

Antibubbles - Experimentelle Zugänge -

Wilfried Suhr*, H. Joachim Schlichting+

*,+Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik,
Wilhelm-Klemm-Straße 10, 48149 Münster
*wilfried.suhr@uni-muenster.de, +schlichting@uni-muenster.de

Kurzfassung

So als hätte man bei einer gewöhnlichen Seifenblase die Materialien Luft und Wasser vertauscht, bestehen Antibubbles aus einer Wasserkugel, die durch eine dünne Luftschicht vom umgebenden Wasser getrennt ist. Diese fragilen, schillernden „Perlen“, die jeder mit etwas Übung herstellen kann, werfen eine Reihe physikalischer Fragen auf, von denen sich einige mit schulischen Mitteln beantworten lassen. Weil die Totalreflexion den Einblick in das Innere der Antibubbles einschränkt, bleibt ihre genaue Beschaffenheit weitgehend im Verborgenen. Dennoch gelingt mit mechanischen und optischen Methoden gewissermaßen ein Blick durchs Schlüsselloch, der Aufschlüsse über ihren Aufbau und ihre Dynamik liefert.

1. Einleitung

Bereits 1932 erfuhr die wissenschaftliche Welt durch die renommierte Zeitschrift Nature vom Phänomen der Antibubbles. Dort berichteten William Hughes und Alun R. Hughes in einem kurzen Artikel [1], dass ihnen ein Stück Seife und ein Trog mit Regenwasser als Ausstattung genügt hatten, es hervorzubringen. Wenn beim Herausziehen der zuvor untergetauchten Seife Seifenlösung ins Wasser zurücklief, bildeten sich beim Einströmen gelegentlich untertauchende Blasen, die im Vergleich zu Luftblasen viel langsamer wieder empor stiegen. Die spätere Bezeichnung dieser Blasen als Antibubbles wird dem Wissenschaftler J. E. Connett zugeschrieben [2]. Diese Namensgebung ist insofern treffend, als dass man Antibubbles als materielles Gegenteil von Seifenblasen auffassen kann. Könnte man nämlich bei der Seifenblase die Materialien Luft und Wasser vertauschen, so ergäbe dies die Struktur der Antibubble: Ein Wasservolumen, umschlossen von einer dünnen Luftschicht, die es vom umgebenden Wasser trennt.

Obwohl der prinzipielle Aufbau von Antibubbles geklärt ist, gibt ihre geometrische Beschaffenheit immer noch Rätsel auf. Zur Aufklärung wäre ein ungehinderter Blick in ihr Inneres nötig. Einsichtig ist jedoch nur ein kreisförmiger Bereich im Zentrum, denn aufgrund der Totalreflexion erscheint der Randbereich wie verspiegelt. Daher kann man von außen nicht erkennen, wie das Blaseninnere geformt und wie dick die umhüllende Luftschicht ist. Auf welche Weise die verhältnismäßig schwere Blase in der Schwebelage gehalten wird, bleibt dadurch ebenfalls verborgen. In diesem Beitrag werden einfach realisierbare Methoden vorgestellt, die es dennoch erlauben, gewisse Einblicke in die geometrische Beschaffenheit von Antibubbles zu erhalten.

2. Herstellung mit der Trinkhalm-Methode

Zur Herstellung von Antibubbles genügt ein Trinkhalm mit Knick-Gelenk und Wasser, das mit etwas Spülmittel (ca. 1g/Liter) versetzt wurde. Der Trinkhalm wird mit seinem abgeknickten Ende als Flüssigkeitsheber einige Zentimeter tief ins Wasser getaucht. Das außerhalb liegende Ende wird mit einem Finger verschlossen. Nun hebt man den Halm, samt seiner Füllung, an. Befindet sich das zuvor eingetauchte Ende etwa einen Zentimeter oberhalb der Wasseroberfläche, öffnet man den „Fingerverschluss“. Abhängig vom Auftreffwinkel des nun ausfließenden Wassers und seiner Strömungsgeschwindigkeit, kann sich nun eine Antibubble bilden, wie dies Abbildung 1 illustriert. Das Einhalten der beiden letztgenannten Bedingungen bedarf zu meist etwas Übung.

Im Vergleich zu einfachen Luftblasen steigen so hergestellte Antibubbles wesentlich langsamer bis zur Oberfläche des umgebenden Wassers auf. Dort angekommen bewirken sie eine leichte Wölbung der Wasseroberfläche, kommen aber unterhalb davon zur Ruhe. Manchmal überdauern sie dort einige Minuten, bevor sie zerplatzen.

Durch Erschütterungen an der Oberfläche ausgelöste Kapillarwellen beeinträchtigen die Stabilität von Antibubbles. Ihre durchschnittliche Lebensdauer lässt sich daher deutlich erhöhen, wenn man sie am Aufsteigen hindert. Sie möglichst tief unter der Wasseroberfläche in der Schwebelage zu halten, gelingt mit einem einfachen Trick. Er beruht auf der Verwendung von zwei Seifenlösungen mit unterschiedlichen Dichten. Um diese herzustellen, kann man zunächst, wie oben beschrieben, Wasser mit etwas Spülmittel (ca. 1g/Liter) versetzen. Diese Menge teilt man auf zwei Gefäße auf. Zu einer dieser Lösungen gibt man zusätzlich Zucker, um ihre Dichte

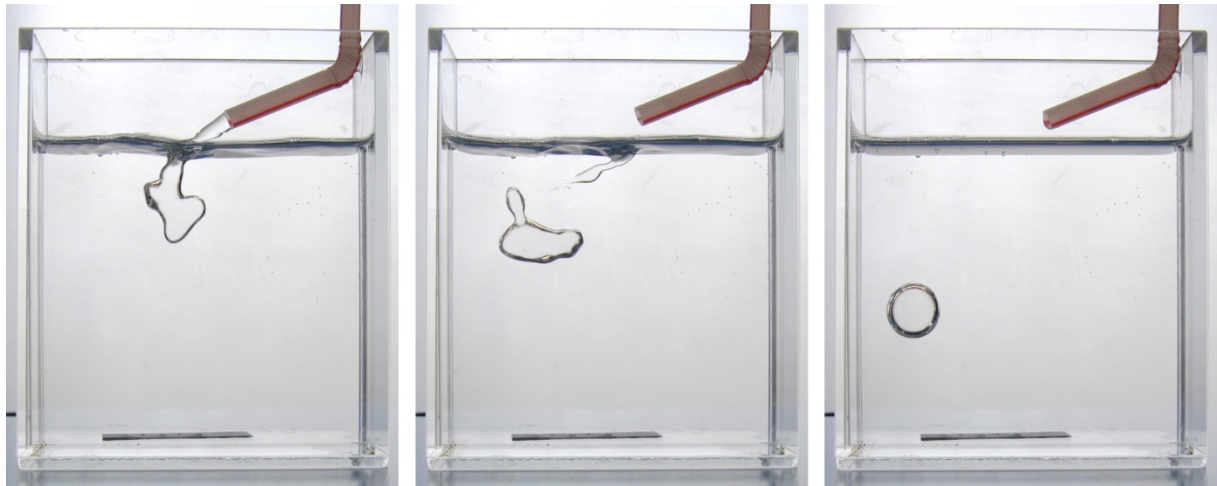


Abb.1: Herstellung einer Antibubble mit der Trinkhalm-Methode. Links: Das einströmende Wasser bleibt mit dem umgebenden Wasser unverbunden. Mitte: Eine durch Abschnürung entstandene Bubble, die turbulenten Strömungen ausgesetzt ist. Rechts: Reibungsdämpfung hat die Turbulenzen beruhigt. Die Antibubble hat fast Kugelgestalt angenommen

zu erhöhen, wobei pro Liter Lösung etwa 60 Gramm Zucker hinzuzufügen sind. Nach dem Auflösen des Zuckers ist etwa eine Stunde zu warten, bis alle kleinen Luftbläschen aus der Lösung verschwunden sind. Falls sich an der Oberfläche Schaum gebildet hat, sollte er abgeschöpft werden.

Das zur Aufnahme der Flüssigkeiten bestimmte Gefäß wird zunächst bis zu dreiviertel seiner Kapazität mit der einfachen Seifenlösung befüllt. In einem zweiten Schritt wird nun die dichtere Seifenlösung unter die bereits vorhandene Füllung geschichtet. Weil sich bei diesem Schritt die beiden Lösungen möglichst wenig vermischen sollen, müssen beim Befüllen Verwirbelungen vermieden werden. Als Hilfsmittel hat sich eine große Spritze bewährt, die die dichtere Seifenlösung enthält. Verbunden über einen dünnen Schlauch, der mit seiner Öffnung bis zum Boden des Gefäßes reicht, lässt sich damit die Fließgeschwindigkeit der dichteren Lösung so regulieren, dass die gewünschte Schicht entsteht.

Ein Rest der dichteren Seifenlösung wird als Füllung der herzustellenden Antibubbles benötigt. Unter Verwendung der oben beschriebenen Trinkhalm-Methode wird zunächst der Trinkhalm mit dieser dichteren Lösung befüllt. Seinen Inhalt lässt man anschließend, aus der oben erläuterten Position als Strahl in das Gefäß fließen. Sofern sich dabei eine Antibubble bildet, wird sie aufgrund ihrer erhöhten Dichte nicht mehr aufsteigen, sondern bis zur dichteren Schicht absinken. Dort sinkt sie gerade so tief ein, dass sich ihr Gewicht und der Auftrieb die Waage halten. Alle nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden an solchen schwebenden Antibubbles durchgeführt. In wenigen Einzelfällen erreichten sie Lebensdauern von bis zu einer halben Stunde.

3. Abschätzung der mittleren Luftschichtdicke

Von wie viel Luft eine Antibubble umhüllt wird, lässt sich an der Größe der Luftblasen erkennen, die

aufsteigen, nachdem die Antibubble geplatzt ist. Daher bietet es sich für eine indirekte Messung der mittleren Luftschichtdicke an, diesen Vorgang fotografisch zu erfassen und die entstandenen Bilder quantitativ auszuwerten. Da gewölbte Gefäße zu optischen Verzerrungen führen würden, sind sie für diese Messmethode ungeeignet. Ideal ist ein transparentes Gefäß mit planparallelen, ebenen Gefäßwänden, wie beispielsweise eine große Küvette.

Würde man eine darin schwebende Antibubble nun einfach fotografieren, um ihren Durchmesser zu bestimmen, so würde man feststellen, dass die genauen Umrisse der Antibubble nur schwer zu erkennen sind, weil sich der Hintergrund in der totalreflektierenden Randzone spiegelt. Um dieses Hindernis zu umgehen, wird nicht die Antibubble selbst, sondern ihr Schlagschatten fotografiert, den man auf einen durchscheinenden Schirm projiziert. Geeignet zur Herstellung eines konturscharfen Schattens ist Sonnenlicht, das man mittels eines Spiegels auf das transparente Gefäß lenkt, in dem sich die schwebende Antibubble befindet (siehe Abbildung 2). Um keine Konturschärfe zu verlieren, sollte der Schirm möglichst nahe am Gefäß stehen. Weil der darauf projizierte Schatten auch auf der Rückseite gut erkennbar ist, kann man ihn dort ohne perspektivische Verzerrung abfotografieren. Die Kamera sollte in geeigneter Position auf einem Stativ befestigt sein. Damit das Foto auch gleich einen Maßstab mitliefert, empfiehlt es sich eine auf Overheadfolie übertragene Kopie von Millimeterpapier etwa dort innerhalb des Messgefäßes anzubringen, wo später die Antibubble schwebt.

Sind all diese Vorbereitungen getroffen, fotografiert man zunächst die Antibubble. Anschließend nimmt man einen feinen Draht und zersticht sie damit. Um dann die Schatten der sehr schnell aufsteigenden Luftblasen fotografieren zu können, muss der Auslöser unmittelbar danach betätigt werden. Dies gelingt

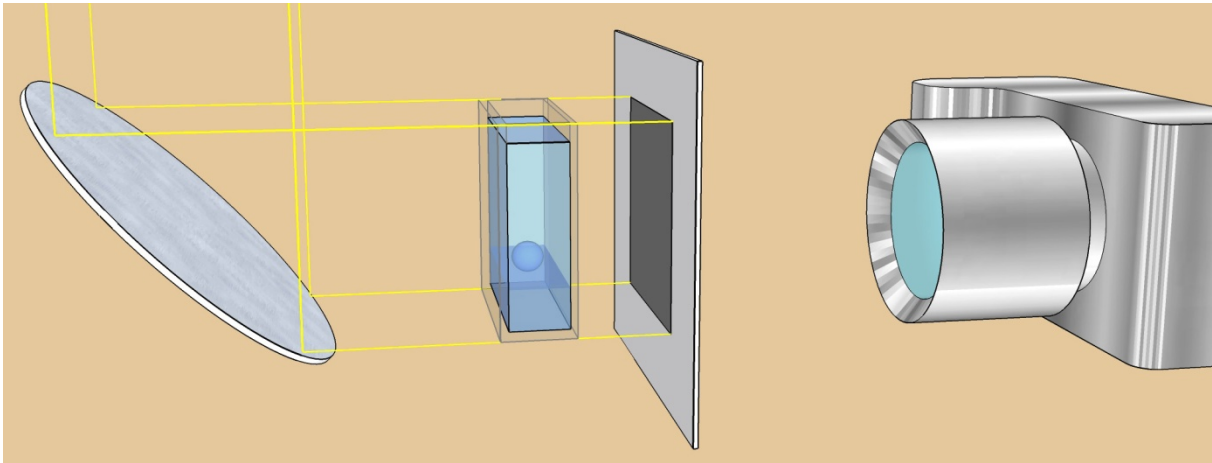


Abb.2: Schema des Versuchsaufbaus zur fotografischen Vermessung des Schlagschattens einer schwebenden Antibubble. Mit einem Spiegel umgelenktes Sonnenlicht durchdringt das Messgefäß und projiziert den Schlagschatten auf einem durchscheinenden Schirm.

am besten mit einem Fernauslöser oder durch Mithilfe einer zweiten Person.

Ein typisches Bilderpaar, das nach dem hier beschriebenen Verfahren hergestellt wurde, zeigt Abbildung 3. Für die im linken Bild erkennbare Antibubble wurde ein Durchmesser des kugelförmigen Bereichs von $D_A=13,1\text{mm}$ ermittelt, wobei sich die Größe ihrer Oberfläche näherungsweise aus $O_A = \pi D_A^2$ ergibt. Um das darin enthaltene Luftvolumen zu bestimmen, wurde auf dem rechten Bild nur die große Luftblase ausgewertet. Der Beitrag der übrigen, vergleichsweise kleinen Luftblasen, wurde als vernachlässigbar angesehen. Da die Luftblase beim Aufsteigen umströmt wird, hat sie keine Kugelgestalt. Zur Volumenberechnung wurde daher

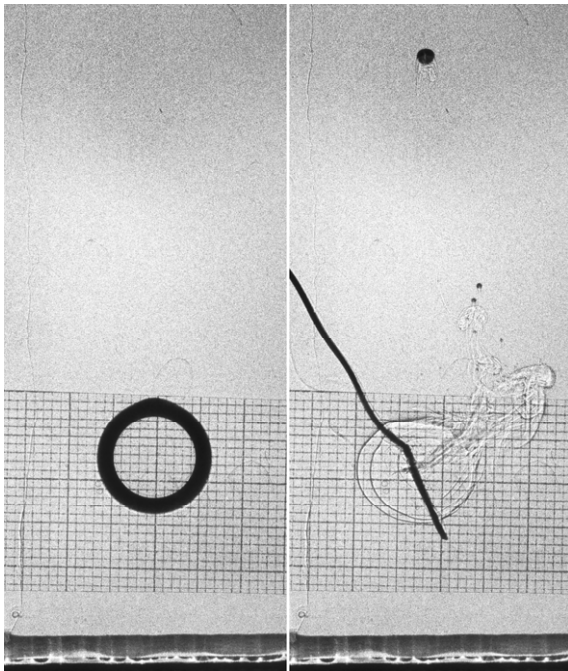


Abb.3: Links: Zur Vermessung des Durchmessers projizierter Schlagschatten einer Antibubble. Rechts: Schlagschatten der Luftblasen, die nach dem Zerplatzen der Antibubble aufsteigen.

angenommen, dass sie etwa die Form eines abgeplatteten Ellipsoids hat. Aus ihrer Breite $b = 2,0\text{mm}$ und ihrer Höhe $h = 1,6\text{mm}$ wurde ihr Volumen anhand der Gleichung $V_L = 4/3\pi(b/2)^2(h/2)$ bestimmt. Die Luftschichtdicke berechnet sich nun anhand der Näherung $\varepsilon = V_L/O_A$. Für die in Abbildung 3 gezeigte Antibubble ergibt sich $\varepsilon=6,7\mu\text{m}$. Der für ähnlich große Antibubbles aus zehn Messungen ermittelte Durchschnittswert lag bei $\varepsilon=5,1\mu\text{m}$. Idealisierend wird hierbei eine gleichmäßige Luftschicht angenommen, die eine kugelförmige Antibubble umhüllt. In dieser Idealform trifft man Antibubbles aber nur kurz nach ihrer Entstehung an.

4. Der Alterungsprozess

Während der kurzen Lebensdauer einer Antibubble findet in ihr ein selbsttätiger Vorgang statt, bei dem sich ihre Form allmählich verändert. Dabei wird

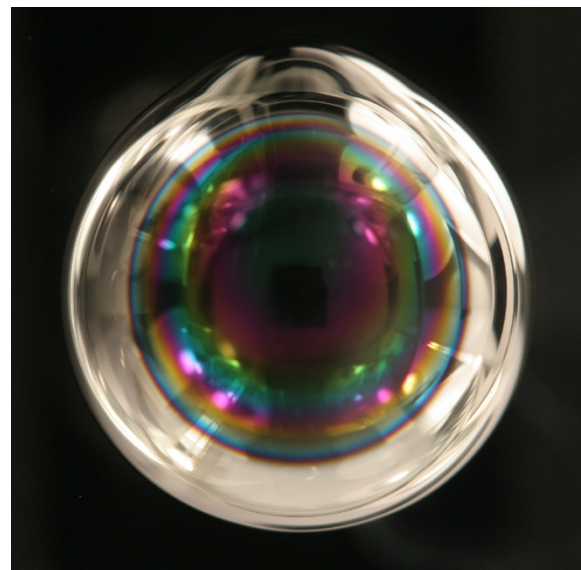


Abb.4: Antibubble im „fortgeschrittenen Alter“ von etwa 10 Minuten. Mit zunehmendem Alter bildet sich im oberen Teil eine Luftblase, die als Ausbeulung von außen erkennbar ist.

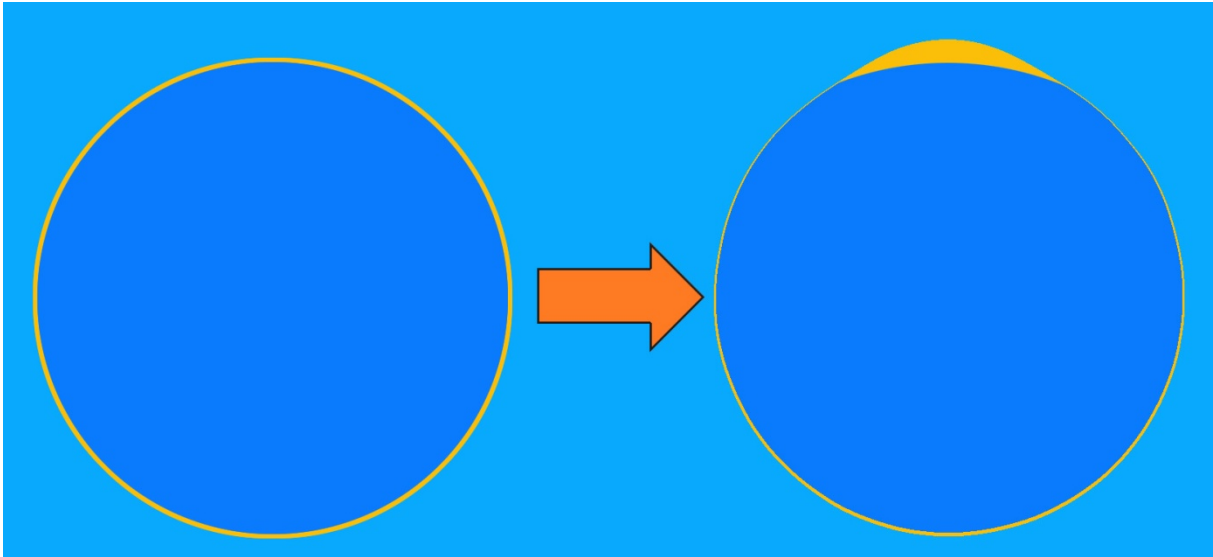


Abb.5: Modell der Alterung einer Antibubble: Eine frisch hergestellte Antibubble (links) hat zunächst annähernd Kugelform. Die umhüllende Luftschicht ist ringsherum etwa gleich dick. Im Laufe der Zeit entsteht im oberen Teil durch Drainage eine Luftblase (rechts). Einige Indizien sprechen dafür, dass die Lufthülle dann von unten nach oben dünner wird.

potentielle Energie entwertet, was mit einer Absenkung ihres Schwerpunktes einher geht. Ein äußeres Anzeichen für diese Absenkung ist die allmähliche Bildung eines Lufttropfens an der Oberseite der Blase (siehe Abb. 4). Nimmt man das in der Lufthülle insgesamt vorhandene Luftvolumen als konstant an, dann folgt daraus, dass die Luft unmittelbar nach Entstehung der Antibubble etwa gleichmäßig um sie herum verteilt war (vgl. Abb. 5). Eine Drainage der Luft, die in [3] näher erklärt wird, führt dazu, dass die Lufthülle unterhalb des Lufttropfens immer dünner wird, bis ihre Trennwirkung schließlich zusammenbricht und die Antibubble daraufhin platzt.

Einen Anhaltspunkt darüber, wie dick die Luftschicht bei einer gealterten Antibubble ist, liefern die auf Abbildung 4 erkennbaren, farbigen Interferenzringe. Sie kommen ähnlich wie Newton'sche Ringe zustande. Ihre Auswertung ist allerdings vergleichsweise schwierig, weil die Luftschicht zwischen zwei sphärisch gewölbten Grenzflächen liegt.

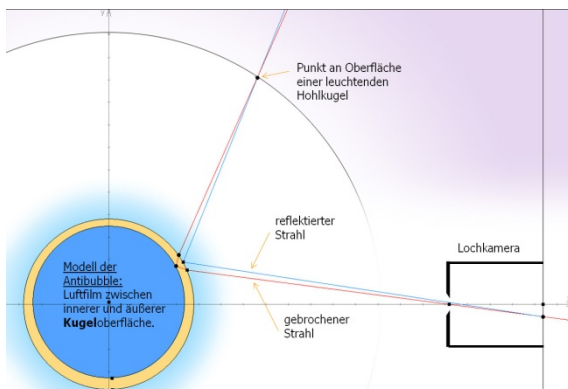


Abb.6: Schematische Darstellung der Komponenten des numerischen Modells zur Berechnung des auf Antibubbles auftretenden Interferenzmusters.

Als Hilfsmittel zur Auswertung bedurfte es daher eines numerischen Modells der optischen Zusammenhänge. Abbildung 6 entspricht einer schematische Darstellung seiner Bestandteile. Idealisierend wird dort von zwei Kugeloberflächen ausgegangen, zwischen denen sich die umhüllende Luftschicht befindet. Zur simulierten Abbildung der Antibubble dient eine gedachte Lochkamera. Die Berechnung beginnt mit der Auswahl eines Bildpunktes auf ihrem Schirm. Der von der Mitte des Eintrittslochs der Kamera zu diesem Bildpunkt gelangende Strahl wird nun umgekehrt zu seiner Ausbreitungsrichtung bis zu seinem Ursprung zurückverfolgt. Auf diesem „Rückweg“ trifft er zunächst die äußere Grenzfläche der Antibubble. Dort wird er in das dünnere Medium Luft hinein gebrochen, trifft anschließend auf die innere Wandung, von der er in Richtung äußere Grenzfläche reflektiert wird. Dort auftreffend wird er wieder in das dichtere Medium Wasser gebrochen und setzt seinen Weg fort, bis er auf eine (nach innen hin diffus leuchtende) Hohlkugel trifft, in deren Zentrum die Antibubble liegt. Dieser Auftreffpunkt ist der Ursprung des zurückverfolgten Strahls. Das Programm berechnet alle gerade beschriebenen optischen Vorgänge und letztlich die Länge des dabei zurückgelegten optischen Weges. Ausgehend vom selben Ursprungspunkt wird ein zweiter Strahl verfolgt, der mit dem ersten am Bildpunkt interferieren kann. Er trifft zunächst auf die äußere Grenzfläche und wird von dort direkt zum Bildpunkt auf dem Schirm der Lochkamera reflektiert. Nachdem auch seine optische Weglänge bestimmt wurde, lässt sich der Gangunterschied zwischen beiden Lichtwegen berechnen. Rechnerisch lässt sich daraus die relative Bestrahlungsstärke ermitteln, die sich durch Überlagerung beider Wellen am Bildpunkt ergibt.

Mit diesem Modell durchgeführte Simulationsrechnungen lieferten grafische Darstellung der Lage und farblichen Abfolge der Interferenzringe, für zuvor eingestellte Parameter der Geometrie der Antibubble. Um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen berechneter Grafik und fotografisch dokumentierten Interferenzringen herzustellen, wurden diese Parameter in einem iterativen Prozess entsprechend angepasst. Aus diesem Vergleich zwischen simulierten und realen Ringsystemen ergab sich für eine gealterte Antibubble eine Luftschichtdicke von etwa $1\mu\text{m}$. Um auch die exzentrische Lage der Interferenzringe (vgl. Abb. 4) mit dem Modell nachzustellen, musste die innere Kugeloberfläche gegenüber der äußeren um $0,3\mu\text{m}$ nach oben verschoben werden. Demnach ist davon auszugehen, dass die Dicke der Luftschicht von unten nach oben dünner wird (vgl. Abb. 5, rechts).

5. Antibubbles mit Innenbeleuchtung

Dafür, dass die Luftschicht bei gealterten Antibubbles nach oben hin abnimmt, spricht noch ein weiteres Indiz, dessen Entdeckung sich einem experimentellen Zugang verdankt, der eigentlich für ein ganz anderes Versuchsziel vorgesehen war. Hierbei ging es um die Frage, ob es vielleicht durch eine Art Innenbeleuchtung der Antibubbles möglich ist, sich trotz der totalreflektierenden Randzone, größere Einblicke in ihr Inneres zu verschaffen. Bei intensiverem Nachdenken stellte sich später heraus, dass zumindest die geometrische Optik dagegen spricht. Zum Glück kam diese Einsicht erst nach der Durchführung entsprechender Versuche, weil sich dabei nämlich Phänomene zeigten, die man auf der Basis der geometrischen Optik nicht hätte vorhersehen können.

Die „Innenbeleuchtung“ lässt sich mit sehr einfachen Mitteln realisieren. Verwendet man zur Herstellung einer schwebenden Antibubble die oben erläuterte Trinkhalm-Methode, dann ist der dichteren Seifenlösung, die man als Füllung der herzustellenden Antibubble vorsieht, etwas Fluoreszin hinzuzusetzen. Das gelöste Fluoreszin hat die Eigenschaft, bei einer Beleuchtung mit UV-Licht stark zu fluoreszieren. Das in einem abgedunkelten Raum aufgestellte Beobachtungsgefäß kann man beispielsweise mit einer Quecksilberdampf Lampe beleuchten, wobei man die sichtbaren Anteile allerdings mit einem geeigneten Kurzpassfilter abblocken muss.

Je nachdem ob das UV-Licht von oben oder von unten auf die Antibubble einstrahlt, lassen sich unterschiedliche Phänomene beobachten. Bei der Beleuchtung von unten sind bei einigen Antibubbles zum Ende ihrer Lebensdauer bemerkenswerte Leuchterscheinungen zu beobachten, die sich in ihrem oberen Teil abspielen. Von ihrem Erscheinungsbild her erinnern sie an leuchtende Lava, die bei Nacht über einen Kraterrand hinabfließt. Bei der Antibubble liegt dieser „Kraterrand“ genau auf der Grenzlinie zur oberhalb davon befindlichen Luftbla-

se. Hellgelbe Leuchtfäden nehmen dort ihren Ausgang und durchziehen dann minutenlang die eigentlich lichtundurchlässige, totalreflektierende Schicht (siehe Abb. 7). Das Schauspiel endet mit dem Zerplatzen der Antibubble.

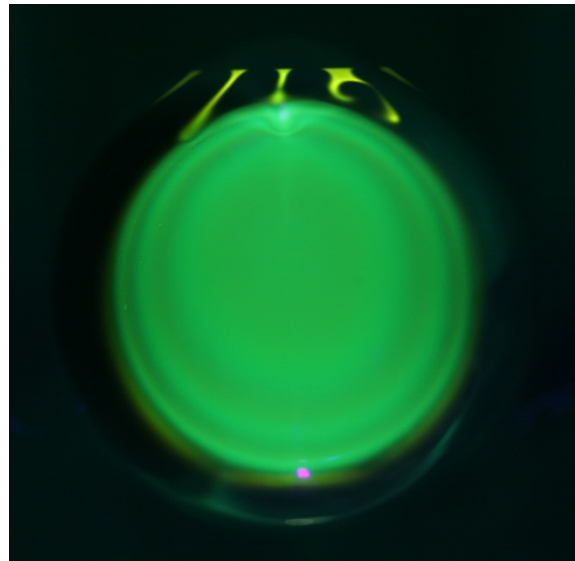


Abb.7: Im Endstadium ihrer Lebensdauer kann an einigen Antibubbles (mit „Innenbeleuchtung“) eine Leuchterscheinung in der totalreflektierenden Zone beobachtet werden. Ausgehend vom Rand der oben befindlichen Luftblase bewegen sich gelb leuchtende Bahnen herab.

Dieses Phänomen lässt sich vermutlich durch den optischen Tunneleffekt erklären. Um ihn zu demonstrieren, kann man zwei rechtwinklige Glasprismen und einen Laser verwenden. Trifft der Laserstrahl senkrecht auf die Kathetenfläche eines Prismas, dann wird er beim internen Auftreffen auf die Hypotenusenfläche total reflektiert. Entsprechend der Wellenmechanik „leckt“ aber am Ort der Reflexion ein stehendes elektrisches Nahfeld über die Prismenfläche hinaus in das angrenzende Medium Luft hinein. Dort klingt es exponentiell ab, wobei seine Reichweite unterhalb der Wellenlänge des Lichts liegt. Auch wenn dieses evaneszente Feld keine Energie transportiert, kann man Energie dort auskoppeln, indem man das zweite Prisma mit seiner Hypotenusenfläche so nahe bringt, dass die zwischen den Prismen verbleibende Luftschicht nur noch eine Dicke von einem Viertel der Wellenlänge hat. Dass nun ein Teil des Lichts in das zweite Prisma eingekoppelt wird, bezeichnet man als „Frustrierte Totalreflexion“ (FTIR). In der Praxis erweist sich die Überbrückung des Luftspalts zwischen den Prismen allerdings als problematisch, weil bereits leichte Unebenheiten der Prismenflächen verhindern können, dass die Luftschicht dafür dünn genug werden kann. Indem man beide Prismen gegeneinander presst, kann man aber meist ein wenig durchtunnelndes Licht sichtbar machen. Umso erstaunlicher ist es, dass eine so einfach aufgebaute Antibubble diese Erscheinung gewissermaßen selbsttätig, also

ganz ohne mechanischen Nachdruck hervorbringt. Ihr Auftreten ist aber ein weiteres Indiz dafür, dass die Luftschicht einer Antibubble mit zunehmendem Alter im oberen Teil dünner wird, als im unteren Teil.

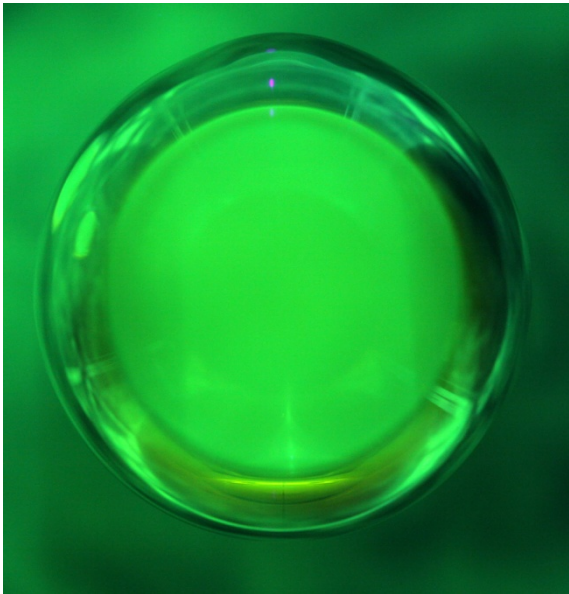


Abb.7: Von oben mit UV-Licht beleuchtete Antibubble mit „Innenbeleuchtung“. Etwa 10 Minuten nach ihrer Entstehung wird der zuvor totalreflektierende Rand im unteren Teil transparent. Es zeigen sich dort verzernte Abbildungen der oben befindlichen Luftblase.

Obwohl die Auswertung der Interferenzringe und auch der optische Tunneleffekt für ein Modell der gealterten Antibubble sprechen, bei dem die Luftschicht von unten nach oben abnimmt, gibt es eine

weitere Auswirkung des Alterungsprozesses, die möglicherweise gegen dieses einfache Modell spricht. Diese Auswirkung wird erst beobachtbar, wenn die UV- Beleuchtung von oben her stattfindet. Nachdem eine schwebende, von innen beleuchtete Antibubble gerade frisch hergestellt wurde, ist ihr Leuchten zunächst auf die Zone beschränkt, die der total reflektierende Rand eingrenzt. Nach fünf Minuten scheint dieser Rand im unteren Teil der Blase jedoch nach und nach transparenter zu werden, so dass man nach etwa zehn Minuten gut von außen hindurch schauen kann (siehe Abb. 8). (Aufgrund der internen Reflexionen innerhalb der Antibubble sind dort verzernte Abbildungen der oben befindlichen Luftblase zu sehen). Sofern sich dieses Transparentwerden des zuvor total reflektierenden Randes auch dem optischen Tunneleffekt verdankt, muss die dort befindliche Luftschicht ebenfalls vergleichsweise dünn geworden sein. Zur in Abbildung 5 (rechts) skizzierten Modellvorstellung wäre dies ein Widerspruch, der bisher nicht aufgelöst werden konnte. Weitere Untersuchungen stehen noch aus, um diesem Dissens aufzulösen.

6. Literatur

- [1] Hughes, W.; Hughes, A. R. (1932): Liquid Drops on the Same Liquid Surface. In: *Nature*, Vol. 129, S. 59
- [2] Stong, C. L. (1974): Curious bubbles in which a gas encloses a liquid instead of the other way around. In: *Scientific American*, 230, No. 4, S. 116-121 + S. 128
- [3] Dorbolo, S.; Reyssat, E.; Vandewalle, N.; Quere, D. (2005): Aging of an antibubble. In: *Europhysics Letters*, 69 , S. 966-970