

Sonolumineszenz

PG 285

16.12.2002 07.01.2003 14.01.2003

Tutor: Franz-Josef Schmitt
Helmar Dittrich
Stefan Knorr
Bertold Breitenöder
Philipp Gehlich
Gerald Hansen
Thomas Dahns
Lutz Schmiedel



Zusammenfassung

Das Wort *Sonolumineszenz* setzt sich aus den zwei Wortteilen *sono* für Schall und *lumineszenz* für Leuchten zusammen. In dem Versuch geht es darum, kleine Argonbläschen in einem mit destilliertem Wasser gefüllten Rundkolben zum Leuchten anzuregen. Dies geschieht mit Hilfe von starken Schall- bzw. Ultraschallfeldern.

Dieses Experiment ist nicht trivial, da eine hohe Schallintensität benötigt wird, die konzentrisch auf das Bläschen in der Kolbenmitte gelenkt werden sollte. Zusätzlich sollte der Versuch unter Argonathmosphäre stattfinden.

Unsere Vorversuche mit Luminol und Kunststoffpartikeln waren sehr interessant und waren ein optischer Genuss.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Der piezoelektrische Effekt	3
2.2	Stehende Wellen in einem sphärischen Glaskolben	4
2.3	Kavitation	5
2.4	Der schwarze Strahler	6
2.5	Thermodynamik der Gasblase	7
2.6	Die BJERKNES-Kraft	8
2.7	Chemolumineszenz	9
3	Aufbau	10
3.1	Mechanischer Aufbau des Kolbens	10
3.1.1	Eigenbau	10
3.1.2	Aufbau der Firma BANDELIN	10
3.2	Elektrische Ansteuerung der Piezos	11
3.3	Vorrichtung zum Einspritzen von Wasser	11
3.4	Anschluss der Vakuumpumpe und der Argonflasche	12
3.5	Verwendete Geräte und Materialien	13
4	Durchführung und Ergebnisse	13
4.1	Bestimmung der Grundfrequenz des Kolbens	13
4.2	Fixieren einer Gasblase	14
4.3	Nachweis einer regelmässigen Druckverteilung	14
4.3.1	Versuche mit Luminol	15
4.3.2	Versuche mit Partikeln	16
4.4	Versuch zur SBSL	18
5	Auswertung und Ausblicke	18
5.1	Vorversuche	18
5.2	SBSL-Versuch	18
5.3	Tips für andere PL-Gruppen	19
6	Danksagung	19

1 Einleitung

Bei der Sonolumineszenz handelt es sich um die Erzeugung von Licht mittels Schall. Dies geschieht nicht im freien Raum, sondern in einer Flüssigkeit. Um diesen Effekt zu erzeugen, muss man Schallwechselfelder hoher Intensität in diese Flüssigkeit einkoppeln.

Anfang des 20. Jahrhunderts erzeugten die Forscher H. FRENZEL und H. SCHULTES Sonolumineszenz in einem Wasserbad. Sie berichteten von vielen Bläschen, die durch die Schallanregung entstehen, unabhängig voneinander wieder in sich zusammenfallen und dabei kleine Lichtblitze aussenden.

Da die Lichterscheinungen sehr kurz und der Ort der Entstehung unvorhersehbar war, blieb es lange Zeit unmöglich das emittierte Licht auf seine Eigenschaften zu untersuchen. Eine physikalisch schlüssige Erklärung der Emission blieb vorerst aus. FRENZEL und SCHULTES versuchten die kurzen Blitze mit Hilfe von Reibungselektrizität zu beschreiben, ähnlich wie Entladungsfunken, die bei statischer Elektrizität überspringen. Aufgrund fehlender Spektralanalysen konnte dies lange Zeit weder bekräftigt, noch widerlegt werden.

Die Sonolumineszenz geriet für ein halbes Jahrhundert fast in Vergessenheit. Erst als es den Physikern F. GAITAN und L. GRUM 1989 an der University of Mississippi gelang eine einzelne, lichtemittierende Blase an einem Ort zu fixieren, war es möglich, eine Spektralanalyse des Lichtes durchzuführen.

Diese sogenannte Einzelblasensonolumineszenz¹ wurde in entgastem Wasser erzeugt, um das Ausperlen von im Wasser gelösten Gasen zu verhindern². Diese Bläschen würden als Druckpuffer dienen und die Erzeugung von starken Unterdrücken verhindern.

2 Theorie

Auf den folgenden Seiten werden einige Themen vorgestellt, die zum Verständniss des Versuches und seiner Durchführung hilfreich sein sollten.

2.1 Der piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt bezeichnet die Eigenschaft von Festkörpern, bei mechanischer Deformation eine elektrische Volumenpolarisation auszubilden. Versieht man die Grund- und Deckfläche eines solchen Materials mit einer leitenden Schicht, so besitzt man einen Kondensator, dessen Ladung durch rein mechanische Einflüsse verändert werden kann.

Dieser Effekt wurde bereits 1880 von PIERRE und JACQUES CURIE an einem Quarzkristall entdeckt. Er tritt mit verschiedener Intensität und typischer Weise bei Mineralien³ auf. Inzwischen werden auch schon polymere Kunststoffe hergestellt, die den Effekt besitzen. In technischen Anwendungen sind meistens *piezokeramische* Werkstoffe anzutreffen, da sie die stärksten Effekte aufweisen und die Fertigung nicht auf einem teuren Kristallzüchtungsprozess beruht. Eine typische Keramik ist Bleizirkonattitanat (PZT).

Abbildung 1 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Deformation und elektrischem Feld. In einem Kristallgitter befinden sich positiv und negativ geladene Ionen. Im α Zustand befinden sich die inneren Ladungen im Gleichgewicht. Wirkt von aussen eine mechanische Spannung auf das Gitter, so geht es in den β oder γ Zustand über, befindet

¹engl. Singlebubblesonoluminescence oder kurz SBSL

²Dies wird oft als weiche Kavitation bezeichnet, da sie schon bei Drücken von über 30mbar auftritt.

³Beispiele hierfür sind: Natriumchlorid, Topas, Rochelle Salz, Cadmiumsulfat, Bariumtitanat, Bleizirkonat, Lithiumniobat ...

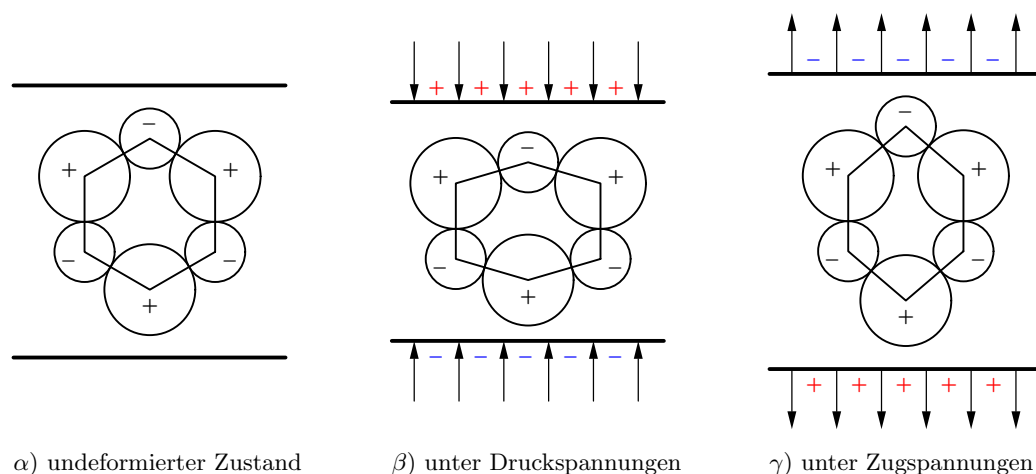


Abbildung 1: Anschauliche Darstellung des piezoelektrischen Effektes

sich dann nicht mehr im Gleichgewicht und es findet eine Ladungsumlagerung statt. Der piezoelektrische Effekt ist *umkehrbar*. Ein von aussen angelegtes elektrisches Feld, erzeugt in einem Piezo⁴ eine mechanische Deformation. Diese liegt in der Grössenordnung von 1‰.

Da die Deformation instantan⁵ erfolgt, können durch hochfrequente elektrische Wechselfelder angesteuerte Piezos hochfrequente mechanische Signale erzeugen. Dies ist die gängige Methode, um Ultraschall zu erzeugen. Die elektrischen Wechselfelder müssen sehr stark sein, so dass die Steuerspannungen für die Piezos bei mehreren 100 V liegt.

Wir nutzen die Methode in unserem Experiment, um den Glaskolben zu Schwingungen anzuregen und versuchen damit stehende Wellen in ihm zu erzeugen. Näheres zum Aufbau ist im Abschnitt 3.1 zu finden.

2.2 Stehende Wellen in einem sphärischen Glaskolben

Treffen mehrere Wellen aufeinander, so überlagern sie sich zu einer neuen Welle. Man nennt diese Erscheinung Interferenz. Die resultierende Welle ergibt sich durch vektorielle Addition der lokalen Auslenkungen der Einzelwellen. Eine *stehende* Welle im besonderen wird gebildet durch stationäre Interferenz zweier Einzelwellen gleicher Amplitude und Frequenz, aber entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung.

Die resultierende, stehende Welle weist Stellen auf, an denen die Auslenkung stets null ist bzw. stets maximal ist. Diese ausgewiesenen Stellen werden als Wellenknoten und -bäuche bezeichnet. In Abbildung 2 befinden sich die Wellenknoten bei geraden Vielfachen von π , die Wellenbäuche entsprechend bei ungeraden Vielfachen. Experimentell lassen sich stehende Wellen in Gasen und Flüssigkeiten durch die Reflektion einer Welle an einem Festkörper erzeugen⁶. Dabei überlagert sich die Ursprungswelle mit der reflektierten Welle. Stehende Wellen lassen sich z.B. in beidseitig geschlossenen Rohren und in Hohlkugeln erzeugen. In Rohren bildet sich eine sinusförmige Druckverteilung aus, wenn die Reflektionen an den Rohrwänden vernachlässigt werden. In Kugeln ist eine Druckverteilung zu erwarten, die sich durch LEGENDRE-Polynome beschreiben lässt. Der Verlauf dieser Polynome ähnelt im Bereich $x = 0$ stark den einer Cosinusfunktion.

⁴übliche Abk. für piezoelektrischer Werkstoff.

⁵Die Massenträgheit eines PZT spielt bei technischen Anwendungen im kHz -Bereich selten eine Rolle.

⁶Diese Wellen sind grundsätzlich Longitudinalwellen und als Dichteschwankung messbar.

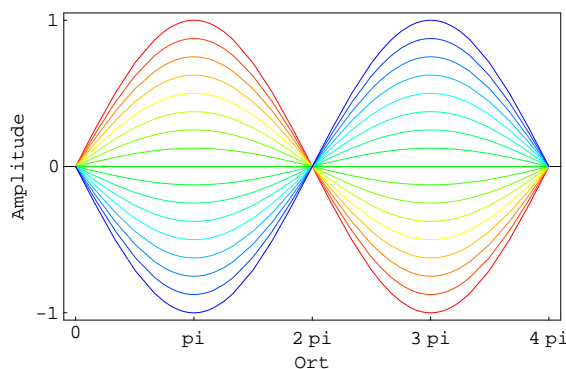


Abbildung 2: Eine stehende Welle zu verschiedenen Zeiten

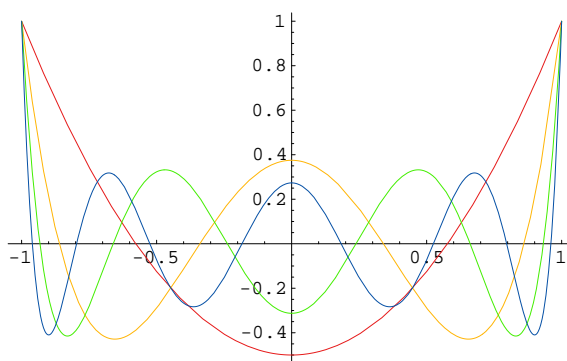


Abbildung 3: einige gerade LEGENDRE-Polynome

Die Herleitung der LEGENDRE-Differentialgleichung, deren Lösung gerade die LEGENDRE-Polynome sind, basiert auf der Wellengleichung des Druckes p :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

In Kugelkoordinaten r, φ, ϑ gilt für den LAPLACE-Operator:

$$\Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2 \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right)$$

Unter der Annahme einer kugelsymmetrischen Druckverteilung, also $p = p(r, t)$ ergibt sich nach langer Rechnung die LEGENDRE-Differentialgleichung

2.3 Kavitation

Ist der Schalldruck hoch genug, so kann der Dampfdruck von Wasser⁷ unterschritten werden und im Wasser bilden sich kleine Wasserdampfbläschen. Dieser Effekt wird als harte Kavitation⁸ bezeichnet.

⁷Er beträgt bei Zimmertemperatur ca. 30mbar

⁸lat. cavus → hohl, Hohlraum

Steigt der Druck wieder, so kollabieren diese Bläschen extrem schnell. Es entstehen kurzzeitig sehr hohe Drücke und Wassergeschwindigkeiten, dass selbst Oberflächen von hochfesten Titanlegierungen angegriffen werden.

Dieser Effekt wurde erstmals im Jahre 1900 von dem Wissenschaftler Lord Rayleigh genauer untersucht. Es handelte sich um einen Auftrag der Royal Navy, sich mit der Erosion der Propeller an Schnellbooten zu befassen.

Bei zunehmend höheren Umdrehungsgeschwindigkeiten stellte man damals fest, dass Propellerflügel nach kurzer Zeit Korrosion aufwiesen. Diese konnte nicht durch die bloße Einwirkung von Wasser und Meersalz erklärt werden. Grund für die schnelle Korrosion war Kavitation. Sie bildete sich in den Unterdruckbereichen der schnell umströmten Propeller.

In unserem Versuch ist bei entsprechend hohen Schalldrücken auch harte Kavitation aufgetreten. Sie wird von einem typischen, hochfrequenten, knisternden Geräusch begleitet.

2.4 Der schwarze Strahler

Ein schwarzer Körper ist ein physikalisches Modell eines Körpers, der für jede Frequenz den Absorptionsgrad eins besitzt. Er nimmt jede Energie in Form von Strahlung auf und muss natürlich auch Energie abgeben, da der sich sonst nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik ständig erwärmen müsste. Er gibt diese Energie in Form von Strahlung ab, die ein charakteristisches frequenzabhängiges *Schwarzkörperspektrum* besitzt.

Die Intensitätsverteilung des Schwarzkörperspektrums wird durch das PLANCK'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Demnach gilt für die Strahlungsdichte Γ :

$$\Gamma(T, f) = \frac{8 \pi h f^3}{c^3 \left(e^{\frac{h f}{k_b T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

Abbildung 4 zeigt mehrere Schwarzkörperspektren für verschiedene Temperaturen im Frequenz-Intensitäts-Diagramm, wobei die Temperatur von rot nach weiss steigt und die Differenz zweier benachbarter Kurven konstant ist. Man sieht, dass sich die maximale Strahlungsdichte mit zunehmender Temperatur in den höherfrequenten und energiereicheren Teil des Spektrums bewegt und die Fläche unter der Kurve zunimmt.

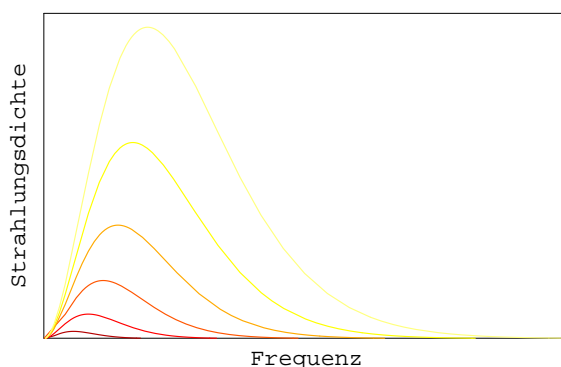


Abbildung 4: Schwarzkörperspektrum bei verschiedenen Temperaturen

Die Spektralanalyse der SBSL hat ergeben, dass das emittierte Licht jenem Schwarzkörperspektrum stark ähnelt, dessen Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von ca. 200nm liegt.

Aus dieser Angabe lässt sich mit Hilfe des WIEN'schen Verschiebungsgesetzes die Temperatur der Blase berechnen, wenn man das gleiche physikalische Prinzip der Lichtemission voraussetzt. Es gilt:

$$\text{WIEN'scher Verschiebungssatz: } T = \frac{1}{\lambda_{max}} 2,8670 \cdot 10^{-3} m K \quad (2)$$

mit $\lambda_{max} = 200 nm = 2 \cdot 10^{-7} m$ ergibt sich:

$$T \approx 14\,000 K \quad (3)$$

In der Blase treten also Temperaturen auf die weit über der Zimmertemperatur liegen. Wie derart hohe Temperaturen entstehen können, wird im nächsten Abschnitt angedeutet.

2.5 Thermodynamik der Gasblase

Grundsätzlich stehen zur thermodynamischen Betrachtungen von System die Bilanzgleichungen der Energie, der Masse und des Impulses zur Verfügung. Eine exakte thermodynamische Betrachtung der Sonolumineszenz ist sehr aufwendig und soll deshalb hier nicht dargestellt werden. Gründe dafür sind:

- Die Gasblase ist als offenes System zu betrachten, da sowohl Energie als auch Masse durch die Systemgrenze dringen kann.
- Die Systemgrenze der Gasblase besitzt Eigenspannungen und stellt eine Unstetigkeitsfläche bezüglich der Temperatur und der Dichte dar.

Mit einem einfachen thermodynamischen Modell lässt sich zeigen, wie es bei der Sonolumineszenz zu enorm hohen Temperaturen von ca. 14 000 K kommen kann. Dazu wird die Gasblase als ein geschlossenes System betrachtet, dessen Zustandsänderungen adiabatisch⁹ erfolgen. Ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dU}{dt} + p \frac{dV}{dt} \quad \text{gilt mit } \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} = -p \frac{dV}{dt}. \quad (5)$$

Dabei sind die Größen Q = Wärme, U = innere Energie, p = Druck und V = Volumen. Mit der Zustandgleichung für ideale Gase $pV = nRT$ ergibt sich aus (5) nach einiger Rechnung die adiabate Zustandgleichung:

$$\boxed{\frac{p}{T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} = const.} \quad (6)$$

κ ist der Adiabatenexponent, der bei idealen Gasen nur von der Geometrie der Moleküle abhängt. Bei Argon ist $\kappa = 3/2$ und für eine adiabate Zustandsänderung von Zustand 1 nach Zustand 2 gilt demnach:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^3$$

⁹Adiabate Zustandsänderungen sind dadurch gekennzeichnet, dass keine Wärmeübertragung durch die Systemgrenze erfolgt $\frac{dQ}{dt} = 0$. Diese Annahme ist bei schnellen Prozessen oft zulässig.

Eine Druckerhöhung um den Faktor $\frac{p_1}{p_2} = \sqrt[3]{100} \approx 4,64$ sorgt bei einer Ausgangstemperatur von ca. 300 K für eine Endtemperatur von ca. 30 000 K. Die notwendige Druckerhöhung wird durch Druckwellen in der Flüssigkeit erzeugt, die im Idealfall eine stehende Welle im Rundkolben ausbilden.

2.6 Die BJERKNES-Kraft

Wie schon in der Einleitung beschrieben, wird bei der SBSL ein eine einzige Blase an einer Stelle in der Flüssigkeit fixiert. Es ergeben sich zwei Fragen:

- Was treibt die Bläschen in die Mitte des Kolbens und hält sie dort gefangen?
- Warum werden sie nicht durch den Auftrieb nach oben gedrückt werden?

Betrachtet man die Impulsbilanz unter Vernachlässigung von Volumenkräften, so gilt mit t_{ij} als Spannungstensor, ρ als Dichte und a_i als Beschleunigung:

$$\frac{\partial t_{ij}}{\partial x_j} = \rho a_i \quad (7)$$

Unter der Annahme, dass sich es sich um einen hydrostatischen Spannungszustand mit $t_{ij} = -p \delta_{ij}$ handelt¹⁰, ergibt sich:

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \rho a_i \quad (8)$$

$$-\text{grad}(p) = \rho a_i \quad (9)$$

Diese Gleichung besagt, dass die Gasblase in der Flüssigkeit gegen den Druckgradienten beschleunigt wird. Sie bewegt sich also stets zum Druckminimum¹¹. Der Proportionalitätsfaktor ist die Dichte des Gases ρ .

In unserem Kolben gibt es nicht nur den hydrostatischen Druck der Flüssigkeit, sondern zusätzlich Druckschwankungen, die durch stehende Wellen hervorgerufen werden. Die Druckverteilung $p(t, r, \varphi, \vartheta)$ hängt bzgl. des Ortes nur von dem Radius r ab. Die zeitliche Änderung des Druckes erfolgt unabhängig von der räumlichen Druckverteilung, folglich ist ein Produktansatz gerechtfertigt und führt zu: $p(t, r) = p(t) p(r)$. Die Position des Druckminimums ist somit zeitabhängig, siehe Abbildung 2.

Setzt man $p(t, r) = p(t) p(r)$ in (9), so ergibt sich:

$$\rho a_i = -\text{grad}(p(t) p(r)) \quad (10)$$

$$\rho a_i = -p(t) \text{grad}(p(r)) \quad (11)$$

Mit dem Gradienten in Kugelkoordinaten r, φ, ϑ : $\text{grad} = \left(\frac{\partial}{\partial r}, \frac{1}{r \sin(\vartheta)} \frac{\partial}{\partial \varphi}, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \right)^T$ und der Schreibweise $\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \Phi'$ gilt dann:

¹⁰Diese Bedingung ist bei Flüssigkeiten und Gasen erfüllt.

¹¹Im Spezialfall der ruhenden Flüssigkeit gilt $p = p_0 - \rho_{H_2O} g x_3$ und es ergibt sich das Gesetz für den Auftrieb: $\rho a_i = (0 \ 0 \ -\rho_{H_2O} g)^T$, die Blase wird in negative x_3 -Richtung, also nach oben beschleunigt:

$$\rho a_i = -p(t) \begin{pmatrix} p'(r) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Beschleunigungen treten nur in r -Richtung auf und es muss nur a_r bestimmt werden:

$$\rho a_r = -p(t) p'(r) \quad (13)$$

Dies scheint recht einfach zu sein, denn $p(t)$ wird sich sicherlich als $p(t) = p_0 \sin(\omega t + \varphi)$ und $p(r)$ als eine Summe von LEGENDRE-Polynomen darstellen lassen.

An dieser Stelle darf aber nicht vergessen werden, dass ρ keine Konstante bezüglich p ist. Aus einem geeigneten Stoffgesetz¹² ist $\rho(p)$ zu bestimmen, einzusetzen und die gesamte Gleichung über das Blasenvolumen zu integrieren. Dann entsteht ein Ausdruck für ma_i . Diese Kraft wird als BJERKNES-Kraft bezeichnet.

2.7 Chemolumineszenz

Unter Chemolumineszenz¹³ versteht man chemische Reaktionen, bei denen Licht emittiert wird. Diese Emission erfolgt bei minimaler Erwärmung der beteiligten Substanzen, was die Bezeichnung 'kaltes Licht' rechtfertigt.

Derartige Reaktionen treten in der Natur zum Beispiel bei Leuchtkäfern der Gattung Lampyrus¹⁴, bei einigen Pilz und Bakterienarten sowie bei einer Vielzahl von Tiefseefischen, -hohltieren und -quallen auf.

Fast alle Reaktionen basieren auf einer Oxidation, bei der ein Luziferin oxidiert und dabei Licht emittiert wird. Dieser Vorgang wird oft katalytisch eingeleitet.

Ein technisch übliches Reagenz zur Demonstration der Chemolumineszenz ist das Luminol. Es wird in alkalischer Lösung von Wasserstoffperoxid oxidiert und emittiert dabei fahlblaues Licht. Diese Reaktion kann von z.B. Kupferverbindungen katalysiert werden, um die Reaktion schneller ablaufen zu lassen und somit die Lichtemission zu steigern. Die Reaktionsgleichung ist in Abbildung 5 angegeben.

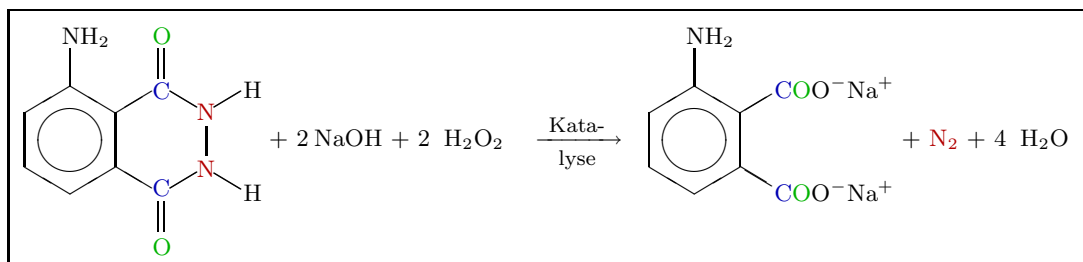


Abbildung 5: Gesamtreaktionsgleichung des Luminols

Die Reaktion des Luminols kann nicht nur durch geeignete chemische Katalysatoren, sondern auch durch Druck bzw. einen hohen Druckgradienten beschleunigt werden. Diese Tatsache machen wir uns in einem unserer Versuch zunutze und wollen damit die Druckverteilung in unserem Glaskolben nachweisen.

¹²z.B. aus dem idealen Gasgesetz, der VAN DER VALS-Gleichung oder anderen Zustandgleichungen

¹³Die Bezeichnung Chemilumineszenz ist ebenfalls gebräuchlich.

¹⁴Auch als sog. 'Glowwürmchen' bekannt.

3 Aufbau

3.1 Mechanischer Aufbau des Kolbens

3.1.1 Eigenbau

Der mechanische Aufbau des Versuches besteht aus einem 1000ml Rundkolben mit 29/32 Normschliffanschluss, an dem zwei Befestigungsmöglichkeiten für Piezos angeklebt sind. Diese sind genau gegenüber voneinander angebracht. An diesen Befestigungen sind je zwei PZT - Elemente¹⁵ festgeschraubt, die parallel miteinander verschaltet sind, siehe Abbildung 6. Am Boden des Kolbens ist ein kleines Piezo-Mikrofon angeklebt.

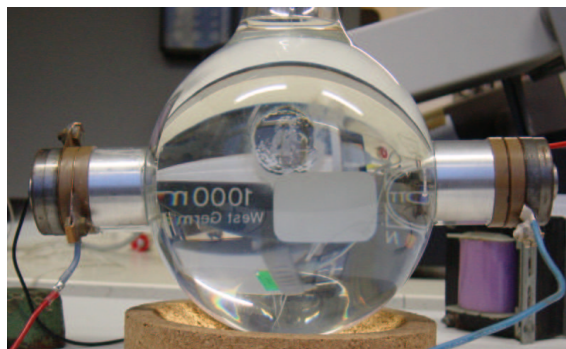


Abbildung 6: mechanischer Aufbau des Kolbens

Die PTZ-Befestigungen wurden nach unseren Vorgaben in der Werkstatt aus Aluminium gefertigt. Sie wurden mit einem *hochwertigen* Epoxidharz-System an den Kolben geklebt, und nicht mit einem 5-Minuten Klebstoffsystem. Darum hatten wir keine Probleme mit den Klebstellen, wie sie bei anderen PL-Gruppen aufgetreten sind.

Die beiden Piezos sind mit einer grossen Vorspannung an die Befestigungen geschraubt. Sie wurden mit ein Anzugsmoment von ca. $70Nm$ verschraubt.

Als Piezo-Mikrofon wurde ein einfaches Piezo-Plättchen verwendet, das sehr gute Ergebnisse lieferte.

Der gesamte mechanische Aufbau ist mittels zwei Drähten am oberen Rand der Öffnung so an einer Aufhängung befestigt, dass er frei hängt. Dies ist sehr wichtig. Anfängliche Versuche den Kolben in eine Korkaufnahme zu stellen, lieferten bei sonst gleichen Bedingungen deutlich geringer Amplituden.

3.1.2 Aufbau der Firma BANDELIN

Die Firma BANDELIN hat uns ebenfalls einen Versuchsaufbau zur Verfügung gestellt. Er besteht aus einem 500ml Rundkolben, der ebenfalls über einen 29/32 Normschliffanschluss verfügt. Er besitzt drei Befestigungen, an denen je zwei PZT-Elemente befestigt sind. An dem Kolben befindet sich noch kein Messmikrofon.

Das besondere an dem Aufbau ist die professionelle Ansteuerungseinheit, die bei einer Frequenz von $56kHz$ mit einer Ausgangsleistung von $30W$ arbeitet. Die Frequenz kann in einem kleinen Bereich variiert werden.

¹⁵Sie stammen aus einem defekten Ultraschallreinigungsgerät.

3.2 Elektrische Ansteuerung der Piezos

Die Piezos am Kolben müssen mit einer Wechselspannung versorgt werden, um ihn zum Schwingen zu bringen. Diese Wechselspannung könnte direkt über einen Frequenzgenerator auf den Piezo gegeben werden. Dieser Aufbau wäre nicht sinnvoll, da der Kondensator im Wechselstromkreis einen hohen Widerstand besitzt und die Ausgangsspannung eines Frequenzgenerators nicht ausreicht, um eine hinreichend grosse Deformation der Piezos hervorzurufen.

Der Piezo wird in einem elektrischen Schwingkreis betrieben, der induktiv mit gespeist wird. Wir haben drei verschiedene Formen der Ansteuerung ausprobiert:

⇒ **Frequenzgenerator - Transistor - Transformator - Piezo**

Mit dem Signal des Frequenzgenerators wird ein Transistor angesteuert, der die Ausgangsspannung eines Netzgerätes regelt. Diese geregelte Spannung wird an die Eingangsspule eines Zeilentransformators aus einem Fernsehers gelegt. Die andere Spule wird mit dem Schwingkreis verbunden.

Nachteil des Aufbaus ist der beschränkte Frequenzbereich, in dem der Zeilentransformator zuverlässig und effektiv arbeitet. Der Bereich lag bei bei $15 - 20 \text{ kHz}$.

⇒ **Frequenzgenerator - Verstärker - Transformator - Piezo**

Bei diesem Aufbau wird das Signal des Frequenzgenerators zunächst verstärkt und anschliessend auf eine Ausgangswicklung¹⁶ eines Netztransformators gegeben. Mit der 220 V Wicklung werden die Piezos ohne eine weitere Spule angesteuert.

Das Ergebniss dieses Versuches ist deutlich besser, da der Transformator in einem weiten Frequenzspektrum zuverlässig arbeitet, die Signalform weitgehend erhält und der Vervielfachungsfaktor gewählt werden kann. Die Induktivität der 220 V Wicklung ist leider so hoch, dass der mit den Piezos gebildete Schwingkreis über seiner Resonanzfrequenz betrieben wird. Eine Abstimmung des Schwingkreises ist nur über zusätzliche Hochspannungskondensatoren möglich, die uns leider nicht zu Verfügung stehen.

⇒ **Frequenzgenerator - Verstärker - Spule - Joch - Spule - Piezo** Auch bei diesem Aufbau wird das Signal des Frequenzgenerators zunächst verstärkt. Diese Spannung wird auf eine Spule gegeben, die über ein Joch mit einer weiteren Spule verbunden ist. Die zweite Spule bildet mit den Piezos einen Schwingkreis.

Mit diesem Aufbau erreichen wir die besten Ergebnisse, da sowohl die Eigenfrequenz des Schwingkreises als auch der Verstärkungsfaktor gewählt werden kann. Die Regelung der Eigenfrequenz erfolgt durch die Wahl einer geeigneten Spule, deren Induktivität mit der Verschiebung des Joches fein geregelt werden kann. Der Verstärkungsfaktor des Transformators kann durch die Wahl der zweiten Spule verändert werden.

3.3 Vorrichtung zum Einspritzen von Wasser

Eine wichtige Bedingung zum Erzeugen von Sonolumineszenz ist die Verwendung von Argonbläschen. Andere Gase würden bei den grossen Drücken sofort in das Wasser diffundieren, und das Bläschen würde sich auflösen.

Bei dem Versuch werden Bläschen mit einem Radius von ca. $50 \mu\text{m}$ benötigt. Um diese zu erzeugen, wird nicht Argon direkt in den Kolben gespritzt, sondern Wasser durch eine Argonathmosphäre in den Kolben gespritzt. Dabei werden aus der Atmosphäre kleine Gasmengen mitgerissen.

¹⁶z.B. die 3 V , 6 V , 12 V oder 15 V Wicklung

Die Schwierigkeit besteht nun darin, Wasser in den Kolben zu spritzen, und dabei die Argonathmosphäre im Kolben nicht mit Luft zu verdünnen. Um dieses Problem zu lösen, haben wir eine kleine Vorrichtung gebaut:

Sie besteht aus einem Kunststoff - Normschliffstopfen, in dem eine Kanüle mit einem Durchmesser von $0,45\text{mm}$ steckt. Diese ist über einen dünnen Schlauch mit einem kleinen Dreiwegehahn verbunden, an dem sich eine 50ml und eine 1ml Spritze befindet. Beide werden mit Wasser gefüllt. Die grosse Spritze dient als Reservoir und die kleine wird zum Einspritzen verwendet, da sie einen sehr kleinen Kolbenquerschnitt besitzt. Dadurch lassen sich recht hohe Drücke und Austrittsgeschwindigkeiten an der Kanüle erreichen. Folglich werden viele Argonbläschen mit in das Wasser gerissen.

3.4 Anschluss der Vakuumpumpe und der Argonflasche

Um das Wasser im Kolben zu entgasen wird eine Vakuumpumpe verwendet. Um anschliessend eine Argonathmosphäre im Kolben zu schaffen wird Argon benötigt. Dies wird folgendermassen umgesetzt: Der Kolben wird über ein T-Stück mit der Argonflasche und der Vakuumpumpe verbunden. Beide Leitungen sind mit einem Ventil versehen. So kann erst das Vakuum erzeugt werden, dann die Pumpe vom angeschlossen und das Argon angeschlossen werden.

3.5 Verwendete Geräte und Materialien

Liste aller im Versuch verwendeten Geräte und Materialien		
Gerät / chemische Substanz	PL - N ^o	Bezeichnung
Frequenzgenerator	010b	Agilent 33120A
Frequenzgenerator/verstärker	015a	Töellner TCE 7714
zwei Oszilloskope 20 MHz	023b	Hameg HM - 203-7
Netzgerät	014b	EA-PS 3032-05
Netztransformator		
zwei Leybold Spulen mit Joch	243/4	
1000ml Rundkolben mit zwei Piezos		Eigenbau
Vakuumpumpe	313a	Leybold Trivac
Schläuche, Vakuumverbinder, Ventile	321-25	
Vorrichtung zum Einspritzen von Wasser		Eigenbau
Laserdiodenmodul	731d	
Glasstab als Zylinderlinsenersatz	614e	
diverses Stativmaterial		
diverse Kaltgerätestecker		
diverse Bananen - und BNC - Stecker		
diverse Bechergläser, Pipetten		
diverse Vakuumverbinder und Dichtungen		
Fotostativ		
Digitalkamera		
Videokamera		
Aufbau der Firma BANDELIN mit Steuerung		
Argon		<i>Ar</i>
Luminol		<i>Abb. 5</i>
Wasserstoffperoxid		<i>H₂O₂</i>
Natriumhydroxid		<i>NaOH</i>
Destilliertes Wasser		<i>H₂O</i>
etwas Ethanol		<i>C₂H₅OH</i>
ein Tropfen Spülmittel		
weisse Alginat-Partikel		

4 Durchführung und Ergebnisse

Als es uns nach einigen Versuchen gelingt die Piezos geeignet anzusteuern, können wir uns mit dem eigentlichen Experiment beschäftigen. Vorher führen wir jedoch noch einige andere aufschlussreiche Experimente durch.

4.1 Bestimmung der Grundfrequenz des Kolbens

Aus dem Durchmesser des Kolbens und der Schallgeschwindigkeit von Wasser $c_{H_2O, 20^\circ C} = 1483 m/s$ lässt sich die Grundfrequenz des Kolbens berechnen. Sie stimmt mit dem gemessenen Wert von $6,6 kHz$ gut überein. Bei dieser Frequenz ist die Amplitude des Kolbens auffällig gross. Vielfache dieser Frequenz haben ähnliche Eigenschaften bezüglich der Amplitude.

In der Nähe dieser Eigenfrequenzen kommt es oft zu Schwingungen der Wasseroberfläche. Diese bilden auch stehende Wellen aus, wie Abbildung 7 zeigt.



Abbildung 7: Oberflächenwellen im Kolben

4.2 Fixieren einer Gasblase

Bei den nächsten Untersuchungen geht es uns um die Fixierung von Gasblasen im Wasser. Wir untersuchen viele verschiedene Eigenfrequenzen bis ca. 50 kHz und probieren, eine Luftblase im Wasser zu fixieren. Dies ist viel schwieriger als gedacht. Fast immer steigen die Blasen einfach auf. Nur bei Frequenzen von 30 bis 40 kHz gelingt es uns, Blasen zu fixieren, wenn auch nicht in der Mitte des Kolbens. Dies wird daran liegen, dass bei diesen Frequenzen die Druckbäuche nicht nur in der Mitte des Kolbens liegen.

Es zeigt sich, dass die Fixierung von Blasen nicht an eine exakte Frequenz gebunden ist. Abweichungen von ca. 100 Hz haben kaum Auswirkungen auf die fixierten Blasen.

Auffällig ist, dass die Amplitude des Kolbens sofort abnimmt, wenn Luft in das Wasser der Kolbens gebracht wird. Dies ist auf die dämpfenden Eigenschaften der Gasblasen zurückzuführen. Abbildung 8 zeigt eine recht chaotische Amplitude des Kolbens bei einer rein sinusförmigen Anregung.

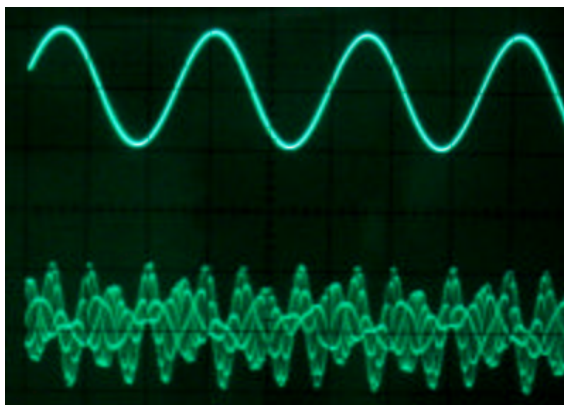


Abbildung 8: Anregung und Antwort des Kolbens bei ca. 8.30 kHz

4.3 Nachweis einer regelmässigen Druckverteilung

Bei den nächsten Versuchen geht es uns um den Nachweis einer regelmässigen Druckverteilung im Kolben. Dazu verwenden wir einerseits die Lichtemission von Luminol, die

von Druck gesteuert werden kann, andererseits weisse Kunststoffpartikel, die sich in den Druckbäuchen des Kolbens sammeln sollten.

4.3.1 Versuche mit Luminol

Um die Versuche mit Luminol durchzuführen werden einige Chemikalien benötigt. Für den Ansatz von einem Liter leuchtfähiger Lösung werden

- 0,3 - 0,5 g Luminol
- 2 - 5 g Natriumhydroxid
- 5 - 10 ml Wasserstoffperoxid (30%-ig)
- destilliertes Wasser

benötigt. Zunächst wird das Luminol in ca. 200ml Wasser aufgelöst, dann die anderen Substanzen hinzugefügt und auf einen Liter aufgefüllt. Die Mengenangaben sind als Richtwerte zu betrachten und nicht exakt einzuhalten. Die angesetzte Lösung leuchtet schwach blau und ist nicht lange lagerfähig, da sie Reaktion auch ohne Katalysator abläuft.

Der Rundkolben wird nun mit der fertig angesetzten Lösung gefüllt. Der Raum wird abgedunkelt, der leuchtende Kolben bestaunt und die Steuerung für die Piezos angeschaltet. Es ist nichts zu sehen. Wir erhöhen die Frequenz - nichts. Das einzige was auffällt, ist die deutlich geringere Amplitude des Kolbens bei sonst gleichen Bedingungen.

Wir schalten das Licht an und sehen eine mit kleinen Gasbläschen überzogene Wand des Kolbens – kein Wunder, dass die Amplitude so gering ist. Diese Gasbläschen entstehen zum einen durch die Reaktion des Luminols, bei der Stickstoff freigesetzt wird¹⁷ zum anderen durch die Zersetzung von Wasserstoffperoxid, wobei Sauerstoff entsteht¹⁸.

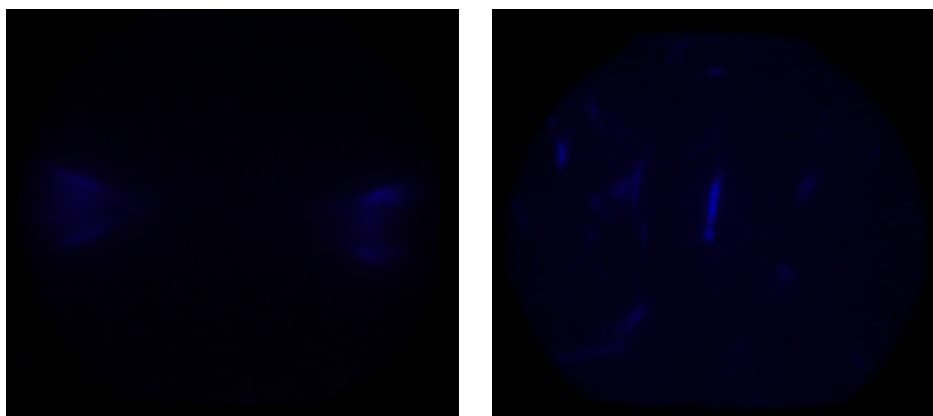


Abbildung 9: Leuchterscheinungen bei 39 kHz mit und ohne Druckänderung

Um die Gasbläschen aus den Kolben zu bekommen, schliessen wir die Vakuumpumpe an und drehen den Hahn langsam auf. Immer mehr und grössere Gasblasen steigen auf. Vermutlich zersetzt sich gerade ein grosser Teil des Wasserstoffperoxides. Wir belassen den Hahn bei einer Einstellung und erhöhen die Frequenz immer weiter. Bei über 20 kHz wird es angenehm ruhig. Bei knapp 39 kHz setzen die ersten Leuchterscheinungen ein, zunächst nur direkt vor den Piezos, siehe Abbildung 9 links. Beim Abschalten der Vakuumpumpe entstehen viele neue Leuchtfiguren, die oft intensiver sind als vorher, Abbildung 9 rechts.

¹⁷siehe Abbildung 5 auf Seite 9

¹⁸Wasserstoffperoxid ist eine Substanz die sich leicht zersetzt: $2 H_2O_2 \longrightarrow 2 H_2O + O_2 \uparrow$.

Bei den vielen weiteren Versuchen bei verschiedenen Frequenzen zeigt sich, dass die Effekte weniger vom absoluten Druck im Kolben, sondern vielmehr von der Druckänderung abhängen. Nach dem Ein- bzw. Ausschalten der Vakuumpumpe gibt es für wenige Sekunden eine andere Verteilung von helleren Leuchterscheinungen als bei isobaren Versuchen. Bei einigen Frequenzen bildet sich in diesen wenigen Sekunden eine symmetrische Verteilung der Leuchterscheinungen aus.

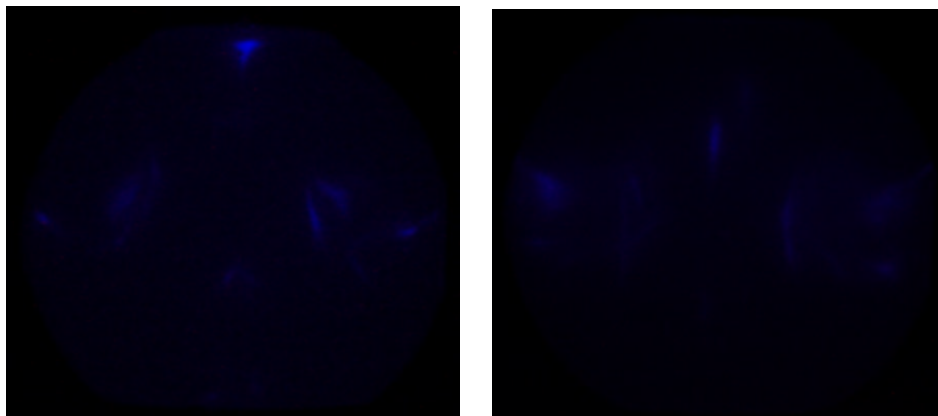


Abbildung 10: verschiedene symmetrische Verteilungen der Leuchterscheinungen

4.3.2 Versuche mit Partikeln

Zur Vorbereitung des Versuches wird ein kleines Becherglas mit ca. 10 ml Wasser gefüllt. Dazu werden einige Tropfen Ethanol, ein wenig Spülmittel und die gewünschte Menge an Partikeln gegeben. Alles wird verrührt und die Partikel sollten sich gut in der Flüssigkeit verteilen, ohne Klumpen zu bilden. Das Spülmittel sorgt für eine Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers. Nur so können die winzigen Partikel die Oberfläche durchdringen.

Wir verwenden im Versuch *Alginate*-Partikel, mit einem Durchmesser von ca. 10 μm und einer Dichte von $\rho \approx 1,1\text{g/cm}^3$. Diese werden üblicherweise für Strömungsuntersuchungen mittels PIV¹⁹ verwendet.



Abbildung 11: Partikelbällchen, die sich bei Ultraschalleinwirkung bilden

¹⁹ engl. Abk. particle image velocimetry

Die Partikel werden mittels einer Pipette in den wassergefüllten Kolben gegeben. Wir erwarten eine regelmässige Verteilung der Partikel, die die Druckverteilung in dem Kolben wiedergibt.

Beim Ansteuern der Piezos ergibt sich ein unerwartetes Bild. Die Partikel sammeln sich bei vielen Frequenzen oberhalb von 25kHz zu kleinen Bällchen zusammen, die einen Durchmesser von ca. 2mm besitzen. Sie verändern ihre Lage im Kolben kaum. Sie bewegen sich ruckartig in einer kleinen Umgebung um einen raumfesten Punkt. Dabei drehen sie sich mit sehr hoher Geschwindigkeit um ihre eigene Achse. Sie scheinen einzelne Partikel gleichermaßen anzuziehen und abzustossen, so dass ihre Grösse gleich bleibt. Abbildung 11 zeigt einige diese Bällchen. Es ist deutlich, dass die anderen Partikel fein verteilt sind. Bei einer Frequenz von ca. 38kHz gelingt es uns, einen sehr interessanten Zustand zu erreichen: im Mittelpunkt des Kolbens entsteht ein Bällchen. Es rotiert um seine Achse und zieht dabei immer mehr Partikel an. Der Durchmesser vergrössert sich ständig und erreicht mit ca. 4mm einen kritischen Wert. Dann zerteilt sich das Bällchen in zwei annähernd gleich grosse Teile. Der untere Teil²⁰ wird zum Boden des Kolbens beschleunigt und löst sich dort in seine Bestandteile auf. Der obere Teil verbleibt in der Mitte des Kolbens, vergrössert sich zusehens, erreicht den kritischen Durchmesser, teilt sich und . . .

Dieser Teilversuch wurden auch mit dem Aufbau der Firma BANDELIN durchgeführt und führte zu dem gleichen Ergebnis.

Diese Beobachtungen haben den Nachteil, dass nur die Bewegung der Bällchen ausgewertet werden kann. Die Bewegung der einzelnen Partikel bleibt unbekannt.

Darum wollen wir versuchen, eine einzige Ebene des Kolbens zu beleuchten. Dann kann die Bewegung der einzelnen Partikel in dieser Ebene beobachtet werden. Alle anderen Teilchen bleiben für die Beobachtung unsichtbar, da sie kein Licht reflektieren können.

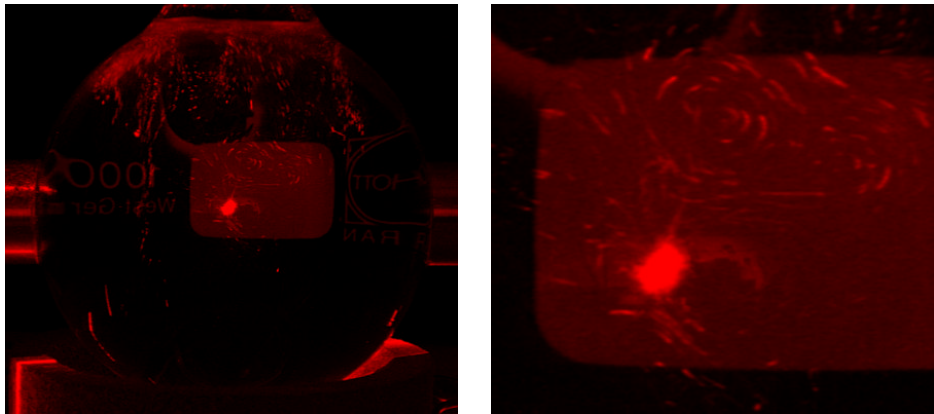


Abbildung 12: Lichtschnitt durch Partikelbällchen mit Vergrößerung

Unsere erste Idee ist es, ein Spaltdia und einen Diaprojektor zur Erzeugung einer Lichtfläche zu verwenden. Im PL existiert jedoch kein Diaprojektor. Wir versuchen es mit einem Diodenlaser, dessen Strahl mit einer Zylinderlinse aufgeweitet werden soll. Doch es gibt keine einzige Zylinderlinse im PL. Vor lauter Ratlosigkeit verwenden wir einen Glasstab, der das Licht unerwartet gleichmässig auffächert. Er wird mit etwas Klebeband vor dem Laser befestigt - fertig. Dieser Aufbau wird mit dem üblichen Stativmaterial so ausgerichtet, dass die Lichtebene den Mittelpunkt des Kolbens schneidet.

²⁰Die Trennung erfolgt immer in der Horizontalen.

Das Licht wird ausgeschaltet. Im Kolben leuchtet jetzt eine gleichmässig rote Fläche. Beim Starten der Piezos bildet sich im Mittelpunkt des Kolben ein Partikel-Bällchen. Es wird durch einen grossen, hellen, roten Punkt sichtbar, siehe Abbildung 12 links. Durch die lange Belichtungszeit zeichnen sich Partikelbahnen in der Lichtebeine deutlich ab. Man erkennt deutlich, dass sich im Lichtschnitt einige Wirbel ausgebildet haben, siehe Abbildung 12 rechts. Diese Stammen vielleicht von einem rotierenden Bällchen, das sich knapp neben der beleuchteten Ebene befindet, oder von einem Wirbel ohne zentrales Bällchen.

Die Effekte der drei Vorversuche treten nur bei Frequenzen weit über der Grundeigenfrequenz auf. Dort scheint die Energie im Kolben höher zu sein als um übrigen Frequenzspektrum. Bei dem SBSL-Versuch werden wir uns deswegen auf diesen Bereich konzentrieren.

4.4 Versuch zur SBSL

Der SBSL-Versuch läuft ähnlich ab, wie der Vorversuch zum Fixieren einer Gasblase. Der Kolben wird mit destilliertem Wasser gefüllt und mit der Vakuumpumpe ca. 30 min entgast. Der Kolben wird mit Argon auf Umgebungsdruck gebracht. Der Schliffstopfen wird vorsichtig gelöst. Aus dem Kolben wird die Reservoirspritze der Einspritzvorrichtung befüllt und danach der Kolben kurz evakuiert. Wieder wird er mit Argon befüllt, der Stopfen vorsichtig und langsam gelöst²¹. Jetzt befindet sich über dem Wasser nur Argon und die Einspritzvorrichtung wird langsam aufgesetzt.

Nun kann es Losgehen. Wir bringen bei verschiedenen Eigenfrequenzen oberhalb von 30 kHz Gasbläschen in den Kolben ein. Bei allen Frequenzen zeigt sich ein gleiches Bild: die Bläschen zappeln schnell im Kolben um einen festem Punkt herum. Sie stehen nicht fest. Nach wenigen Sekunden lösen sie sich auf. Im Abgedunkelten Raum sind weder mit dem blossen Auge noch mit der Videokamera Lichterscheinungen zu beobachten.

5 Auswertung und Ausblicke

5.1 Vorversuche

Alle Vorversuche haben ein unerwartetes Ergebnis geliefert. Dies kann daran liegen, dass der Aufbau keine stehenden Wellen erzeugt und die Druckverteilung alles andere als regelmässig ist. Ein anderer Grund kann die Tatsache sein, dass die beobachteten Effekte auf anderen physikalischen Prinzipien beruhen als gedacht. Es ist z.B. denkbar, dass die schallinduzierte Lichtemission des Luminols noch an andere Parameter gebunden ist, schliesslich hat sich gezeigt, dass der Druck einen weitaus geringeren Einfluss auf die Lichtemission hat, als die Druckänderung.

Warum alle Effekte oberhalb von 30 kHz stattgefunden haben ist nicht zu sagen. Ein Grund könnte die Befestigung der Piezos sein, die bei diesen Frequenzen in Resonanz schwingen.

5.2 SBSL-Versuch

Hier bleiben noch zwei Fragen zu klären:

- Warum lassen sich die Blasen nicht fixieren?
- Warum lösen sich die Blasen im Wasser?

Die zweite Frage ist von grosser Bedeutung. Kann es sein, dass die Argonathmosphäre doch mit Luft verdünnt worden ist? Wie kann dies besser verhindert werden?

²¹Es sollen keine Luftströmungen entstehen, die in den Kolben dringen und das Argon verdünnen.

Um diese Fragen zu beantworten, sind weitere Versuche nötig, die wir in den Ferien durchführen möchten. Insbesondere wird der Aufbau der Firma BANDELIN untersucht, da er eine sehr hohe Ausgangsleistung besitzt und noch nicht für den SBSL-Versuch eingesetzt wurde.

5.3 Tips für andere PL-Gruppen

Hier noch ein paar wichtige Tips zur Durchführung der durchgeführten Experimente:

- Der Kolben ist unbedingt Aufzuhängen.
- Die Ansteuerung der Piezos sollte leistungsstark und flexibel sein.
- Eine Amplitudenmessung mittels eines Piezoplättchens lohnt sich.
- Die Vorversuche sind sehr interessant und schön anzuschauen.
- Luminol gibt es bei *Fielig-Lehrmittel* am Kleistpark, Langenscheidtstr. 10.

6 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns ganz herzlich bei der Firma BANDELIN bedanken, die uns einen kompletten Versuchsaufbau samt elektrischer Ansteuerung kostenlos zur Verfügung gestellt hat. Der Dank geht insbesondere an den Entwicklungsingenieur Herrn Jung. Umfangreichere Versuche mit dem Aufbau stehen noch aus und werden in den Ferien weitergeführt.

Ein weiteres Dankeschön geht an die Mitarbeiter des *Labor für Biofluidmechanik* der HU-Berlin. Sie haben uns *Alginate*-Partikel zur Verfügung gestellt und eine komplette Laserbeleuchtung zur Ausleihe angeboten.

Literatur

- [1] Frank Jansing. *Ultraschallanwendungen in der Verfahrenstechnik*, 1999. Fachhochschule Köln, University of Applied Sciences.
- [2] P. Lemmens. *Sonolumineszenz: Aus Schall wird Licht* - Folien zum Habilitationskolloquium, 1999. RWTH Aachen.
- [3] Ingo Müller. *Grundzüge der Thermodynamik*. Springer-Verlag Berlin / Heidelberg, 1999.