ mm und sphärischer Form mit einem hydrophob beschichteten Glaszylinder ($D_{\text{Zyl}} = 4$ mm), wie die Blase den Zylinder berührt, ohne ihn jedoch partiell zu entnetzen und nach dem Auftreffen ausweicht. Aufgrund ihrer sphärischen Form besitzt sie nur eine geringe Kontaktfläche mit der sie Wechselwirkungen mit dem Zylinder eingehen kann, weshalb es zu keiner Zerteilung kommt. Die Aufstiegs geschwindigkeit ist bei einem Blasen volumen von $25\mu\text{L}$ sehr niedrig, wodurch die viskose Flüssigkeit genug Zeit hat verdrängt zu werden und die Blase den Zylinder berührt, jedoch an der Kontaktstelle nicht entnetzt. Bei einer längeren Verweilzeit an dem Zylinder wäre eine partielle Entnetzung wahrscheinlich, wie es auch im Falle der Satellitenblasen auftritt.



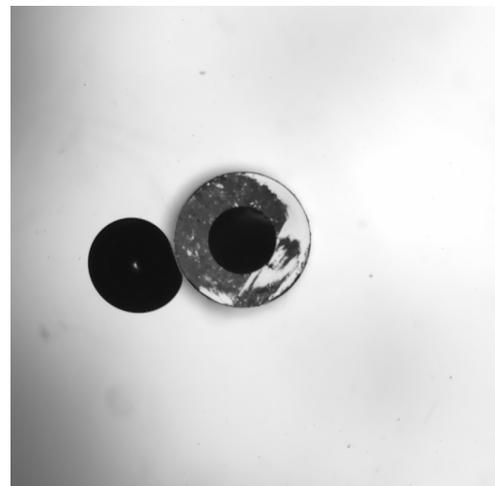
(a) 0 ms



(b) 130 ms



(c) 250 ms



(d) 400 ms

Abbildung 41: Interaktion einer Blase ($d_{\text{eq}} = 3,6 \text{ mm}$) an einem Glaszylinder mit hydrophober Beschichtung ($D_{\text{Zyl}} = 4 \text{ mm}$)

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Einfluss des Benetzungsverhaltens auf die Zerteilung einer einzelnen, aufsteigenden Blase an einem horizontalen Zylinder experimentell untersucht. Des Weiteren sollten genauere Einblicke und ein besseres Verständnis zu der Interaktion von Blasen unterschiedlicher Größen mit einem Zylinder gewonnen werden und die daraus resultierenden Abhängigkeiten von den Benetzungseigenschaften und dem Zylinderdurchmesser.

Die Untersuchungen des Aufstiegsverhaltens und der Zerteilung von Blasen wurden anhand eines Modellexperiments mit einem Plexiglasbehälter, der mit einer 90%igen Glycerin-Wasser Mischung gefüllt war, durchgeführt. Der experimentelle Aufbau orientiert sich an dem von Segers [16]. An der Unterseite des Behälters wurde mit einer Spritze ein definiertes Volumen Luft injiziert. Die Luft sammelt sich als Blase unter einem Löffel an, der direkt über dem Einlass befestigt ist. Durch Drehen des Löffels kann die Blase zum Aufstieg freigelassen werden, sodass sie auf den horizontal angebrachten Zylinder im oberen Bereich des Behälters trifft. Der Blasenaufstieg und die Interaktion der Blase mit dem Zylinder wurden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet und im Anschluss über das Bildbearbeitungsprogramm ImageJ ausgewertet. Zur Validierung wurde die Aufstiegs geschwindigkeit der Blase mit der Korrelation von Park et al. [15] und das Verhalten des Seitenverhältnis der Blasen gegenüber ihrer Blasengröße mit den Ergebnissen von Liu et al. [13] sowie der Korrelation von Aoyama et al. [1] verglichen. Die Ergebnisse stimmen mit den berechneten Werten der Korrelationen überein und weisen nur geringe Abweichungen auf.

Bei den Versuchen der Blasen zerteilung an einem Zylinder wurde ein besonderes Augenmerk auf die Wechselwirkungen zwischen der Blase und dem Zylinder gelegt. Zur Untersuchung der Auswirkungen der Benetzungseigenschaften wurden die Versuche mit vier unterschiedlichen Zylindermaterialien durchgeführt, die sich in ihrem Kontaktwinkel unterscheiden. Es wurde Glas mit einem Kontaktwinkel von $\Theta \approx 40^\circ$, Edelstahl mit $\Theta \approx 60^\circ$, Teflon mit $\Theta \approx 90^\circ$ und ein hydrophob beschichteter Zylinder mit $\Theta \approx 150^\circ$ verwendet, sodass ein großer Bereich der Benetzungsverhalten abgedeckt werden konnte. Die Aufzeichnungen wurden zusätzlich mit unterschiedlich großen Blasendurchmessern durchgeführt, um das Zerteilungsverhalten in Abhängigkeit von der Blasengröße zu beobachten. Die Aufzeichnungen der Hochgeschwindigkeitskamera wurden anschließend ausgewertet und mit den Simulationen von Cai et al. [4] und den experimentellen Ergebnissen von Segers [16] verglichen.

Die Experimente zeigen, dass ein kritischer Blasendurchmesser existiert, der durch die Weber-Zahl beschrieben werden kann. Kleine Blasen mit $d_{eq} \leq 5,76$ mm weichen dem Zylinder aus und zerteilen sich nicht. Blasen ab einem Durchmesser $d_{eq} \geq 6,6$ mm zerteilen sich bei senkrechtem Auftreffen auf dem Zylinder in zwei Tochterblasen. Der Kontaktwinkel und der Zylinderdurchmesser haben im untersuchten Bereich keinen Einfluss auf den

kritischen Blasendurchmesser. Die Ergebnisse stimmen mit dem Blasenverteilungskriterium von Segers [16] überein, welches mit einer kritischen Weber-Zahl $1 < We_{cr} < 5$ festgelegt ist. Im Bereich von $5,76 \text{ mm} < d_{krit} < 6,6 \text{ mm}$ entspricht die kritische Weber-Zahl $1,72 < We_{krit} < 2,65$ und liegt damit in dem von Segers definierten Bereich.

Das Verhalten der Blasenverteilung an einem Edelstahlzylinder stimmt mit den Beobachtungen von Segers [16] in seiner Arbeit überein. Bei der Verteilung von Blasen mit einem äquivalenten Durchmesser von $7,8 \text{ mm} / 9,8 \text{ mm}$ und $12,4 \text{ mm}$ an einem Glas-, Teflon und hydrophob beschichteten Zylinder konnte kein Einfluss des Kontaktwinkels der Zylinder beobachtet werden und die Blasenverteilung weist bei allen Zylindermaterialien ein übereinstimmendes Verhalten auf. Der Grund für dieses Ergebnis ist die Ausbildung einer Flüssigkeitsfilmschicht zwischen Blase und Zylinder. Die Blasen verformen sich bereits kurz vor dem Zylinder und zerteilen sich, ohne den Zylinder direkt zu berühren. Bei hydrophoben Zylindern findet aus diesem Grund keine Entnetzung des Zylinders durch die Blase statt und zeigt damit keine Auswirkungen auf die Blasenverteilung. Das Verhalten der Simulationen von Cai et al. [4] kann unter diesen Bedingungen nicht bestätigt werden. Mit steigender Blasengröße und Viskosität der Flüssigkeit [16] nimmt die Filmschichtdicke zwischen Blase und Zylinder zu, wobei der Zylinderdurchmesser und das Zylindermaterial keinen Einfluss auf die Dicke der Filmschicht haben.

Ab einer Blasengröße von $d_{eq} = 7,8 \text{ mm}$ entstehen durch Reißen eines feinen Gasfadens bei der Blasenverteilung kleine Satellitenblasen. Die Anzahl und die Größe der Satellitenblasen ist dabei von der Blasengröße und damit der Dicke des Gasfadens abhängig. Bei Blasen mit einem äquivalenten Blasendurchmesser von $7,8 \text{ mm} < d_{eq} < 8,9 \text{ mm}$ entsteht bei der Verteilung eine Satellitenblase, im Bereich von $8,9 \text{ mm} < d_{eq} < 9,5 \text{ mm}$ entstehen zwei Satellitenblasen, die seitlich am Zylinder vorbei aufsteigen. In seltenen Fällen entstehen im Übergangsbereich $8,7 \text{ mm} < d_{eq} < 9,4 \text{ mm}$ anstatt 1-2 Satellitenblasen 5-8 kleinere. Ab einer Blasengröße von $d_{eq} = 9,5 \text{ mm}$ entstehen bis zu einer Blasengröße von $d_{eq} = 12,4 \text{ mm}$ in jedem Versuch 3 Satellitenblasen, wobei die mittlere Satellitenblase bei Zylindern mit $\Theta \leq 90^\circ$ immer an der Zylinderunterseite haften bleibt. Bei Zylindern mit $\Theta = 150^\circ$ entnetzt die Satellitenblase den Zylinder partiell und wird von dem Zylinder absorbiert. Die Luft der absorbierten Satellitenblasen sammelt sich nach mehreren Versuchen auf der Zylinderoberseite als Blase an.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten sowohl für weitere Simulationen als auch experimentelle Untersuchungen viele Anknüpfungspunkte. Insbesondere für das Verhalten der Blasenverteilung in Flüssigkeiten mit niedrigerer Viskosität bieten sich weitere experimentelle Untersuchungen an, die die von Cai et al. [4] simulierten Einflüsse des Benetzungsverhaltens des Zylinders auf die Blasenverteilung erwarten lassen. Ebenso erscheinen Untersuchungen mit kleineren Blasengrößen sinnvoll, da die Flüssigkeitsfilmschicht mit abnehmender Blasengröße immer dünner wird und die Blasen den Zylinder ab $d_{eq} \leq 3,6 \text{ mm}$ direkt berühren. Die partielle Entnetzung der Zylinder mit $\Theta = 150^\circ$ bei kleinen Blasengrößen

konnte durch die Interaktion mit Satellitenblasen gezeigt werden. Für den realen Betrieb stellt die Bildung von Satellitenblasen interessante Anknüpfungspunkte dar und könnte weitere Ansätze für die Beeinflussung der Blasenverteilung an einem Zylinder liefern, da an der Zylinderunterseite zurückgebliebene oder vom Zylinder absorbierte Satellitenblasen Auswirkungen auf weitere Blase-Zylinder Interaktionen haben könnte.

Neben den umfassenden Erkenntnissen zu der Benetzung, die in dieser Arbeit gewonnen wurden, könnten diese weiteren Untersuchungen erheblich zu der Effizienzsteigerung von Mehrphasenreaktoren beitragen.

Literatur

- [1] Aoyama, S., Hayashi, K., Hosokawa, S. and Tomiyama, A. [2016], ‘Shapes of ellipsoidal bubbles in infinite stagnant liquids’, *International Journal of Multiphase Flow* **79**, 23–30. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.10.003.
- [2] Baltussen, M. W., Kuipers, J. and Deen, N. G. [2017], ‘A numerical study of cutting bubbles with a wire mesh’, *Chemical Engineering Science* **165**, 25–32. doi: 10.1016/j.ces.2017.01.037.
- [3] Berry, M. V. [1971], ‘The molecular mechanism of surface tension’, *Physics Education* **6**(2), 79. doi: 10.1088/0031-9120/6/2/001.
- [4] Cai, X., Wörner, M., Marschall, H. and Deutschmann, O. [2016], ‘Numerical study on the wettability dependent interaction of a rising bubble with a periodic open cellular structure’, *Catalysis Today* **273**, 151–160. doi: 10.1016/j.cattod.2016.03.053.
- [5] Clift, R., Grace, J. R. and Weber, M. E. [1992], *Bubbles, drops, and particles*, 3. print edn, Acad. Press, New York, NY.
- [6] Dudukovic, M. P., Larachi, F. and Mills, P. L. [1999], ‘Multiphase reactors – revisited’, *Chemical Engineering Science* **54**(13-14), 1975–1995. doi: 10.1016/S0009-2509(98)00367-4.
- [7] Gennes, P.-G. d., Brochard-Wyart, F. and Quéré, D. [2009], *Capillarity and wetting phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves*, [nachdr.] edn, Springer, New York, NY.
- [8] Haberman, W. and Morton, R. K. [1956], ‘An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids’, *American Documentation* **7**(3), 188–200. doi: 10.1002/asi.5090070303.
- [9] Höller, V., Radevik, K., Kiwi-Minsker, L. and Renken, A. [2001], ‘Bubble columns staged with structured fibrous catalytic layers: Residence time distribution and mass transfer’, *Industrial & Engineering Chemistry Research* **40**(6), 1575–1579. doi: 10.1021/ie000719f.
- [10] Inayat, A., Schwerdtfeger, J., Freund, H., Körner, C., Singer, R. F. and Schwieger, W. [2011], ‘Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an ideal tetrakaidecahedra packing’, *Chemical Engineering Science* **66**(12), 2758–2763. doi: 10.1016/j.ces.2011.03.031.
- [11] Klumpp, M., Inayat, A., Schwerdtfeger, J., Körner, C., Singer, R. F., Freund, H. and Schwieger, W. [2014], ‘Periodic open cellular structures with ideal cubic cell geometry: Effect of porosity and cell orientation on pressure drop behavior’, *Chemical Engineering Journal* **242**, 364–378. doi: 10.1016/j.cej.2013.12.060.

- [12] Kraume, M. [2012], ‘Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik’.
- [13] Liu, L., Yan, H., Zhao, G. and Zhuang, J. [2016], ‘Experimental studies on the terminal velocity of air bubbles in water and glycerol aqueous solution’, *Experimental Thermal and Fluid Science* **78**, 254–265. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.06.011.
- [14] Pangarkar, K., Schildhauer, T. J., van Ommen, J. R., Nijenhuis, J., Moulijn, J. A. and Kapteijn, F. [2009], ‘Experimental and numerical comparison of structured packings with a randomly packed bed reactor for fischer–tropsch synthesis’, *Catalysis Today* **147**, S2–S9. doi: 10.1016/j.cattod.2009.07.035.
- [15] Park, S. H., Park, C., Lee, J. and Lee, B. [2017], ‘A simple parameterization for the rising velocity of bubbles in a liquid pool’, *Nuclear Engineering and Technology* **49**(4), 692–699. doi: 10.1016/j.net.2016.12.006.
- [16] Segers, Q. [2015], ‘Cutting bubbles using wire-mesh structures - direct numerical simulations’.
- [17] Toimil Molaes, M. E., Balogh, A. G., Cornelius, T. W., Neumann, R. and Trautmann, C. [2004], ‘Fragmentation of nanowires driven by Rayleigh instability’, *Applied Physics Letters* **85**(22), 5337–5339. doi: 10.1063/1.1826237.
- [18] Tschentscher, R., Nijhuis, T., van der J, S., Kuster, B. F. and Schouten, J. C. [2010], ‘Gas–liquid mass transfer in rotating solid foam reactors’, *Chemical Engineering Science* **65**, 472–479. doi: 10.1016/j.ces.2009.05.047.
- [19] Young, T. [1805], ‘An essay on the cohesion of fluids’, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **95**(0), 65–87. doi: 10.1098/rstl.1805.0005.
- [20] Youssef, A. A., Al-Dahhan, M. H. and Dudukovic, M. P. [2013], ‘Bubble columns with internals: A review’, *International Journal of Chemical Reactor Engineering* **11**(1), 1–55. doi: 10.1515/ijcre-2012-0023.