

Motivation und Einleitung

In diesem Projekt versuchen wir die Verdampfungskonstante von Wasser und Ethanol einmal bei levitierenden Tropfen und einmal bei „liegenden“ Tropfen zu bestimmen. Diese beiden Versuchsaufbauten wollen wir vergleichen. Dabei stehen die Stabilität der schwebenden Tropfen durch Ultraschallwellen und die Überprüfung des D²-Gesetzes im Vordergrund.

Physikalische Grundlagen

Unser Projekt befasst sich mit der Erzeugung von stehenden Ultraschallwellen, einem Teilbereich der Akustik. Von besonderer Bedeutung sind die Analyse der levitierten Objekte mit Phasenübergängen und deren benötigte Energien.

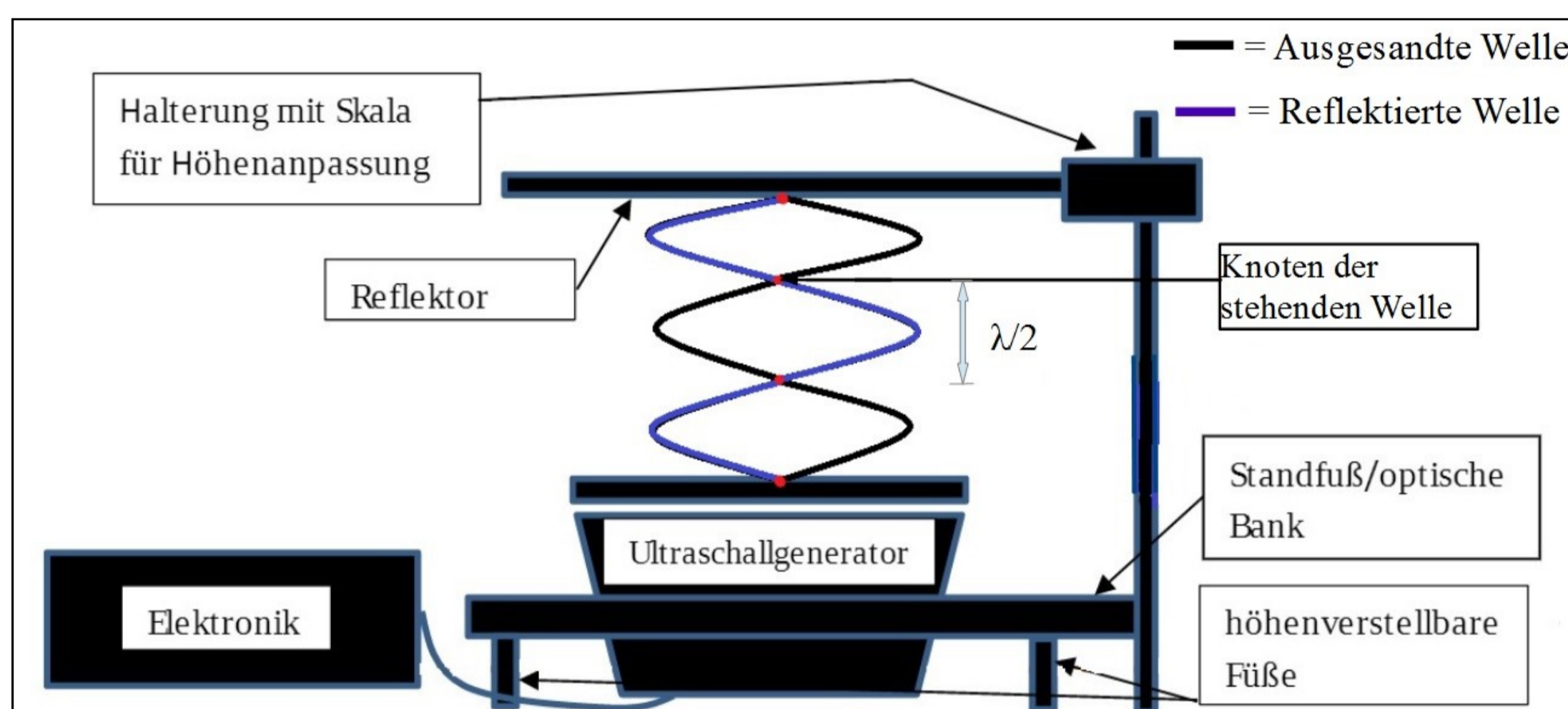
Schallwellen

Schallwellen sind zeitlich und räumlich periodische Druckschwankungen in einem Medium, die wir Menschen in einem Frequenzbereich von 16Hz – 20kHz wahrnehmen. Schallwellen in einem Frequenzbereich von 20kHz - 1,6GHz können wir nicht mehr wahrnehmen. Dabei handelt es sich um den Ultraschallbereich.

In unserem Projekt erzeugen wir Ultraschallwellen mithilfe eines Ultraschallgenerators, der den Piezoeffekt ausnutzt. Mehrere kleine Piezokristalle befinden sich innerhalb des Generators, welche aufgrund einer Wechselspannung zur Schwingung angeregt werden und somit Ultraschall erzeugen. Um eine stehende Ultraschallwelle zu erzeugen, wird ein Reflektor im Abstand d

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

zum Generator aufgebaut (siehe Skizze 1). Hierbei ist $n \in \mathbb{N}$, λ die Wellenlänge und c die Schallgeschwindigkeit in Luft. Die ausgehende Welle und die reflektierte Welle überlagern sich entgegengesetzt. Die dabei entstehende stehende Welle hat feste Knotenpunkte, deren Auslenkung stets Null bleibt.



Skizze 1: Entstehung der stehenden Welle mit einem Levitator

In diesen Knoten können aufgrund von Druck und Kräftewirkungen Objekte geringer Masse bzw. geringe Mengen an Flüssigkeit levitieren.

Herleitung des D²-Gesetzes

Da es unser Ziel ist, die Verdampfungskonstante der levitierenden Flüssigkeiten zu bestimmen, betrachten wir die zeitliche Massenabnahme \dot{m} der Flüssigkeit in Abhängigkeit des Durchmessers D und wählen dazu den Ansatz: $\dot{m} = a \cdot D$

$$m = V \cdot \rho = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \cdot D^3 \Rightarrow \dot{m} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot \dot{D} = a \cdot D \Rightarrow \int D dD = \int \frac{2 \cdot a}{\pi \cdot \rho} dt \Rightarrow D^2 = \frac{4 \cdot a}{\pi \cdot \rho} t + D_0^2$$

Hierbei beschreibt V das Volumen, ρ die Dichte, a eine Konstante und m die Masse des Tropfens. Durch die Definition der Verdampfungskonstante $K = \frac{4 \cdot a}{\pi \cdot \rho}$ erhält man das D²-Gesetz:

$$D^2 = K \cdot t + D_0^2$$

Weitere Beobachtungen

Der Ethanolverlauf kann durch die höhere Flüchtigkeit des Ethanols relativ zu Wasser unter Normalbedingungen erklärt werden. Diese wird durch die Verdunstungszahl definiert. Wasser besitzt eine Verdunstungszahl von 80, Ethanol eine Verdunstungszahl von 8,3. Es folgt daraus: Ethanol verdunstet ca. zehnmal schneller als Wasser. Zudem besitzt Ethanol eine geringere Dichte (789kg/m³) und einen geringeren Siedepunkt (78,37°C) als Wasser. Es liegen schwächere Molekülbindungen vor. Für den Übergang in die Gasphase wird bei Ethanol wenig Energie benötigt.

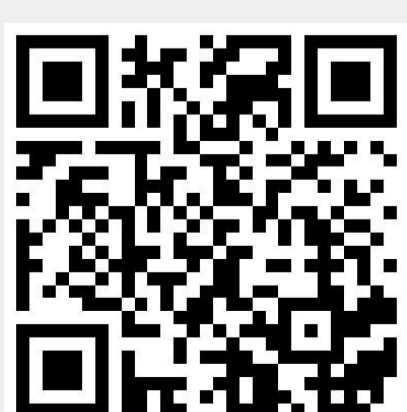
Obwohl es uns während der Versuchsreihe nicht gelang, Flüssigkeiten levitieren zu lassen, haben wir andere Effekte beobachten können. Zum Einen konnten wir die Frequenz des Levitators durch Ausmessung der Wellenlänge zu

$$f \pm \Delta f = (28,775 \pm 0,245) \text{ kHz}$$

bestimmen, welche erwartungsgemäß im unteren Ultraschallbereich liegt. Zudem ist uns aufgefallen, dass Wassertropfen, die auf der Oberfläche des Generators aufkamen, sofort verdampft sind. Dieses lag nicht an der Temperatur des Generators, sondern an der Erzeugung von Ultraschallwellen mithilfe des Piezoeffektes. Es war uns möglich, die Wärmeleistung des Generators zu bestimmen

$$P \pm \Delta P = (0,217 \pm 0,008) \text{ W}$$

Ein weiterer Effekt war, dass durch die Verdampfung des Trockeneises die stehenden Ultraschallwellen sichtbar gemacht werden konnten. Um diese deutlich sichtbar zu machen, verwendeten wir Trockeneis. Mithilfe der Zugabe von Wasser wurde Dampf erzeugt, so dass man die stehenden Schallwellen mit bloßem Auge sehen konnte, da der Dampf in die Knotenpunkte gezogen wurde (siehe YouTube-Video (QR-Code)).



Durch das Einlesen dieses QR-Codes gelangen Sie zu unserem Projektvideo. In diesem werden Ausschnitte unserer Versuche mit schwebenden Styroporkugeln, die sichtbaren stehenden Wellen und die Verdampfung von Wasser auf der Oberfläche des Generators gezeigt.

<http://www.youtube.com/watch?v=Y4MyqC02iZA>

Referenzen:

- [1] Dissertation von Runar Eberhardt: archiv.ub.uni-marburg.de/diss/z2000/0079/html/teil3.htm
- [2] Rechner für Schallgrößen: www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgroessen.htm

Danksagungen:

Wir bedanken uns bei Klaus Ulrich und Tomasz Domanski für ihre Unterstützung beim Durchführen des Experiments, bei Dr. Dirk Meyer für den Kauf des Levitationsgerätes aus den USA, bei Marc Real für die Schriftgestaltung, dem Team von Borosa für ihr Angebot bei Ihnen Experimente durchzuführen, dem Leihgeber der Mikropipette aus der Chemie-Fakultät und unserem Projektleiter Nils Conrad, der sich stets um die Motivation der Studenten bemüht und uns bei den Formeln und Herleitungen unterstützt hat.

Kontakt:

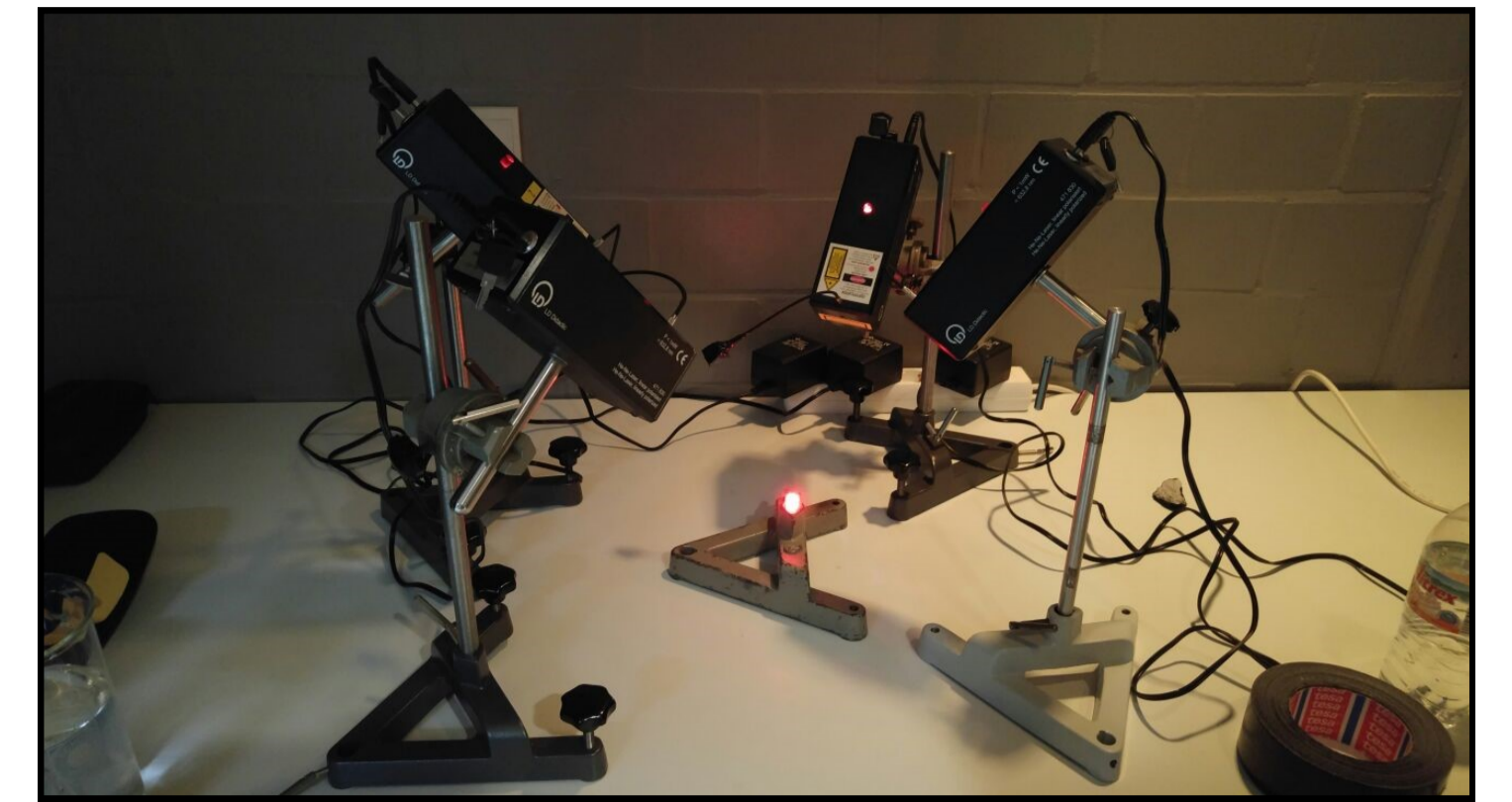
tim.bergmeier@rub.de
alexander.boeddecker@rub.de
mandy.kunfeld@rub.de
franz.wilfarth@rub.de

Versuchsaufbau und Durchführung

Erster Aufbau - „liegende“ Tropfen

Im ersten Versuchsaufbau befindet sich ein Tropfen auf der flachen Seite eines Teflonzylinders, um möglichst rund zu bleiben. Dieser wird mit vier He-Ne-Lasern bestrahlt, welche rund um den Tropfen herum positioniert werden. Dieser wird dadurch möglichst gleichmäßig und homogen erhitzt, bis er verdampft. Die Laser besitzen eine Leistung von jeweils 1 mW und eine Wellenlänge von $\lambda=632,8 \text{ nm}$. Mithilfe eines Kathetometers lässt sich der Durchmesser $D(t)$ des Tropfens messen (siehe Aufnahme 1 und 2).

Das Problem dieser Messung ist, dass die Kugeln aufgrund der Grenzfläche zu dem festen Material nicht exakt rund sind, sondern ein Teil zerfließt. Daraus entsteht ein größerer Fehler in der Messung des Durchmessers.



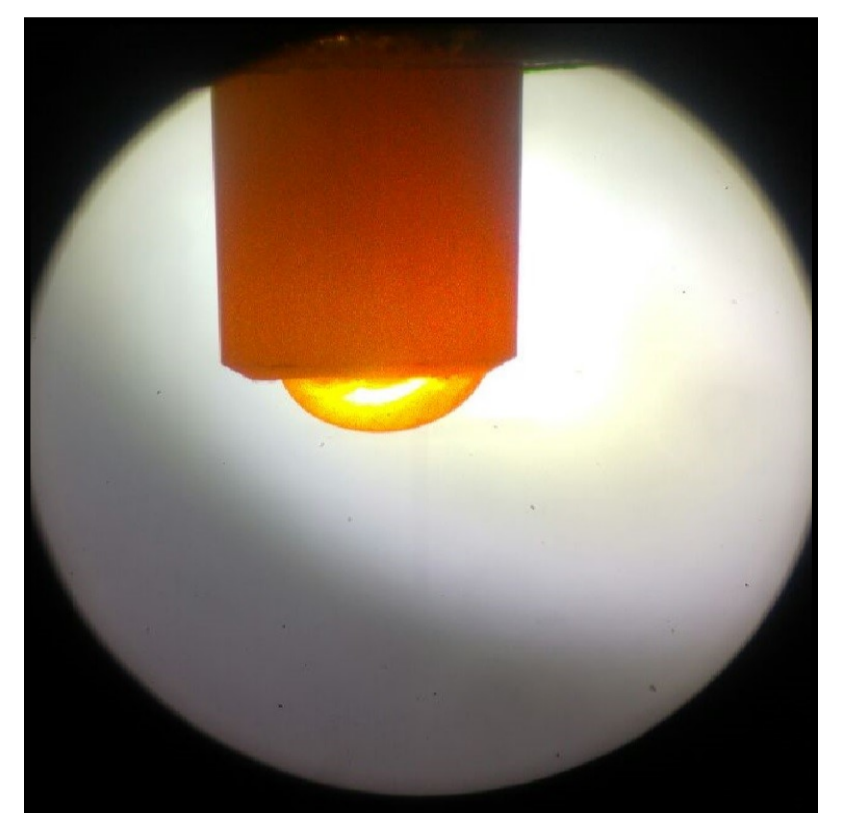
Aufnahme 1: „Liegender“ Wassertropfen wird durch vier Laser bestrahlt

Zweiter Aufbau - levitierende Tropfen

Idee: Um möglichst runde Tropfen zu bekommen und die Fremdeinflüsse auf die Flüssigkeit gering zu halten, werden diese mithilfe eines akustischen Levitators zum Schweben gebracht. Dadurch gelangen sie in eine runde Form und es besteht keine Grenzfläche zu einem festen Material.



Doch bevor man Flüssigkeiten levitieren lassen kann, muss überprüft werden, ob leichte Festkörper (hier: Styroporkugeln) in den Knoten der entstehenden Ultraschallwelle verbleiben und wie stabil der Schwebezustand ist. Hierfür wurden in einen Knoten viele Kugeln platziert, bis sie herunterfielen, oder verformte Styroporkugeln in alle Knoten der stehenden Welle gelegt (siehe Aufnahme 3). Das Ergebnis war, dass die Styroporkugeln erfolgreich in Schweben gehalten werden konnten. Die Höchstanzahl betrug 22 Kugeln in einem Knoten.



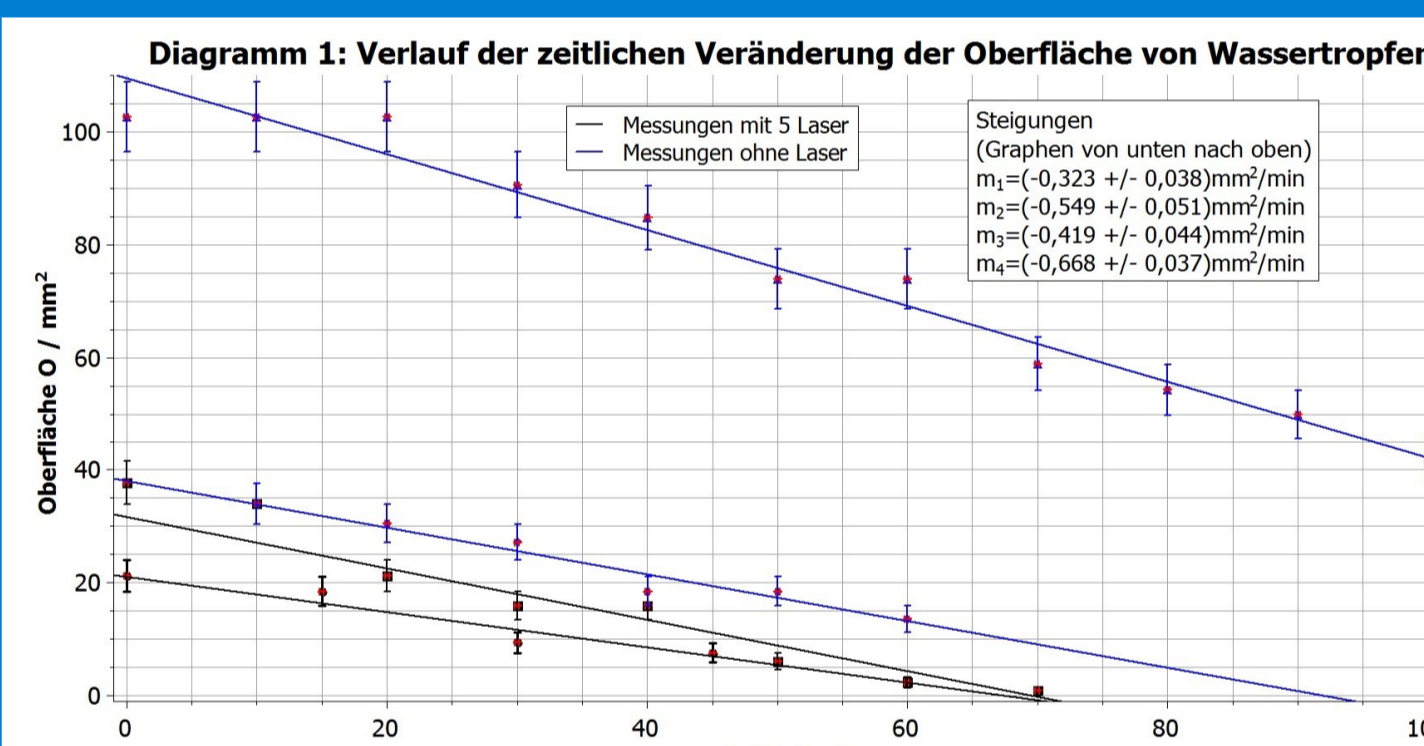
Aufnahme 2: Blick durch das Kathetometer zur Messung des Tropfendurchmessers

Probleme beim Schweben von Flüssigkeiten

Es wurden verschiedene Methoden verwendet, um Tropfen schweben zu lassen. So wurden unterschiedliche Pipetten, Zerstäuber und wasserabweisende Mittel verwendet. Wasser wurde auf oder in die Styroporkugeln gegeben; durch elektrische Aufladung in den Levitator gestoßen, oder gefroren. Dennoch ließen sich die Flüssigkeiten nicht in den Knoten platzieren. Es konnten keine Messungen zur Verdampfungskonstante durchgeführt werden. Somit ermöglichte dieser Versuch keinen Vergleich mit „liegenden“ Tropfen.

Aufnahme 3: Schwebende Styroporkette

Auswertung



Bestimmung der Verdampfungskonstante bei „liegenden“ Tropfen

Aus den Messergebnissen lässt sich die Oberfläche des Tropfens gegen die Zeit auftragen, da die Oberfläche einer Kugeln beschrieben ist durch

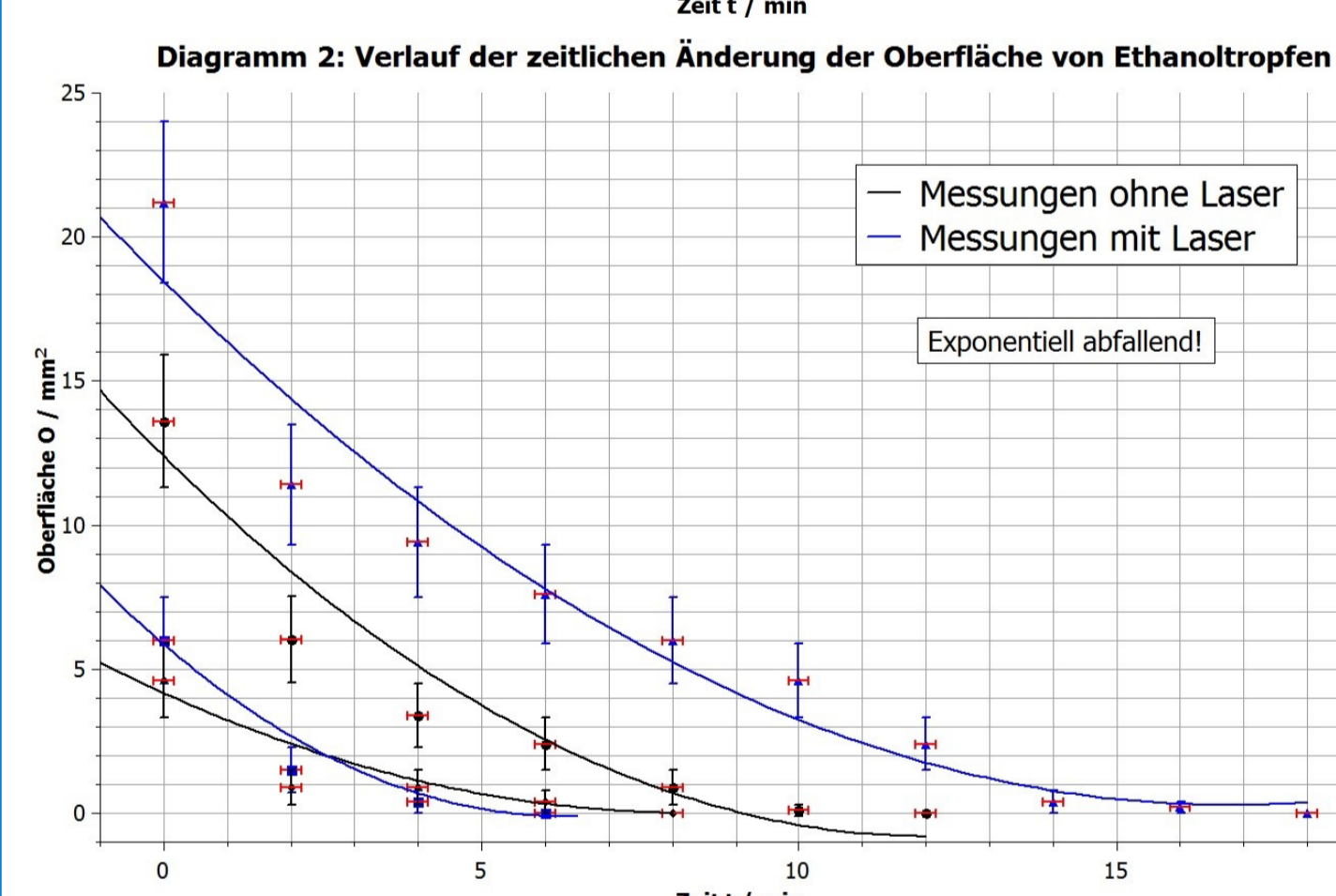
$$O = \pi \cdot D^2$$

1. Wassertropfen

Aus Diagramm 1 geht hervor, dass die Verdampfung von Wasser dem D²-Gesetz folgt und sich die Verdampfungskonstante durch lineare Regression aus den Messungen zu

$$K_{\text{Laser}} \pm \Delta K_{\text{Laser}} = (0,544 \pm 0,029) \frac{\text{mm}^2}{\text{min}} \wedge K_{\text{ohne}} \pm \Delta K_{\text{ohne}} = (0,436 \pm 0,032) \frac{\text{mm}^2}{\text{min}}$$

bestimmen lässt. Es gilt $K_{\text{Laser}} > K_{\text{ohne}}$ was sich mit dem theoretischen Ansatz deckt. Sämtliche Messungen liegen im Fehlerbereich, wobei der Zeitfehler aufgrund langer Messungen (~1h) besonders gering ausgefallen ist. Wichtigste Fehlerquellen sind hierbei die Durchmessernäherung und das Zerfließen des Tropfens auf dem Teflonstab, weshalb keine exakte Kugel gemessen wurde.



2. Ethanoltropfen

In Diagramm 2 ist zu erkennen, dass sich die Verdampfung von Ethanol nicht mit dem bekannten D²-Gesetz beschreiben lässt. Da die Messungen analog zu Wasser durchgeführt wurden, sind diese gleichwertig mit den Messungen aus Diagramm 1. Aus diesem Grund kann man ein neues D²-Gesetz für Ethanol herleiten. Hierzu wird der Ansatz gewählt: $\dot{m} = a \cdot D^2$

Bei gleichen Rechenschritten ergeben sich das D- und D²-Gesetz für Ethanol.

$$D = \frac{2 \cdot a}{\pi \cdot \rho} t + D_0 \quad D^2 = \left(\frac{2 \cdot a}{\pi \cdot \rho} \right)^2 t^2 + \frac{4 \cdot a}{\pi \cdot \rho} D_0 t + D_0^2$$

Wie aus den Formeln zu erkennen ist, lässt sich die Verdampfungskonstante K_E von Ethanol durch Auftragung des Durchmessers gegen die Zeit ermitteln (siehe Diagramm 3).

$$K_{\text{Laser}} \pm \Delta K_{\text{Laser}} = (3,975 \pm 0,275) \cdot 10^{-2} \frac{\text{mm}}{\text{min}} \wedge K_{\text{ohne}} \pm \Delta K_{\text{ohne}} = (8,48 \pm 0,92) \cdot 10^{-2} \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Es ist zu erkennen, dass diesmal $K_{\text{Laser}} < K_{\text{ohne}}$ gilt.

Dieses widerspricht der Theorie, dass die Verdampfungskonstante durch eine größere Energiezufuhr größer sein sollte, als ohne. Da die Theorie für Wasser bestätigt worden ist und zu Wasser unabhängig von diesem Experiment weitaus mehr Messergebnisse vorliegen als für Ethanol, müssen wir davon ausgehen, dass Ethanol anfälliger für Fehlerquellen ist als Wasser. Unter diesen Umständen konnte die Verdampfungskonstante für Ethanol nicht ermittelt werden.

Ergebnisse und Fazit

Es wurden verschiedene Methoden verwendet, um Tropfen schweben zu lassen. Sowohl aufgrund der geringen Leistung des Levitators und somit einer zu geringen Amplitude der Welle, als auch verschiedener Effekte, wie z.B. Schwierigkeiten beim Ablösen des Wassers, Verwendung einer Mikropipette oder der unförmigen Wassertropfen, war es nicht möglich, Flüssigkeiten in der vorgegebenen Zeit schweben zu lassen. Das Problem der geringen Amplitude kann durch den Einsatz eines weiteren Generators behoben werden. Dieses geschehe anstelle eines Reflektors mit der gleichen Frequenz, wodurch höherer Druck entsteht, um Flüssigkeiten in den Knoten festzuhalten. Des Weiteren haben wir das Intensitätsintervall abgeschätzt, in dem es nach unseren Messungen überhaupt möglich sei, Flüssigkeiten mit ähnlicher Dichte wie Wasser levitieren zu lassen. Dieses liegt bei

$$I \in [0,0004; 0,1353] \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \ll I_{\text{Hersteller}} = 18924 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Abschließend stellen wir fest, dass wir das Hauptziel der schwebenden Tropfen innerhalb des gegebenen Zeitraums nicht erreicht haben, jedoch viele andere Effekte beobachten konnten. So gelang es, das D²-Gesetz für Wasser zu bestätigen und ein neues für Ethanol herzuleiten.