

Versuchsdatum: 24.10.2011

# Optische Pinzette

Iris Conradi und Melanie Hauck  
Gruppe 118

1. November 2011



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel des Versuches</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Experimenteller Aufbau</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Bestimmung der Haltekraft</b>	<b>7</b>
5.1	Bestimmung der Viskosität . . . . .	8
5.1.1	Brownsche Bewegung . . . . .	8
5.1.2	Umrechnung in SI-Einheiten . . . . .	11
5.1.3	Bemerkung zur Fehlerfortpflanzung . . . . .	12
5.1.4	Berechnung der Kraft . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit</b>	<b>13</b>

## 1 Ziel des Versuches

Die optische Pinzette bietet die Möglichkeit kleine Objekte ( $\mu\text{m}$  Bereich) zu bewegen, ohne sie zu berühren. Sie findet vielseitige Anwendungen in der Biologie, da durch die berührungsfreie Arbeitsweise Sterilität gewährleistet ist.

In diesem Versuch sollen wir die Handhabung der optischen Pinzette erlernen. Außerdem sollen wir den Einfluss des Laserstrahles auf verschiedene Materialien untersuchen und mit welcher Kraft die Objekte festgehalten werden.

Zusätzlich beobachten wir die Brownsche Bewegung<sup>1</sup> und untersuchen wie das Festhalten mit dem Laserstrahl diese beeinflusst.

## 2 Theoretische Grundlagen

Licht kann auf Objekte Kraft ausüben.

Nun muss man zwei Fälle unterscheiden. Wenn die charakteristische Größe des Objektes deutlich größer ist, als die Wellenlänge des Lichtes, dann befindet man sich im Bereich der Geometrischen Optik bzw. Strahlenoptik. Die Lichtstrahlen stellt man sich aus Photonen zusammengesetzt vor. Photonen besitzen einen Impuls. Wenn die Photonen beim Auftreffen auf das Objekt abgelenkt werden (Strahlenbild: Brechung oder Reflexion) wird nach dem Impulserhaltungssatz ein Impuls auf das Objekt übertragen.

Damit das Licht gebrochen werden kann, also auch ein Impulsübertrag stattfindet, muss das Objekt zu einem gewissen Grad für das Laserlicht durchsichtig sein. Um so weniger durchsichtig es ist, desto mehr absorbiert das Material auch das Licht. In diesem Fall kann das Material zerstört werden.

Man kann sich leicht verdeutlichen, dass bei dem Impulsübertrag das Objekt zum Focus hin bewegt wird. Das Objekt ist optisch dichter als die Umgebung, daher werden die Lichtstrahlen zum Objektmittelpunkt hin gebrochen. Wenn sich das Objekt nicht im Focus befindet, ist der Impuls der Strahlen die näher am Focus sind stärker als der der äußeren Strahlen (höhere Intensität  $\rightarrow$  mehr Photonen). Die Strahlen mit höherer Intensität werden also vom Focus weggebrochen, das Objekt erfährt somit eine Kraft zum Focus hin.

Wenn das Objekt aber eine Größe hat, die klein ist im Vergleich zur Wellenlänge des Lasers, so wirkt eine elektrische Kraft. Das Objekt befindet sich somit in einem inhomogenen elektrischen Feld. So wird ein Dipolmoment induziert. Auf diesen Dipol wirkt eine Kraft die ihn zu großer Lichtintensität bewegt.

---

<sup>1</sup>Bei der Brownschen Bewegung, handelt es sich um eine statistische Bewegung, die durch die Wärmeenergie der Teilchen bestimmt ist.

---

Im Fall der optischen Pinzette ist das Objekt im  $\mu\text{m}$  Bereich und der Laser hat eine Wellenlänge von 638 nm. Hier können beide Effekte zur qualitativen Erklärung verwendet werden. Das elektrische Feld bewirkt eine resultierende Kraft zum Focus des Lasers hin oder es geschieht ein Impulsübertrag durch die Photonen.

Schon 1933 konnte Otto Frisch<sup>2</sup> experimentell den Impulsübertrag durch Photonen auf Atome nachgewiesen. Der Impulsübertrag eines Photons ist sehr gering. Daher konnte man erst durch die Fokussierung des Lasers, wie es in der optischen Pinzette verwendet wird, ein ausreichender Impulsübertrag erreicht, um eine effektive optische Falle zu bauen. Die Fokussierung erzeugt außerdem eine Falle in allen drei Dimensionen.

### 3 Experimenteller Aufbau

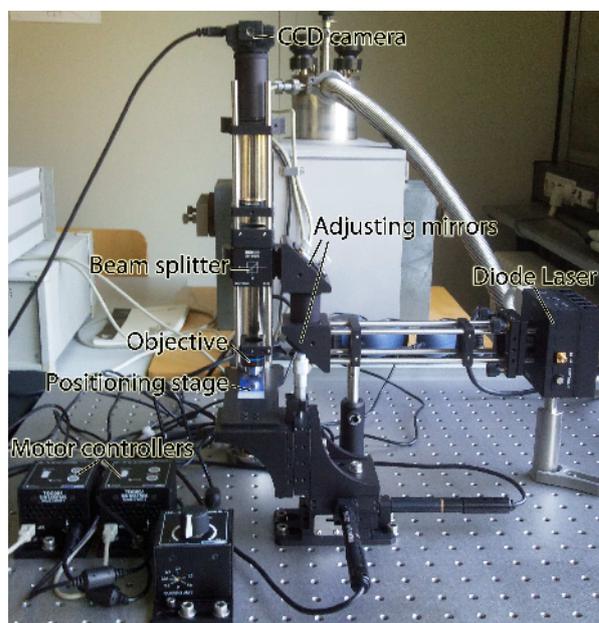


Abbildung 1: Aufbau der optischen Pinzette

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der optischen Pinzette.

Das präparierte Objekt befindet sich auf einem beweglichen Tisch. Dieser kann mit Hilfe von Motoren über Regler bewegt werden.

---

<sup>2</sup>Quelle: Tipler: Physik 1994, Springer

In der Vorbereitungshilfe sind Literaturhinweise angedeutet. Die Titel und Autoren der Werke sind jedoch nicht angegeben. Daher haben wir auch für Exercise 1a eine andere Quelle verwendet: [http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/nawi.inst.220/lehre/HauptSem\\_WS2007/Optische\\_Pinzette.pdf](http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.220/lehre/HauptSem_WS2007/Optische_Pinzette.pdf)

Das Objekt wird von unten beleuchtet. Oberhalb des Objektes befindet sich das Objektiv, dieses erfüllt aufgrund des Gesetzes des umkehrbaren Strahlenweges zwei Funktionen. Dieses dient der Focusierung des Laserstrahls. Die senkrecht über dem Positioniertisch befindliche Kamera empfängt das durch das Objektiv vergrößerte Bild des Objektes.

Der Laserstrahl wird zum Objektiv über Umlenkspiegel geführt, da die Kamera bereits oberhalb des Objektivs angebracht wurde. Bevor der Lichtstrahl das Objektiv erreicht, wird es mit Hilfe zweier Linsen, die so angeordnet sind, dass sich ihre Brennpunkte überschneiden, aufgeweitet. So kann das Objektiv optimal ausgeleuchtet werden, sodass eine möglichst starke Focusierung erreicht wird.

Um den aufgeweiteten Laserstrahl in die optische Achse des Objektivs zu leiten, wird ein Strahlteiler verwendet. So erreicht nur etwa die Hälfte des Laserlichtes das Objekt. Aber der Strahlteiler ist nötig um das Licht, welches vom Objekt ausgeht, die Kamera erreichen kann.

Um die Kamera vor dem starken Laserlicht zu schützen werden noch Bandpassfilter eingebaut.

## 4 Software

Zur Durchführung des Versuches sollte die Software „Measure Dynamics“ verwendet werden, um die Koordinaten eines ausgewählten Teilchens für die im Video aufgezeichnete Bewegung festzuhalten.

Es gestaltete sich sehr schwierig in der Software ein Teilchen auszuwählen, denn häufig wurde an der angeklickten Position von der Software kein Teilchen registriert. Das sich in der optischen Falle befindliche Teilchen konnte auch nach vielen Versuchen nicht erfasst werden.

Wenn ein Teilchen erfasst wurde, hat die Software im nächsten Frame die Stelle markiert, an der die Software das Teilchen wiedergefunden hat. Daran konnte man erkennen, dass die erfassten Koordinaten des Teilchens sehr ungenau waren, denn die Markierung befand sich immer wieder an verschiedenen Stellen des Teilchens.

Da wir für das Teilchen, das in der optischen Falle gefangen war keine Messdaten aufnehmen konnten, musste eine andere Software gefunden werden.

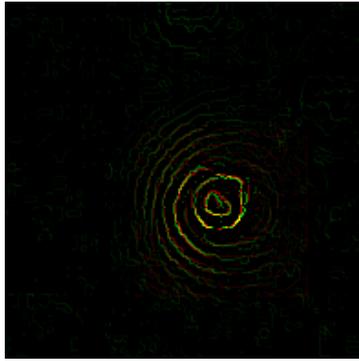
Ferdinand Schwenk und Benjamin Berg haben in Python eine Software geschrieben, die aus den von uns aufgenommenen Videos die erforderlichen Daten bestimmen kann.

Die Software berechnet zunächst ein Grauwertbild und führt anschließend eine Kantenerkennung (Canny-Algorithmus) durch. Die Verschiebung des Teilchens wird mit Hilfe von Korrelationen zwischen den Kantenbildern bestimmt.

---

Die gefundene Überlagerung wird abgespeichert. Die Kanten des aktuellen Bildes sind in grün eingefärbt, die Kanten des Referenzbildes sind rot dargestellt. In der additiven Farbdarstellung ergibt sich bei perfekter Überlagerung also gelb.

Mit Hilfe dieser Bilder kann die Funktion des Algorithmus verifiziert werden. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine solche Überlagerung. Anhand dieser Bilder kann man erkennen,



**Abbildung 2:** Überprüfung der Korrelation

dass die Teilchen sehr genau verfolgt werden. Daher haben wir uns entschieden alle Teilchen mit dieser Software auszuwerten.

## 5 Bestimmung der Haltekraft

Zu Beginn des Versuches haben wir mit Hilfe einer Spritze eine Suspension aus Wasser und Polystyrol Kugeln mit Durchmesser  $d = 3 \mu\text{m}$  auf einen Objektträger gegeben und mit einem Deckgläschen verschlossen. So kann ein Austrocknen der Probe verzögert werden. Diesen Objektträger haben wir auf den fahrbaren Tisch der optischen Pinzette plaziert. Anschließend haben wir den Focus eingestellt.

Die Haltekraft wollen wir aus dem Kräftegleichgewicht zwischen Stokesscher Reibungskraft und der maximalen Fallkraft bestimmen. Dazu wird der bewegliche Tisch mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, während das Teilchen mit der Falle am gleichen Ort gehalten wird. Dies wird für verschiedene Geschwindigkeiten durchgeführt. Es wird beobachtet, ob das Teilchen den Focus verlässt. So ermittelten wir für die Grenzwgeschwindigkeit den Wert  $v_G = 0.0115 \text{ mm/s}$ .

Die Stokesche Reibung berechnet man folgendermaßen:

$$F_{Stokes} = 6\pi\eta_{eff}r_{PS}v_G = F_{Falle} . \quad (1)$$

Der Radius der Teilchen  $r_{PS}$  und die Grenzwgeschwindigkeit  $v_G$  sind bekannt. Die effektive Viskosität der umgebenden Flüssigkeit (Wasser) muss jedoch noch bestimmt werden.

## 5.1 Bestimmung der Viskosität

Man konnte sehen, dass sich die Teilchen in der Flüssigkeit bewegten. Diese Bewegung war ungerichtet. Es handelt sich dabei um die Brownsche Bewegung.

Der Diffusionskoeffizient  $D$  gibt die Beweglichkeit der Teilchen in der Flüssigkeit an. Für den mittleren quadratischen Abstand  $\langle r^2 \rangle$  der Bewegung der Teilchen gilt:

$$\langle r^2 \rangle = \underbrace{4D}_{=m} t . \quad (2)$$

Mit Hilfe der Beobachtung der Brownschen Bewegung der Teilchen können wir also den Diffusionskoeffizienten bestimmen.

Über die thermische Energie  $k_B T$  und die Größe der Teilchen hängt der Diffusionskoeffizient von der Viskosität ab:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta_{eff} r_{PS}} . \quad (3)$$

Somit erhalten wir aus der Beobachtung der Brownschen Bewegung die Viskosität folgendermaßen:

$$\eta_{eff} = \frac{2k_b T}{3\pi m r_{PS}} \quad (4)$$

### 5.1.1 Brownsche Bewegung

Wie oben erwähnt, handelt es sich bei der Brownschen Bewegung um eine statistische Bewegung. Um also einen guten Mittelwert für den quadratischen Abstand zu finden, benötigen wir eine große Stichprobe. Außerdem bestimmen wir einen mittleren quadratischen Abstand für verschiedene Zeitdifferenzen, sodass wir den Diffusionskoeffizienten aus einer Regression erhalten.

Die Tracking-Software liefert uns die Information zu welchem Zeitpunkt (angegeben in Frames) sich das ausgewählte Teilchen an welchem Ort (x und y Koordinate in Pixeln) befindet.

Wir bestimmen den quadratischen Abstand zwischen jedem Ort und den darauffolgenden Orten. So erhalten wir zu jedem möglichen Zeitintervall die entsprechende Anzahl an quadratischen Abständen. Diese nimmt mit steigendem Zeitintervall ab.

Aus den zu einem Zeitintervall gehörigen quadratischen Abständen bestimmen wir jeweils den mittleren quadratischen Abstand und die Standardabweichung. Die Berechnung der quadratischen Abstände und das Bilden von Mittelwert und Standardabweichung haben wir in einem C++ Programm automatisiert. Das Programm ist in Listing 1 auf der nächsten Seite wiedergegeben.

Listing 1: Berechnung der mittleren quadratischen Abstände

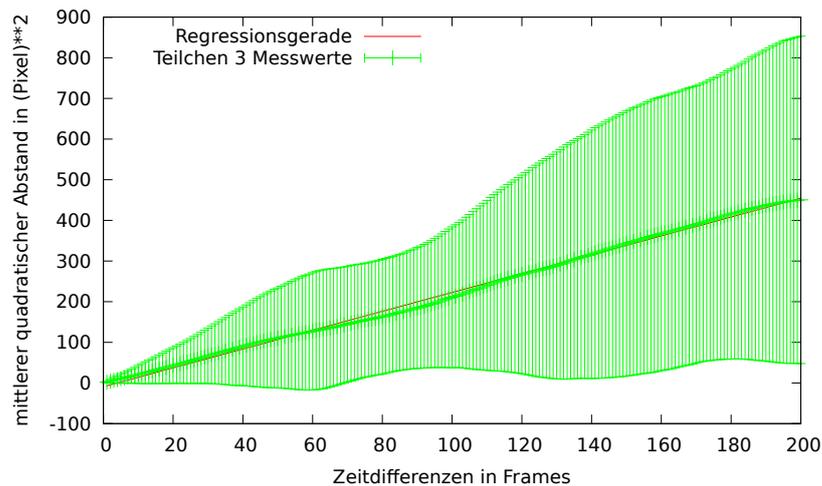
```
1 # include <iostream>
2 # include <cmath>
3 # include <fstream>
4
5 using namespace std;
6
7 float mw (long*, long);
8 float stabw (long*, float, long);
9
10 int main()
11 {
12     ifstream fin ("tollesteilchen8.csv"); // Eingabestream
13
14     long frame[760];
15     long xwert[760];
16     long ywert[760];
17     long N = 0;
18     // Einlesen
19     while( fin >> frame[N])
20     {
21         fin >> xwert[N];
22         fin >> ywert[N];
23         N++;
24     }
25     fin.close(); // Datei schliessen
26     cout << "N " << N << endl;
27     //
28     // Berechnung
29     //
30
31     // Ergebnisdatei
32     ofstream Ausgabe ("res8.dat");
33     long deltax, deltax, xquadrat, yquadrat;
34     long Ergebnis[760];
35     float mittelwert;
36     float standardabweichung;
37
38
39     for(long abstand = 1; abstand < N; abstand++)
40     {
41         long n = 0;
42         for(long i = N-1; i > abstand; i--)
43         {
44             deltax = xwert[i] - xwert[i-abstand];
45             xquadrat = deltax * deltax;
46             deltax = ywert[i] - ywert[i-abstand];
47             yquadrat = deltax * deltax;
48             n++;
49             Ergebnis[n] = xquadrat + yquadrat;
50         }
51         Ausgabe << abstand << '\t';
52         mittelwert = mw(Ergebnis, n);
53         Ausgabe << mittelwert << '\t';
54         standardabweichung = stabw(Ergebnis, mittelwert, n);
55         Ausgabe << standardabweichung << endl;
56     }
57 }
58
59 float mw (long feld[], long n)
60 {
61     float sum = 0;
62     for(long i = 1; i <= n; i++)
```

```
63     {
64         sum += feld[i];
65     }
66     return (sum/n);
67 }
68
69 float stabw (long feld[], float mw, long n)
70 {
71     float sum = 0;
72     for(long i = 1; i <= n; i++)
73     {
74         sum += (feld[i] - mw)*(feld[i] - mw);
75     }
76     return (sqrt(sum / (n-1)));
77 }
```

Die Standardabweichung wird tendenziell mit steigendem Frameabstand größer. Wir wollen nicht alle Werte für die Regression verwenden, da wir mit zunehmender Zeitdifferenz immer weniger Werte haben, über die gemittelt wurde.

Wie oben erwähnt benötigen wir aber eine große Stichprobe. Wenn die Stichprobe zu klein wird, werden wir dies an einer markanten Abweichung des linearen Zusammenhangs feststellen. Ab dieser Abweichung werden wir die Daten für die folgenden größeren Zeitabstände verwerfen.

Die Daten die unser C++ Programm geliefert hat, haben wir für jedes Teilchen unter Berücksichtigung der Standardabweichung mit einer linearen Regression ausgewertet, wobei wir die Datenmenge wie oben beschrieben reduziert haben. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Darstellung einer solchen Regression. In Tabelle 1 sind Steigung  $m$  und y-Achsenabschnitt  $b$  für die jeweiligen Teilchen aufgeführt.



**Abbildung 3:** lineare Regression von Teilchen 3

	$m$ [Pixel <sup>2</sup> /Frame]	$\sigma_m$ [Pixel <sup>2</sup> /Frame]	$b$ [Pixel <sup>2</sup> ]	$\sigma_b$ [Pixel <sup>2</sup> ]
Teilchen 1	1.13062	0.005148	19.5193	0.7453
Teilchen 2	2.01134	0.01013	30.3279	1.466
Teilchen 3	2.31914	0.00887	-9.22081	1.028
Teilchen 4	2.02874	0.009225	-16.8239	1.336
Teilchen 5	2.32977	0.02288	-32.2386	3.312

**Tabelle 1:** Ergebnisse der linearen Regression mit  $f(x) = m \cdot x + b$

Man erkennt deutlich, dass die Werte für die Steigung einander sehr ähneln und ihr Fehler sehr klein ist. Teilchen 1 fällt etwas heraus. Da die Steigung kleiner ist als die anderen Werte, könnte man denken, dass das Teilchen etwas festgeklebt war. Dies lässt sich mit Hilfe des Videos jedoch nicht bestätigen. Daher werden wir den Wert für die weiteren Rechnungen trotzdem verwenden.

Unsere Gerade sollte im Idealfall eine Ursprungsgerade darstellen. Die Existenz eines y-Achsenabschnittes der nicht Null ist und die Null auch nicht im Fehlerbereich liegt, weist im Allgemeinen auf einen systematischen Fehler hin. Im Vergleich zu den auftretenden Werten ist dieser hier sehr klein. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Stichprobengröße selbst im Bereich kleiner Zeitdifferenzen noch nicht ausreicht um zuverlässige Aussagen über statistische Prozesse zu machen. Außerdem war die Apparatur auch anfällig für kleine Erschütterungen. Dies kann zu einer Verfälschung der Bewegung führen.

Diese Rechnungen haben wir auch mit den Werten der Software „Measure Dynamics“ durchgeführt. Dabei haben wir ein etwas größere Steigung erhalten. Auffällig war, dass der y-Achsenabschnitt deutlich größer war (im Bereich von 50 bis 100 Pixel<sup>2</sup>). Dies führen wir darauf zurück, dass zusätzlich zu der Brownschen Bewegung noch die Fehler durch das falsche Erkennen des Teilchens hinzukommen.

### 5.1.2 Umrechnung in SI-Einheiten

Die Videos wurden mit einer Bildrate von  $15^{\text{Frames}}/s$  aufgenommen. Damit erfolgt die Umrechnung folgendermaßen:

$$1 \text{ Frame} \leftrightarrow \frac{1}{15} \text{ s} . \quad (5)$$

Zur Umrechnung der Längeneinheit Pixel in  $\mu\text{m}$  haben wir den Tisch mit konstanter Geschwindigkeit bewegt und dabei gemessen, welche Strecke ein festgeklebtes Teilchen in einer bestimmten Zeit zurückgelegt hat. Die Strecke in Pixeln konnten wir mit Hilfe der Software „Measure Dynamics“ bestimmen. Die Symbole mit denen man Anfangs-

und Endpunkt der Strecke markieren sollte, waren größer als die Teilchen. Daher ist die Umrechnung sehr ungenau.

$$1 \text{ Pixel} \leftrightarrow 9,8232 \cdot 10^{-2} \mu\text{m} \quad (6)$$

### 5.1.3 Bemerkung zur Fehlerfortpflanzung

Da nur einfache Gleichungen auftreten können wir folgende vereinfachte Gleichungen zur Berechnung der Fehlerfortpflanzung verwenden. Sie sind entnommen aus „Einführung zur Fehlerrechnung im Praktikum“ von Dr. Peter Blüm (August 2002).

$$a = b \pm c \quad \rightarrow \quad \sigma_a^2 = \sigma_b^2 + \sigma_c^2 \quad (7)$$

$$f = x \cdot y \text{ bzw. } f = \frac{x}{y} \quad \rightarrow \quad \frac{\sigma_f^2}{f^2} = \frac{\sigma_x^2}{x^2} + \frac{\sigma_y^2}{y^2} \quad (8)$$

### 5.1.4 Berechnung der Kraft

Zuerst müssen wir die Steigungen der Regressionen zu den verschiedenen Teilchen miteln.

$$m = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=0}^5 m_i = 1,963922 \frac{\text{Pixel}^2}{\text{Frame}} = 0,2843 \frac{(\mu\text{m})^2}{\text{s}} \quad (9)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{5} \cdot \sum_{i=0}^5 \sigma_{m_i}^2} = 0,0128 \frac{\text{Pixel}^2}{\text{Frame}} = 0,00185 \frac{(\mu\text{m})^2}{\text{s}} \quad (10)$$

$$\Rightarrow m = (0,2843 \pm 0,0019) \frac{(\mu\text{m})^2}{\text{s}} \quad (11)$$

Nun bestimmen wir die effektive Viskosität nach Gleichung (4). Für die thermische Energie haben wir bei Raumtemperatur angenommen  $k_b T = 25 \text{ meV}$ .

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{2k_b T}{3\pi m r_{PS}} = 1,9904 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{sm}} \quad (12)$$

$$\sigma_\eta = \sigma_m \cdot \frac{\eta}{m} = 0,012951952 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{sm}} \quad (13)$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{eff}} = (1,9904 \pm 0,0130) \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{sm}} \quad (14)$$

Die effektive Viskosität ist also etwa doppelt so hoch wie die Viskosität von Wasser bei Raumtemperatur<sup>3</sup>.

Jetzt ermitteln wir mit Hilfe von Gleichung (1) die Haltekraft der Pinzette.

$$F_{Falle} = 6\pi\eta_{eff}r_{PS}v_G = 0.6472 \text{ pN} \quad (15)$$

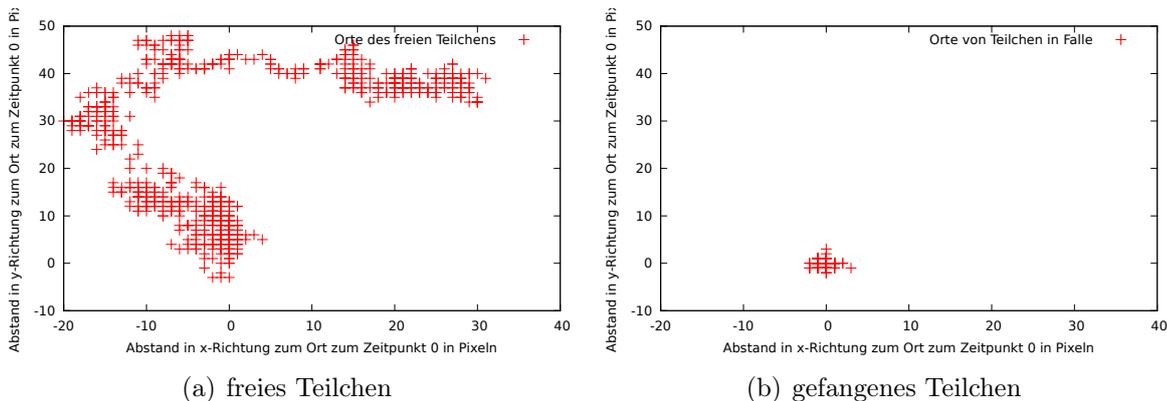
$$\sigma_F = F \cdot \frac{1}{\eta_{eff}} \cdot \sigma_{eta} = 4.2270 \text{ fN} \quad (16)$$

$$\Rightarrow F_{Falle} = (0,6472 \pm 0,0042)\text{pN} \quad (17)$$

## 6 Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit

In diesem Versuch haben wir zwei Teilchen beobachtet. Ein Teilchen war frei. Das andere Teilchen war in der optischen Falle gefangen.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Aufenthaltsorte dieser beiden Teilchen. Man kann deutlich erkennen, welches Teilchen gefangen war, denn dieses bewegt sich nahezu nicht vom Ursprung weg. Das freie Teilchen vollführt eine deutlich größere Bewegung. Nun



**Abbildung 4:** Vergleich der Bewegung der beiden Teilchen

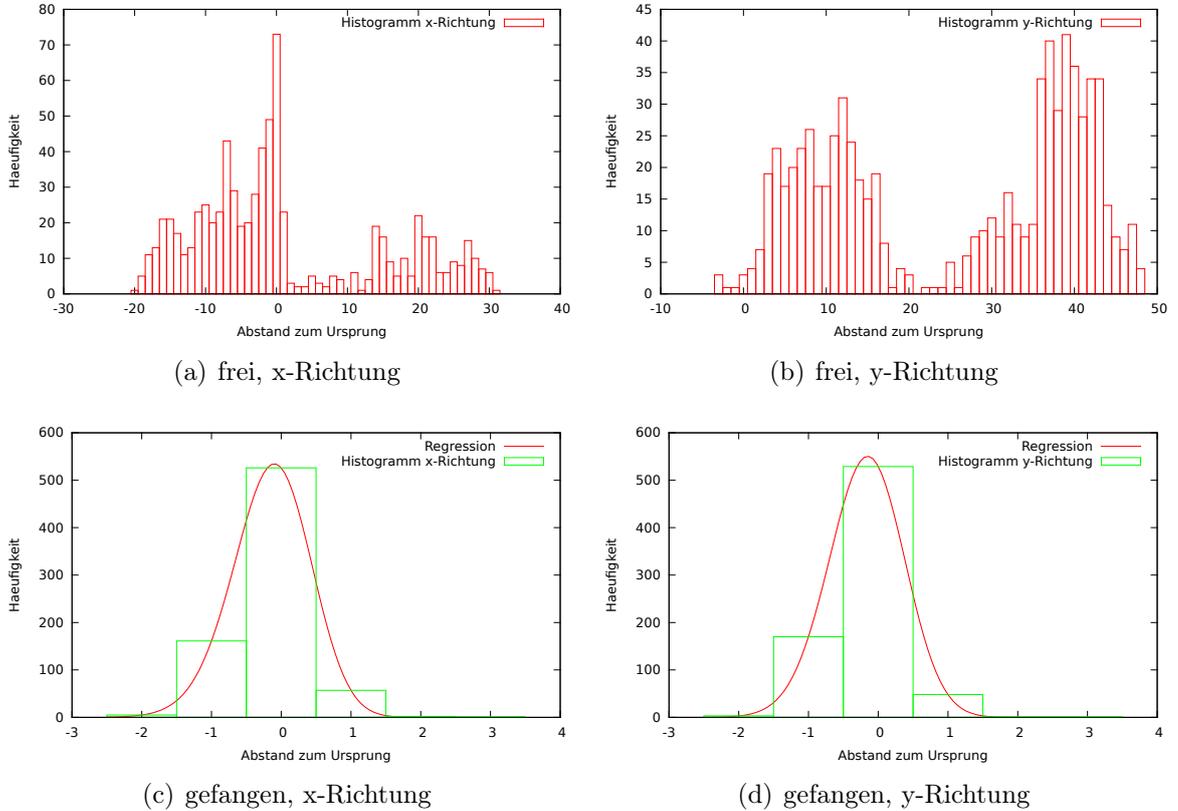
wollen wir die Funktion bestimmen, die die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen darstellt.

$$P(x) = \frac{1}{Z} e^{-\frac{U(x)}{k_B T}} \quad (18)$$

Um diese Funktion für das frei und das gefangene Teilchen in x- und in y-Richtung zu bestimmen, haben wir Histogrammtabellen erstellt. In diesen Tabellen wird geführt wie häufig der gewisse Abstand zum Ursprung vorkam.

<sup>3</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t>

Abbildung 5 zeigt die Histogramme mit denen die Aufenthaltswahrscheinlichkeit bestimmt werden soll. Wir haben Funktionen der folgenden Form versucht an das Histogramm



**Abbildung 5:** Histogramme zur Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten des gefangenen und des freien Teilchens

gramm anzupassen:

$$P(x) = ze^{ax^3+bx^2+cx} \quad (19)$$

Für das gefangene Teilchen haben sich die in Tabelle 2 auf der nächsten Seite aufgeführten Werte ergeben. Man erkennt, dass das Polynom im Wesentlichen quadratisch ist. Der Skalierungsfaktor  $z$  und der Faktor des quadratischen Terms  $b$  sind jeweils sehr genau.

Somit muss auch das Fallenpotential quadratischen Charakter haben.

Eine Anpassung an die Histogramme des freien Teilchens erscheint nicht sinnvoll. Für jeden Wert im Histogramm ist die Häufigkeit zu gering um die Aufenthaltswahrscheinlichkeit einer zufälligen Bewegung charakterisieren zu können.

Wir hätten ein wesentlich längeres Video aufnehmen müssen, um ein repräsentativeres Histogramm zu erreichen.

---

Wert	x-Richtung	y-Richtung
$z$	525.999	528.999
$\sigma_z$	1.539	0.9667
$a$ [ $k_B T/\text{Pixel}^3$ ]	-0.185435	-0.104291
$\sigma_a$ [ $k_B T/\text{Pixel}^3$ ]	0.05194	0.05423
$b$ [ $k_B T/\text{Pixel}^2$ ]	-1.70298	-1.76743
$\sigma_b$ [ $k_B T/\text{Pixel}^2$ ]	0.01463	0.01063
$c$ [ $k_B T/\text{Pixel}$ ]	-0.333672	-0.527957
$\sigma_c$ [ $k_B T/\text{Pixel}$ ]	0.0531	0.05477

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Regression

Man kann jedoch erkennen, dass das freie Teilchen am vom Ursprung entfernten Orten eine deutlich höhere Aufenthaltswahrscheinlichkeit hat, als das gefangene Teilchen. Somit zeigt sich der Charakter der optischen Pinzette als optische Falle sehr deutlich.

Es wird deutlich, dass das gefangene Teilchen immer noch eine gewisse Bewegungsfreiheit besitzt, die Brownsche Bewegung ist also nicht völlig unterdrückt. Die Fallenkraft sorgt jedoch dafür, dass das Teilchen lokalisiert ist, da die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens vom Focus her rasch abfällt.