

Die optische Pinzette

Tin Vrkic, Mika Nock

1. Dezember 2024

Zusammenfassung

Im Versuch „optische Pinzette“ soll die Eigenschaft von Licht untersucht werden, auf verschiedene Objekte mittels Fokussierung eine Kraft auszuüben. Es wird das Verhalten verschiedener Gegenstände in der Pinzette untersucht und es soll unter anderem mittels der Brown'schen Bewegung die Maximalkraft, die das Licht ausüben kann, berechnet.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbereitung	4
1.1	Funktionsweise	4
1.1.1	Krafterzeugung	4
1.1.2	Strahlengang des Lasers	4
1.2	Versuchsdurchführung	4
1.2.1	Aufbau	4
1.2.2	Fokussierung	5
1.2.3	Aufgabe 1: Kennenlernen der Pinzette	5
1.2.4	Aufgabe 2: Fett in der optischen Pinzette	5
1.2.5	Aufgabe 3: biologisches Gewebe / Schimmel	5
1.2.6	Aufgabe 4: Brownsche Bewegung	5
1.2.7	Aufgabe 5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen	6
1.2.8	Aufgabe 6: Farbstoffe	7
2	Auswertung	8
2.1	Aufgabe 1	8
2.2	Aufgaben 2 und 3	8
2.3	Aufgabe 4: Brown'sche Bewegung	8
2.4	Aufgabe 5	11
2.5	Aufgabe 6	11
3	Literatur	14

1 Vorbereitung

1.1 Funktionsweise

1.1.1 Kraftherzeugung

Im Folgenden soll zunächst erklärt werden, wieso in der optischen Pinzette eine Kraft auf bestimmte Materialien wirkt.

Trifft ein Lichtstrahl auf ein Objekt in ähnlichen Größenordnungen wie die Wellenlänge, so ist dieses einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt. Dieses induziert einen Dipol, der wiederum mit dem Feld interagiert. Aus diesem Grund sind nur dielektrische Materialien für diesen Versuch geeignet. Es resultiert eine Kraft, die das zu greifende Objekt in Richtung höherer Lichtintensität, also zum Fokuspunkt, zieht. Ist ein getroffenes Objekt deutlich größer als die Wellenlänge, sorgt die Brechung des Lichtes ebenfalls für eine Kraft in Richtung Fokuspunkt. Verschiebt man nun den Fokus, werden bereits eingefangene Gegenstände also ebenfalls mit verschoben. [2]

1.1.2 Strahlengang des Lasers

Um eine möglichst große Ausleuchtung und einen möglichst kleinen Fokus zu erreichen muss der Strahl aus dem verwendeten Diodenlaser zunächst durch eine Linse fokussiert werden. Ein weitere Linse mit größerer Brennweite wird nun im Abstand $d = f_1 + f_2$ hinter der ersten platziert, sodass der nun aufgeweitete Strahl wieder parallel wird (Abb. 1).

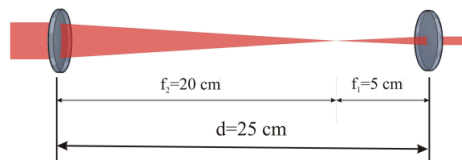


Abbildung 1: Aufweitung des Lichtstrahles. [1]

Hinter der zweiten Linse befindet sich ein Strahlteiler, nach dem der Strahl dann fokussiert und zur Bewegung eines Objektes verwendet wird.

1.2 Versuchsdurchführung

1.2.1 Aufbau

Im vorliegenden Aufbau wird ein Diodenlaser verwendet, dessen Strahlengang vollständig abgeschottet ist. Mittels zweier Motoren kann der Objektträger in der x-y-Ebene und der mittels einer μm -Schraube in der z-Richtung bewegt werden. Aufgenommen wird das Bild über eine CCD-Kamera, vor der sich eine Filterscheibe für das Laserlicht befindet.

1.2.2 Fokussierung

Zum Erhalt eines scharfen Bildes ist eine Einstellung des Fokus nötig. es handelt sich hierbei jedoch nicht um den Fokus des Lasers, sondern um den der Kamera. Das wird folgendermaßen erreicht:

1. Möglichst weites Herunterbewegen des Objektträgerhalters
2. Einlegen des Objektträgers
3. Hochfahren des Objektträgerhalters bis zweimal ein Verzerter Lichtpunkt erschienen ist, danach erscheint das fokussierte Bild

1.2.3 Aufgabe 1: Kennenlernen der Pinzette

Zu Beginn wird sich mit der Pinzette vertraut gemacht, indem einige Polystyrolkugeln eingefangen und aneinander platziert werden sollen

1.2.4 Aufgabe 2: Fett in der optischen Pinzette

In dem ein Tropfen Sahne zu Wasser hinzugegeben wird, bis die Mischung leicht milchig erscheint, soll untersucht werden, wie sich Fett in diesem Experiment verhält. Es soll beobachtet werden, wie sich der Tropfen verhält, wenn er eingefangen wird, wenn er in z-Richtung bewegt wird und wenn der Laser danach wieder ausgeschalten wird.

1.2.5 Aufgabe 3: biologisches Gewebe / Schimmel

Nun soll ein biologisches Präparat eingebracht werden. Hierfür liegen Sporen der Gattung *Alternaria* bereit.

1.2.6 Aufgabe 4: Brownsche Bewegung

Bei der Brown'schen Bewegung handelt es sich um ein statistisches Phänomen in kolloidalen Systemen. Da sich Moleküle immer in einer Temperaturbewegung befinden stoßen diese immer wieder mit den hier zu beobachteten Objekten, was zu einer Bewegung dieser führt.

Es soll zunächst eine Videoaufnahme von mehreren Teilchen gemacht werden, die anschließend mit geeigneter Software getrackt werden sollen. Aus dieser Aufnahme lassen sich für jeden Zeitpunkt t_i für jede Kugel die Koordinaten (x_i, y_i) bestimmen und die quadrierte Verschiebung (SSquared Displacement") über

$$r^2(t_i) = x_i^2 + y_i^2$$

berechnen. Daraus können wir für jeden Zeitpunkt t_n den Durchschnitt des Squared Displacements über alle vorhergehenden Zeitpunkte t_i bestimmen, also das sog. Mean Squared Displacement:

$$\langle r^2 \rangle(t_n) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r^2(t_i)$$

. Indem das für 5-7 Teilchen durchgeführt wird können wir erneut einen Durchschnitt über alle Kugeln für jeden Zeitpunkt ermitteln:

$$\langle r^2 \rangle(t_n)_{avg} = \frac{1}{M} \sum_M \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r^2(t_i) \right)$$

Es lässt sich nun mit einigen Überlegungen und den gewonnen Daten die maximale Kraft der optischen Pinzette bestimmen. Hierfür muss über die Steigung von $\langle r^2 \rangle(t_n)_{avg}$ und durch einige Umrechnungen die Reibung der Objekte und somit auch der Stokes'sche Reibungskoeffizient bestimmen. Über die maximale Geschwindigkeit, mit der ein Teilchen noch bewegt werden kann erhält man somit die maximale Kraft der optischen Pinzette:

$$\begin{aligned} F_{T,max} &= 6\pi\eta_{eff}av_{max} \\ D &= \frac{k_B T}{6\pi\eta_{eff}a} \\ \langle r^2 \rangle(t_n)_{avg} &= 4Dt = 4 \cdot \frac{k_B T}{6\pi\eta_{eff}a} \cdot t \end{aligned}$$

wobei der gesamte Faktor $4 \cdot \frac{k_B T}{6\pi\eta_{eff}a}$ der Steigung m von $\langle r^2 \rangle(t_n)_{avg}$ entspricht. Weiter:

$$\begin{aligned} m &= 4 \cdot \frac{k_B T}{6\pi\eta_{eff}a} \\ \Leftrightarrow \eta_{eff} &= \frac{2}{3} \frac{k_B T}{\pi m a} \end{aligned}$$

Man muss nicht erst η_{eff} ausrechnen, sondern kann es direkt in die erste Formel für $F_{T,max}$ einsetzen. Das ergibt folgendes Ergebnis:

$$F_{T,max} = 4v_{max} \frac{k_B T}{m} \quad (1)$$

1.2.7 Aufgabe 5: Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Da die Brown'sche Bewegung ein statistischer Prozess ist, lassen sich keine voraussagen über die Position eines Objektes zu einem bestimmten Zeitpunkt machen, jedoch lassen sich Wahrscheinlichkeiten für diese aufstellen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die x - und die y -Koordinate eines freien Teilchens und eines in der optischen Falle sollen hier experimentell bestimmt werden.

Zur Durchführung wird je ein Teilchen getrackt und die beiden Koordinaten zu den Zeitpunkten t_i separat in Histogrammen dargestellt. Die Position des freien Teilchens sollte einer Boltzmann-Verteilung mit $P(x) = \frac{1}{Z} \cdot e^{-\frac{U(x)}{k_B T}}$ folgen. Hierbei steht $U(x)$ für die Energie der Position x .

1.2.8 Aufgabe 6: Farbstoffe

In der letzten Aufgabe soll nun der Strich eines Permanentmarkers in destilliertem Wasser aufgelöst werden. Bei Permanentmarkern handelt es sich um gelöste Farbstoffmoleküle und nicht um Pigmente. Zur Verfügung stehen ein Roter und ein Schwarzer Stift, die beide untersucht werden sollen.

2 Auswertung

2.1 Aufgabe 1

Nach einigen Startschwierigkeiten haben wir es geschafft, dass der Laser die Polystyrolkugeln greift und wir diese so bewegen können. In Abb. 2 sieht man am rechten Bildrand 6 Kugeln auf einem Haufen. Eine davon hat einen leichten Rotstich, das ist der Laser, der die Kugel im Moment der Aufnahme festhält. Es gibt ansonsten noch relativ viel Verunreinigungen, von denen wir vermuten, dass es sich hauptsächlich um Luftblasen handelt, die durch ein unsauberes Aufbringen des Glasplättchens auf die Probe entstanden sind. Da diese Aufgabe mehr eine qualitative Aufgabe war, in der wir uns mit der Handhabung der Apparatur vertraut machen, gibt es an dieser Stelle nicht viel mehr Datenauswertung, die gemacht werden kann.



Abbildung 2: Einige Polystyrolkugeln auf einem Haufen.

2.2 Aufgaben 2 und 3

Die Aufgaben mit Fett und den Sporen wurden aus hygienischen, beziehungsweise gesundheitlichen Gründen nicht durchgeführt.

2.3 Aufgabe 4: Brown'sche Bewegung

Für diese Aufgabe wurde eine Kugel mit einer Laserleistung von 5 mW gehalten und es wurde ein Video von etwa 1200 Frames aufgenommen. Mit einer geeigneten Software (Tracker von Physlets [4]) wurden die Positionen sowohl der

fixierten als auch 5 anderer Kugeln getrackt, deren Weg in Abb. 3 zu sehen ist. Der blaue Punkt am rechten Bildrand ist die fixierte Masse als Kontrolle, man sieht, das sie sich nicht bewegt.

Positionen einiger Polystyrol-Kügelchen (fixierte mit 5mW gehalten)

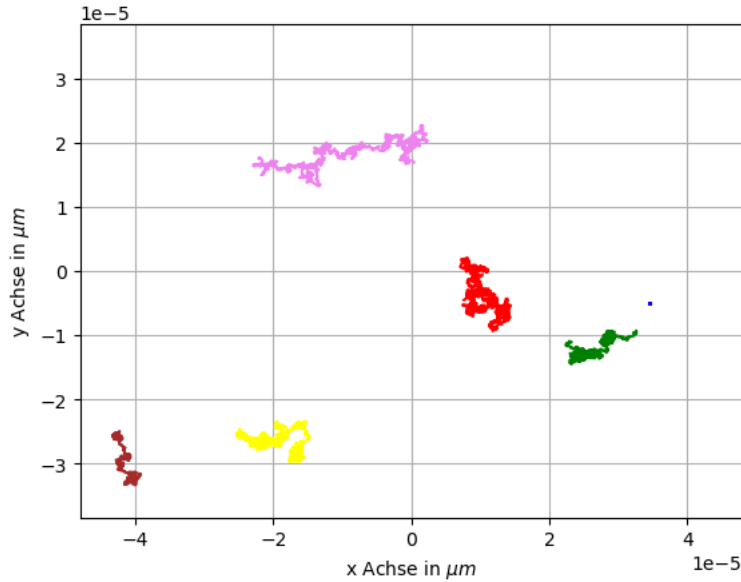


Abbildung 3: Positionen einiger Polystyrol-Kügelchen

Man kann dann für jedes Kügelchen, wie in der Versuchsdurchführung oben beschrieben, das Mean Squared Displacement berechnen, welches in Abb. 4 dargestellt ist.

Mittelt man dann für jeden Zeitpunkt die MSDs aller Kügelchen, erhält man die Gerade $\langle r^2 \rangle(t_n)_{avg}$ in Abb. 5. Die Punkte sind hier der Übersichtlichkeit halber ohne Errorbars dargestellt. Außerdem wurden die ersten etwa 70 s und die letzten paar Sekunden abgeschnitten, da die Messpunkte in diesen Intervallen nicht sinnvoll zum Ergebnis beitragen.

Im folgenden wird eine Gerade durch die Punkte aus Abb. 5 gefittet, um die Steigung für die maximale Haltekraft zu bestimmen.

Wir erhalten aus dem Fit und dem Experiment folgende Werte, die wir benutzen, um die maximale Haltekraft zu bestimmen:

- Steigung der Geraden: $m = (1.170 \pm 0.002)10^{-13} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Maximale Geschwindigkeit: $v_{max} = (10.5 \pm 0.2)10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Temperatur: $T = (20 \pm 1)^\circ\text{C} = (293 \pm 1) \text{ K}$
- Boltzmann-Konstante: $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$

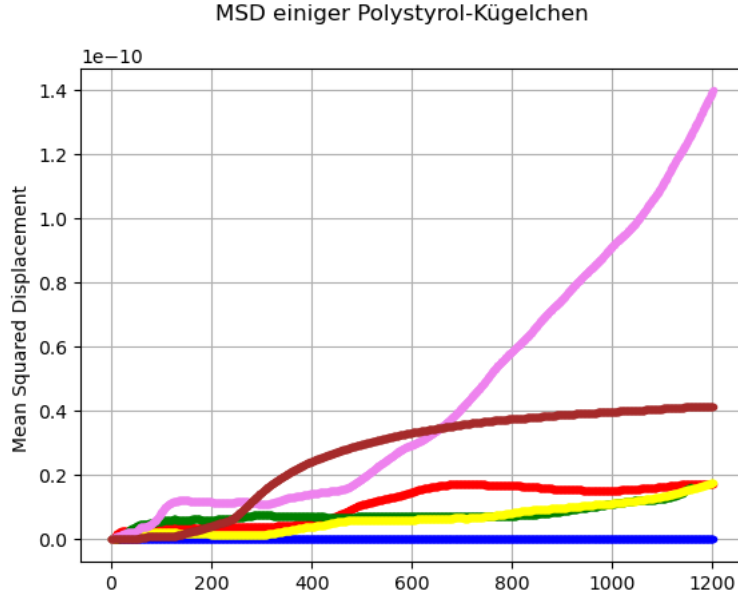


Abbildung 4: Mean Squared Displacement einiger Polystyrol-Kügelchen

Einsetzen in die Formel für die maximale Haltekraft, die in der Versuchsdurchführung hergeleitet wurde, ergibt folgendes Ergebnis:

$$F_{T,max} \approx (1.45 \pm 0.03)10^{-12} \text{ N} = (1.45 \pm 0.03) \text{ pN} \quad (2)$$

Man kann auch die effektive Viskosität berechnen, um das Ergebnis für die maximale Haltekraft etwas zu überprüfen. Der Durchmesser der Kügelchen wurde in der Vorbereitung und auf dem Behälter zu $3 \mu\text{m}$ angegeben. Mit der in der Versuchsdurchführung hergeleiteten Formel für die effektive Viskosität erhalten wir folgenden Wert:

$$\eta_{eff} = \frac{2}{3} \frac{k_B T}{\pi m a} \approx (4.9 \pm 1.0) \text{ mPa s} \quad (3)$$

Der Literaturwert der Viskosität von Wasser liegt laut Wikipedia [5] bei einer Temperatur von 20°C (die bei uns gegeben war) bei $\eta_{H_2O} = 1 \text{ mPa s}$. Allerdings ist die Viskosität, die wir ausgerechnet haben, die effektive Viskosität, wobei in der Vorbereitung nicht darauf eingegangen wurde, wie sich diese effektive Viskosität im Gegensatz zur normalen zusammensetzt. Außerdem kann es sein, dass im Laufe der Jahre Verunreinigungen ins Wasser gelangt sind und die Viskosität zu Größeren Werten hin beeinflussen. Die beiden genannten Faktoren könnten den großen Unterschied zwischen Literaturwert und unserem berechneten Wert erklären. Letzterer gibt aber einen Hinweis darauf, dass die maximale Haltekraft zumindest größenordnungsmäßig plausibel ist.

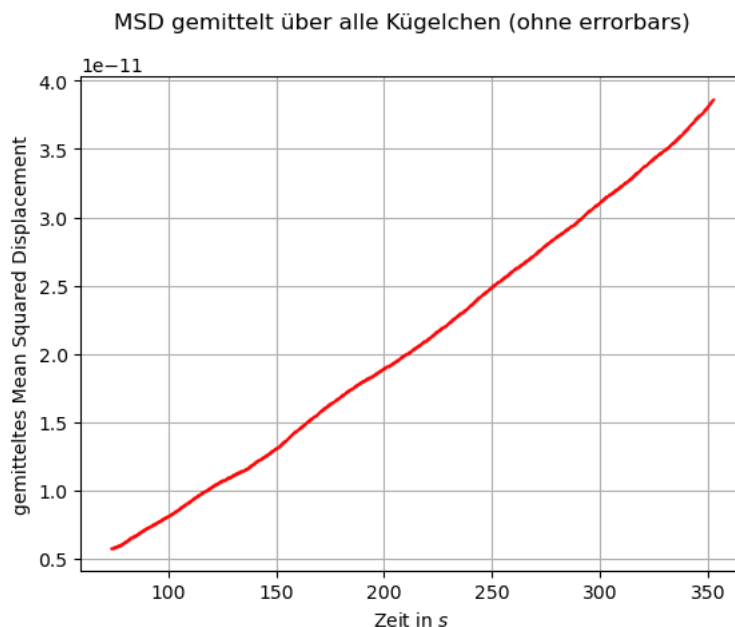


Abbildung 5: MSD gemittelt über alle Kügelchen für jedem Zeitpunkt

2.4 Aufgabe 5

Mittels des abgeschwächten Lasers und den Koordinaten eines freien und eines gefangenen Teilchens soll nun die Verteilung der Positionen über 200 Frames ermittelt werden. Hierfür werden analog zur vorherigen Aufgabe die Partikel getrackt. Von den so ermittelten Positionen wird nun $(x(t_0), y(t_0))$ abgezogen, sodass beide Teilchen sich zu Beginn der Messung am Ursprung befinden. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 zu sehen. Hierbei sind im linken beide Datensätze übereinander dargestellt und im rechten nur der des gefangenen Teilchens zu sehen.

Außerdem wurden für beide Massen anhand eines Histogramms ermittelt, an welcher Verschiebung das jeweilige Teilchen sich wie oft befindet. Diese Histogramme sind in Abb. 8 zu sehen.

Es fällt auf, dass das freie Teilchen deutlich weiter entfernt vom Ursprung erwartet wird als das gefangene Teilchen und seine Position hierbei über eine weitaus größere Standardabweichung verfügt. Anzumerken ist jedoch auch, dass das gefangene Teilchen nicht direkt am Ursprung erwartet wird. Es ergibt sich auch für dieses eine, wenn auch sehr kleine, Verschiebung.

2.5 Aufgabe 6

In diesem Versuch soll mithilfe der Farbpigmente zweier verschiedener Permanentmarker die Absorption des Laserlichtes genauer untersucht werden. Bemalt man die Oberfläche eines Objektträgers mit rotem Marker und gibt

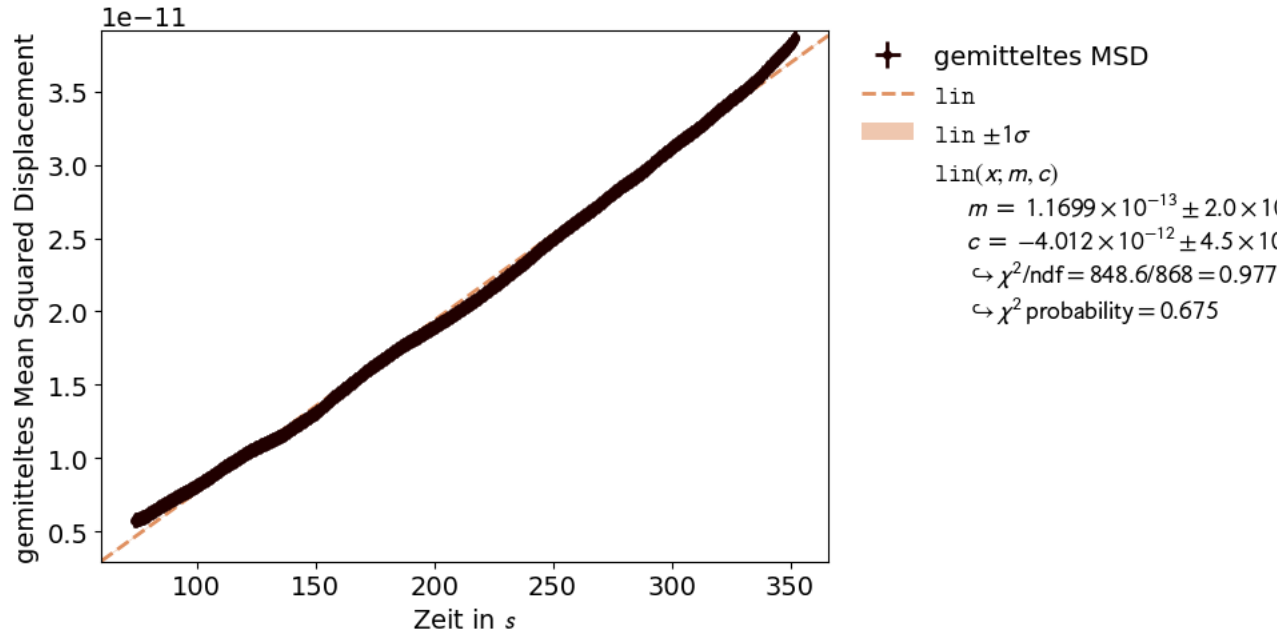


Abbildung 6: Fit durch die gemittelten MSDs

einen Tropfen destilliertes Wasser hinzu, erhält man ein einheitlich dunkles Bild von der Kamera, das sich auch bei Bestrahlung durch den Laser nicht verändert. Nimmt man nun den schwarzen Marker, so zeigt sich ein ebenfalls einheitlich dunkles Bild. An den Stellen an denen sich jedoch der Laser befindet, verschwindet die Farbe.

Dieser Effekt entsteht, da die schwarzen Farbstoffe ein breites Spektrum des sichtbaren Lichtes absorbieren. Der Laser ist somit in der Lage, diese zu zersetzen. Der rote Farbstoff absorbiert hingegen ebenfalls ein breites Spektrum an sichtbarem Licht, transmittiert jedoch Rotes. Da es sich um einen roten Laser handelt wird dieser nun nicht absorbiert und kann die Farbstoffe somit nicht zersetzen.

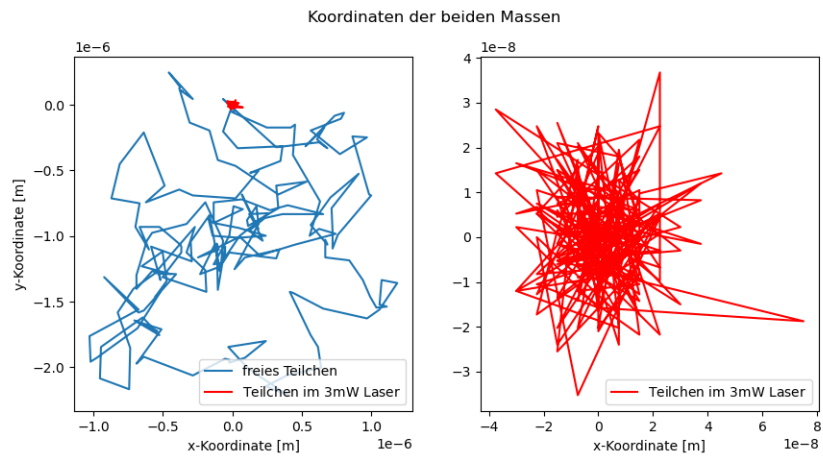


Abbildung 7: Koordinaten des gefangenen und des freien Teilchens.

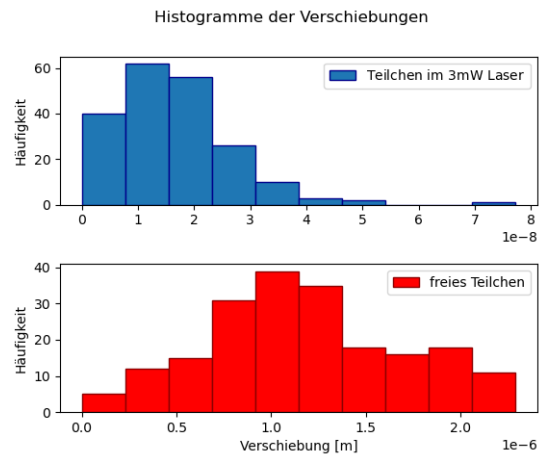


Abbildung 8: Histogramme der verschiedenen Verschiebungen.

3 Literatur

Literatur

- [1] Literatur zur optischen Pinzette
- [2] https://de.wikipedia.org/wiki/Optische_Pinzette (Letzter Zugriff am 15.11.24)
- [3] https://de.wikipedia.org/wiki/Brownsche_Bewegung (Letzter Zugriff am 15.11.24)
- [4] <https://physlets.org/tracker/> (Letzter Zugriff am 28.11.24)
- [5] https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers#Viskosit%C3%A4t (Letzter Zugriff am 01.12.24)