

Transport quaderförmiger Kolloide

Bachelorarbeit aus dem Fachbereich Physik
der Universität Bayreuth
vorgelegt von

Thomas Märker

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Fischer
Lehrstuhl für Experimentalphysik X
Tag der Einreichung: 08. August 2022

Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt das Thema des *topologischen Transports quaderförmiger Kolloide*. Die quaderförmigen Kolloide wurden nach ihrer Herstellung in zwei Proben gesammelt. Sie sind in vielen Reihen angeordnet und fixiert, sodass sie für die Versuche ausgelöst werden müssen. Diese Anordnungen werden als *Arrays* bezeichnet. Zunächst werden die Größen der Arrays und der Kolloide bestimmt. Es wird gezeigt, wie die Auslösung der Teilchen aus den Arrays und der Unterlage, trotz der Adhäsionskraft, die aufgrund der Auflagefläche wirkt, gelingt. Anschließend wird die Bewegung der quaderförmigen Kolloide mit der von stabförmigen Ansammlungen kugelförmiger Kolloide, sogenannte *Bipeds*, verglichen, wobei vor allem auf die Orientierung entlang einer Magnetfeldrichtung Bezug genommen wird. Hierfür werden beide über ein magnetisches Muster platziert und einem Modulationsloop eines zusätzlichen Magnetfeldes ausgesetzt. Es konnte ein Loop gefunden werden, in dem sich die Orientierung der Quader anders verhält, als die der Bipeds. Die Ergebnisse zeigen, dass man auch bei größeren quaderförmigen und dreieckigen Kolloiden besondere Verhaltensmuster im Vergleich zu Bipeds erwarten kann.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	7
2	Untersuchung der Test- und Hauptprobe	9
2.1	Größenbestimmung der Arrays	9
2.2	Größenbestimmung eines Backsteins	11
3	Lösen der quaderförmigen Kolloide	15
3.1	Material und Werkzeug/Geräte	15
3.2	Die hydraulische Kammer	16
3.3	Lösungsverfahren mit Petrischalen	17
3.3.1	Aufbau	17
3.3.2	Durchführung	18
3.3.3	Untersuchung	19
3.4	Lösungsverfahren mit Kupferspirale	20
3.4.1	Aufbau	20
3.4.2	Durchführung	21
3.4.3	Konzentration	22
3.4.4	Untersuchung	22
4	Bewegung der quaderförmigen Kolloide im Vergleich mit Bipeds	25
4.1	Was sind Bipeds?	25
4.2	Laufbewegung	25
4.2.1	Vergleich mit den Bipeds	27
4.3	Drehung	29
4.3.1	Drehung ohne Pause	30
4.3.2	Drehung mit Pause	30
5	Herstellung weiterer Kolloide	35
5.1	Große Backsteine	35
5.1.1	Backsteine mit Krümmung	35
5.1.2	Backsteine mit Füßen	36
5.2	Dreiecke	38
5.2.1	Dreiecke mit Krümmung	38
5.2.2	Dreiecke mit Füßen	39
	Abbildungsverzeichnis	43
	Literaturverzeichnis	43

1 Motivation

In der Thematik des topologischen Transports magnetischer Kolloide wird mit kleinen kugelförmigen Teilchen geforscht, die auf einer quadratischen Fläche platziert werden. Diese Oberfläche setzt sich als Gitter aus vielen kleinen Einheitszellen zusammen, die jeweils unterschiedlich magnetisiert sind und verschiedene Muster bilden. Um einen Transport der Teilchen von Einheitszelle zu Einheitszelle zu provozieren, wird ein externes Magnetfeld erzeugt, das in Form verschiedener *Modulationsloops* verändert werden kann [1]. Diese Loops werden hierbei für gewöhnlich über in x-, y- und z-Richtung angebrachte Spulen gesteuert, sodass sich die Magnetfeldrichtung des externen Feldes zeitlich in beliebige Richtungen steuern lässt. Im Transport der Kügelchen passieren häufig Kollisionen, sodass aus ihnen längliche, starre Objekte entstehen, die *Bipeds* genannt werden. Sie verhalten sich im Magnetfeld wie Dipole, die während des Loops immer nur mit einem Ende die Oberfläche berühren. Das andere Ende richtet sich wiederum so aus, dass die Längsachse des Bipeds in die Magnetfeldrichtung zeigt. Dieses Bewegungsschema der zweipoligen Kolloide lässt sich mithilfe der verschiedenen Magnetisierungen der Einheitszellen und eines entsprechenden Loops als topologischer Transport ausnutzen [2]. Dieser unterscheidet sich je nach Muster oder Länge der Bipeds. Diese Länge ist auch schon die einzige geometrische Eigenschaft, die sich an der Kolloidenkette verändern lässt. Schnell kommt die Frage auf, wie sich denn andere Strukturen verhalten würden: Objekte, die nicht nur eindimensional sind. Daraus entstand die Idee, auch *quaderförmige Kolloide* Modulationsloops auszusetzen. In dieser Arbeit sollen diese Quader, die aufgrund ihrer Form den Spitznamen *Backsteine* erhalten haben, vorbereitet und ihr Verhalten in bestimmten Loops untersucht werden.

2 Untersuchung der Test- und Hauptprobe

2.1 Größenbestimmung der Arrays

Es existieren zwei Proben mit quaderförmigen Kolloiden: eine Test- und eine Hauptprobe. Die Steine wurden bei ihrer Herstellung durch M. Sc. Sapida Akhundzada (Experimentalphysik IV - Universität Kassel) reihenförmig fixiert. Diese Anordnungen werden als *Arrays* bezeichnet. Das Array der Testprobe hat nach [3] eine Grundfläche von $1204,85\mu\text{m} \cdot 3479,72\mu\text{m}$, wobei die in Abbildung 2.1 zu sehenden Felder wieder einzelne kleinere Arrays sind, die die Steine enthalten. Sie sind nach

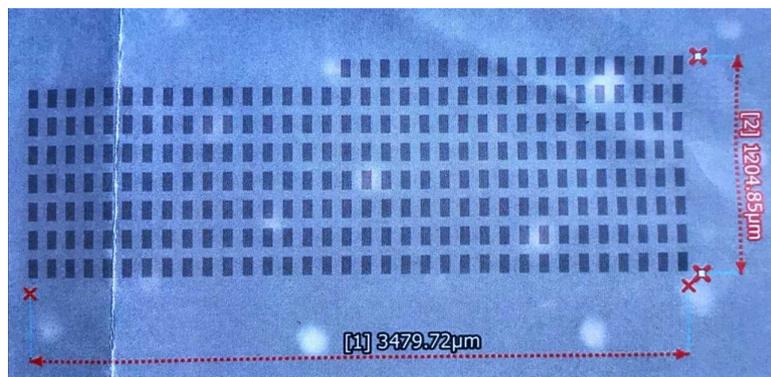


Abbildung 2.1: Anordnung der quaderförmigen Kolloide in Arrays die wiederum in einem großen Array platziert sind. Das Bild wurde bei 2,5-facher Vergrößerung aufgenommen.

einer Pixelmessung mit der Software GIMP 2.10.30 $66\text{px} \times 141\text{px}$ groß (vgl. Abbildung 2.2). Das Bild von Abbildung 2.2 wurde mit dem Mikroskop Leica DM 5000 B und einem Objektiv $10\times/0.30$, also unter 10-facher Vergrößerung, aufgenommen. Unter demselben Objektiv wurde zuvor eine Aufnahme von einer Messskala gemacht, die eine $10\mu\text{m}$ - und eine $100\mu\text{m}$ -Skala besitzt (vgl. Abbildung 2.3). Somit kann nun die entsprechende Zahl der Pixel mit der $10\mu\text{m}$ -Skala verglichen werden. Zur Pixelmessung wird wieder GIMP 2.10.30 verwendet.

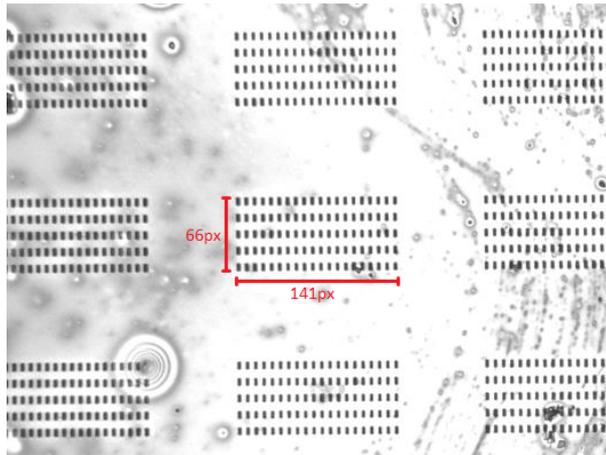


Abbildung 2.2: Größenbestimmung eines einzelnen kleinen Arrays mit der Software GIMP 2.10.30

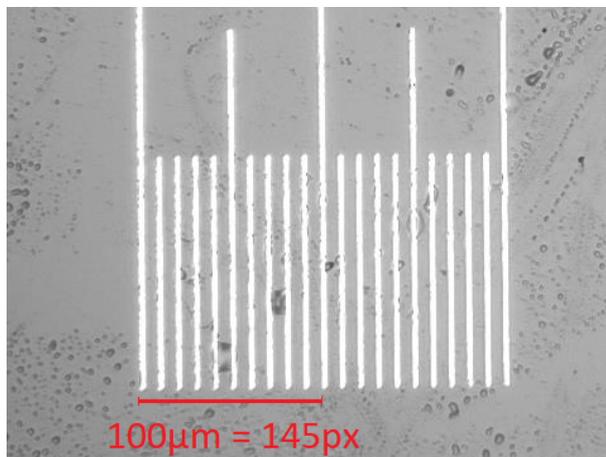


Abbildung 2.3: Hier wird der Maßstab über eine Pixelmessung bestimmt

Es sei angemerkt, dass die dargestellten Bilder zur besseren Anschauung vergrößert und geschnitten wurden. Die Pixelmessung passierte natürlich zuvor mit den Originalaufnahmen!

Zur Berechnung:

$$\begin{aligned} 100\mu m = 145px &\Rightarrow 1px = \frac{100\mu m}{145px} \cdot 1px = 0,689655\dots\mu m \approx 0,70\mu m \\ 66px &= 0,689655\dots\mu m \cdot 66 = 45,517241\dots\mu m \approx 45,50\mu m \\ 141px &= 0,689655\dots\mu m \cdot 141 = 97,241379\dots\mu m \approx 97,20\mu m \end{aligned} \tag{2.1}$$

Das bedeutet, dass ein kleines Array mit einer Grundfläche von $66px \cdot 141px$ umgerechnet ca. $45,50\mu m \cdot 97,20\mu m$ groß ist. Es gibt also zusammenfassend bei insgesamt

25.600 Steinen in der Testprobe 256 kleine Arrays mit jeweils 100 Steinen. Das Array der Hauptprobe ist hingegen deutlich größer. Hier sind es ca. 498.000 Backsteine auf einer Grundfläche von $3954,50\mu\text{m} \cdot 4274,46\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 2.4). In einem

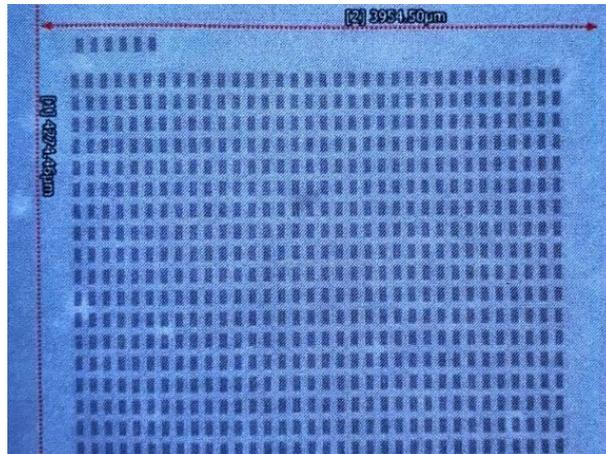


Abbildung 2.4: Das große Array der Hauptprobe bei 2,5-facher Vergrößerung

der kleinen Arrays, die dieselben Maße wie die der Testprobe besitzen, sind es auch wieder 100 Backsteine. Allerdings gibt es in der Hauptprobe hiervon 4980 Stück. Insgesamt sind also aus beiden Proben ca. 523.600 quaderförmige Kolloide vorhanden, die es zu lösen gilt.

2.2 Größenbestimmung eines Backsteins

Mit Abbildung 2.3 wurde bereits ein Maßstab für die Pixelmessung gesetzt. Dieser kann nun auch auf die Größenbestimmung der Backsteine übertragen werden. Hierfür wird die gleiche Rechnung in zwei Vergrößerungen - 10-fach und 100-fach - angewendet, um somit mehr Sicherheit in der Messung zu erhalten. Das Problem einer Messung ist, dass die Bilder, die unter den verschiedenen Objektiven aufgenommen worden sind, eine gewisse Unschärfe besitzen, sodass größere Messfehler provoziert werden können.

10-fache Vergrößerung:

Natürlich wird die Pixelmessung wieder vor der Bildbearbeitung zur besseren Darstellung gemacht. Die Maße des ausgewählten Backsteins sind also nach Abbildung 2.5 $3px \cdot 6px$. Mit der schon berechneten Umrechnung $1px = 0,689655\dots\mu\text{m}$ lässt sich somit die Größe in μm angeben: ca. $2,1\mu\text{m} \cdot 4,1\mu\text{m}$



Abbildung 2.5: Pixelmessung bei 10-facher Vergrößerung

100-fache Vergrößerung:

Hier muss noch die Umrechnungszahl bestimmt werden. Da sich die Vergrößerung um ein Zehntel unterscheidet, kann hierfür anstatt $1px \approx 0,7\mu m$ logisch die Umrechnung $1px \approx 0,07\mu m$ gefolgert werden. Um das allerdings auch über eine weitere Pixelmessung zu bestätigen, wird wieder die Messskala herangezogen. Die Abbildung 2.6 zeigt, dass für $10\mu m$ 145 Pixel gemessen werden. Bei 10-facher Vergrößerung waren es zum Vergleich 145 Pixel für $100\mu m$. Das bedeutet, dass sich die Umrechnungszahl von ca. 0,7 tatsächlich um ein Zehntel zu 0,07 ändert. Dies kann folglich für die

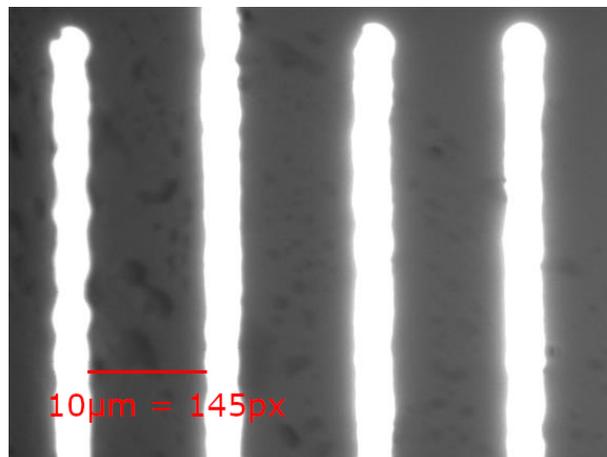


Abbildung 2.6: Pixelmessung am Maßstab bei 100-facher Vergrößerung

Messung der Backsteingröße angewendet werden: Nach Abbildung 2.7 hat ein Stein die Pixelgröße $29px \cdot 64px$, also in μm : $2,03\mu m \cdot 4,48\mu m$.

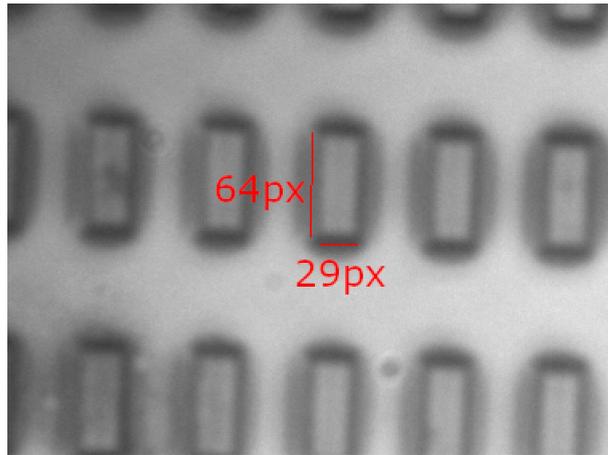


Abbildung 2.7: Pixelmessung an einem Backstein bei 100-facher Vergrößerung

⇒ Man kann sich aufgrund der Unschärfe der Bilder und der daraus resultierenden Messfehler über den Mittelwert der Messungen auf eine Nachkommastelle einigen: Die Größe der Steine wird mit $2,1\mu m \cdot 4,3\mu m$ gerundet.

Auf die Größe der Backsteine wird wieder in Kapitel 5 Bezug genommen!

3 Lösen der quaderförmigen Kolloide

3.1 Material und Werkzeug/Geräte

In der Anleitung von M. Sc. Sapida Akhundzada (Experimentalphysik IV - Universität Kassel) [3] wurden bereits einige Schritte zu Ablösung der Backsteine beschrieben. Hierfür werden folgende Gegenstände verwendet:

- Probe mit Backsteinen in einem Array
- Doppelseitiges Klebeband
- Kunststofffenster (Dicke: 2mm , Größe: $13\text{mm} \cdot 13\text{mm}$, Öffnung: $10\text{mm} \cdot 10\text{mm}$)
- Milli-Q Wasser (M.Q.W.)
- Deckglas
- Ultraschallbad
- Mikroskop Leica DM5000B mit Objektiven $100\times/0,75$ und $10\times/0,30$ → Mikroskop A
- Mikroskop Leica DM2500D mit Emissionsobjektiv $40\times/0,85$ → Mikroskop B
- Muster 3883_2
- $20 - 200\mu\text{l}$ Pipette
- $20 - 200\mu\text{l}$ Pipette
- 20ml Becherglas
- Vortexmischer
- Pinzette
- Große Petrischale:
 - Innendurchmesser 116mm
 - Tiefe 11mm

3 Lösen der quaderförmigen Kolloide

- Kleine Petrischale:
 - Innendurchmesser 37mm
 - Tiefe 5mm
- Kupferdraht mit einer Dicke von $1,0\text{mm}$
- Kombizange

3.2 Die hydraulische Kammer

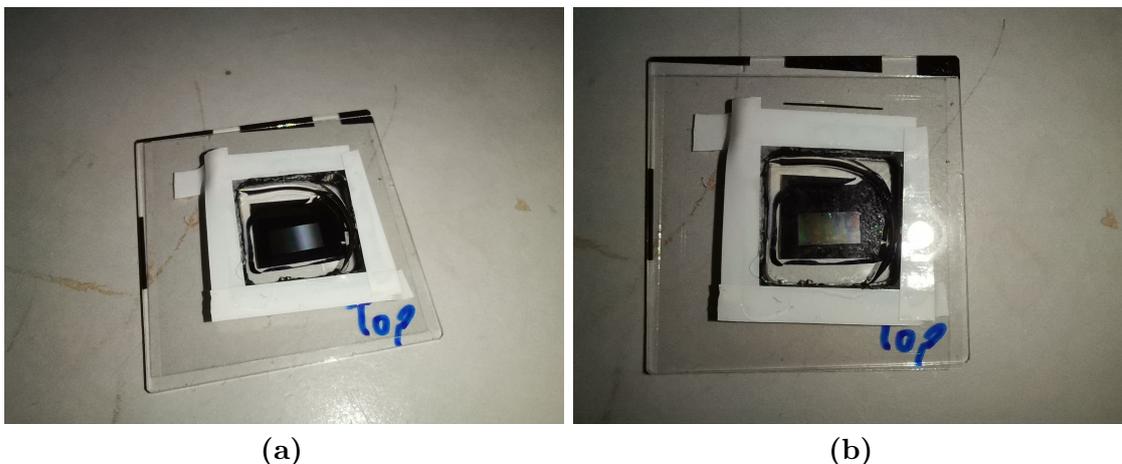


Abbildung 3.1: Die Bilder zeigen die hydraulische Kammer mit Kunststofffenstern.

Es wird ein Kunststofffenster auf das Trägerglas um das Array geklebt. Dieses wird aus einer 2mm dicken Kunststoffplatte gefräst, ist $13\text{mm} \cdot 13\text{mm}$ groß und hat eine Wandstärke von $1,5\text{mm}$. Dementsprechend hat es eine quadratische Öffnung der Größe $10\text{mm} \cdot 10\text{mm}$ und ist somit groß genug, sodass das Array der Probe umschlossen wird. Es wird mit Sekundenkleber dicht auf das Trägerglas geklebt. Um die Kammer öffnen und schließen zu können, werden doppelseitige Klebandstreifen in Form des Fensters an ein sauberes Deckglas geklebt, das als Deckel dient. Abbildung 3.1 zeigt die fertige Kammer, die nach dieser Idee gebaut wurde. In das quadratische Becken wird mit der Pipette ca. $100\mu\text{l}$ M.Q.W. gefüllt, sodass das Array vollständig mit einem Tropfen bedeckt ist. Nachdem ein Deckglas mit M.Q.W. gewaschen und anschließend getrocknet worden ist, wird dieses auf das Becken geklebt, sodass eine hydraulische Kammer entsteht. Eine erste Sichtung zeigt die Backsteine bei 100-facher Vergrößerung in ihren „Sitzplätzen“ (Abbildung 3.2).

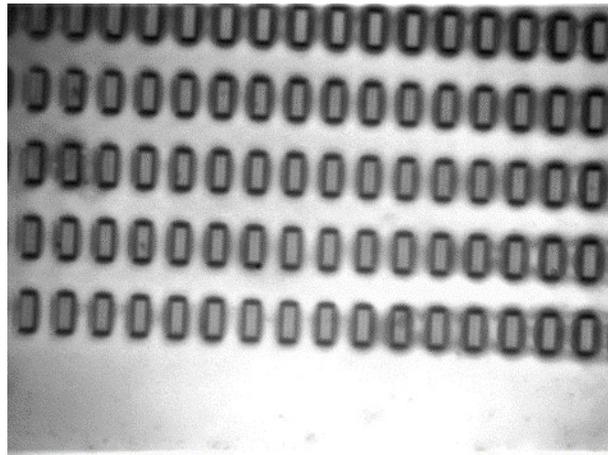


Abbildung 3.2: Ungelöste Backsteine bei 100-facher Vergrößerung

Nach einer Sichtkontrolle, um zu prüfen, ob das Wasser in der Kammer bleibt und nicht ausläuft, kann der weitere Lösungsversuch fortgesetzt werden.

3.3 Lösungsverfahren mit Petrischalen

3.3.1 Aufbau

Es wird das Ultraschallbad mit Leitungswasser befüllt und die beiden Petrischalen werden vorbereitet. Die kleinere der beiden soll der eigentliche Träger der hydraulischen Kammer sein. Allerdings sind die Ränder der Schale so niedrig, dass die Gefahr besteht im Ultraschallbad unterzutauchen, sobald das Wasser außerhalb nicht mehr in Ruhe ist. Aus diesem Grund wird die größere Petrischale als zweiter Träger genutzt. Diese wird wiederum mit Wasser befüllt, jedoch nur so tief, dass das kleine Glas schwimmen, aber nicht untertauchen kann. Gleichzeitig sind die Ränder des großen Glases so hoch, dass äußeres Wasser nicht so leicht überschwappen und das ganze Konstrukt untertauchen kann. Allein die große Petrischale als einzigen Träger zu nutzen, würde nicht funktionieren. Dies hätte nämlich zur Folge, dass das Ergebnis des Lösungsversuchs keine gelösten Backsteine zeigt, da die große Schale zu viel Masse und Trägheit besitzt und somit der Ultraschall zu sehr gedämpft wird. Um diese Dämpfung zu minimieren, wird sogar die Backsteinprobe in der hydraulischen Kammer auf einen Wassertropfen in der kleinen Petrischale gesetzt, sodass nun alles über die drei Wasserlagerungen frei beweglich ist.

3.3.2 Durchführung

Nachdem das Ultraschallbad für 15 Minuten aktiviert worden ist, sind bei der anschließenden Sichtung unter dem Mikroskop A bei 100-facher Vergrößerung einige Auslösungen zu erkennen, allerdings sind noch die meisten Steine in ihren Arrays (vgl. Abbildung 3.3). Um mehr Kolloide zu lösen wird die Probe weitere 40 Minuten mit

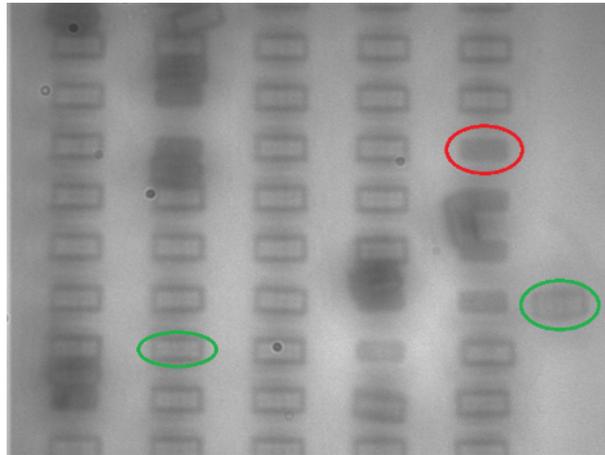


Abbildung 3.3: Die Backsteine wurden teilweise aus ihren Plätzen gelöst. Die dunkleren und kleineren Rechtecke (rote Markierung) zeigen hier leere Plätze, während die helleren und größeren Rechtecke (grüne Markierungen) Backsteine sind.



Abbildung 3.4: Es wurden die meisten Backsteine gelöst. Die Aufnahme wurde bei 100-facher Vergrößerung gemacht.

Ultraschall behandelt. Die Methode zeigt bei einer zweiten Sichtung ihren Erfolg – die meisten Backsteine wurden aus ihren Plätzen gelöst. Dies ist in Abbildung 3.4 bei 100-facher Vergrößerung und in Abbildung 3.5 bei 10-facher Vergrößerung deutlich

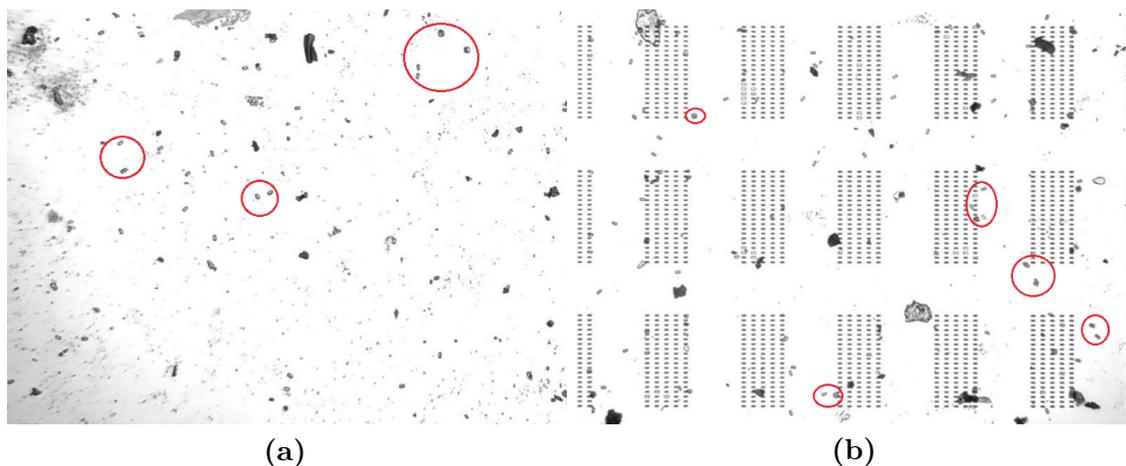


Abbildung 3.5: Die gelösten Backsteine liegen um das und auf dem Array verteilt herum. Beide Aufnahmen wurden bei 10-facher Vergrößerung gemacht.

zu sehen. Die Flüssigkeit der Kammer wird daraufhin abpipettiert und in ein Reaktionsgefäß mit 1,5 ml Fassungsvermögen gegeben.

3.3.3 Untersuchung

Nun kommt Mikroskop B zum Einsatz. Hier können Kolloide unter Einfluss eines externen Magnetfeldes, welches durch in x-, y- und z-Achse befestigte Spulen erzeugt wird, auf einem Muster betrachtet werden. Da sich die Teilchen in einem Wassertropfen befinden müssen, wird aufgrund der anderen Lichtbrechung ein Emissionsobjektiv benutzt. Dieses hat eine 40-fache Vergrößerung. Die Probe im Reaktionsgefäß aus 3.3.2 wird vorbereitet. Hierfür wird sie auf dem Vortexmischer für 30 Sekunden geschüttelt, um eine homogene Verteilung der quaderförmigen Kolloide in der Suspension sicherzustellen. Danach werden mit der Pipette $10\mu\text{l}$ entnommen und als Tropfen mittig auf das Muster pipettiert. Nach ca. fünf Minuten Wartezeit, in der die Teilchen auf die Unterlage sedimentieren können, wird der Kreuztisch des Mikroskops in z-Richtung zum Objektiv geschoben, um das Muster zu fokussieren. Hierbei taucht das Objektiv in den Wassertropfen. Auf den ersten Blick lassen sich keine Steine erkennen, darum wird das Muster abgesucht, indem der Tisch in x- und y-Richtung verschoben wird. Tatsächlich werden sogar acht Steine gefunden, einer davon ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Somit ist diese Methode erfolgreich und kann für weitere Auslösungen verwendet werden. Trotzdem können nicht alle quaderförmigen Kolloide gelöst werden, aufgrund der Adhäsionskraft zwischen den

3 Lösen der quaderförmigen Kolloide

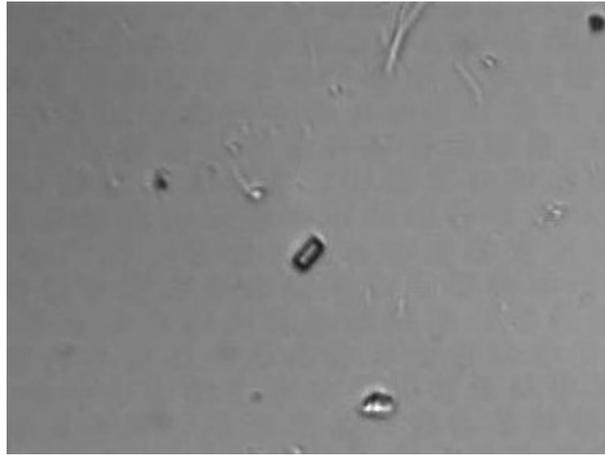


Abbildung 3.6: Hier ist ein Backstein auf dem Muster zu sehen. Die Aufnahme wurde bei 40-facher Vergrößerung gemacht.

Steinen und ihrem Trägerglas. Deshalb wird auch noch eine andere Lösungsstrategie unternommen, die im Folgenden erklärt wird.

3.4 Lösungsverfahren mit Kupferspirale

3.4.1 Aufbau

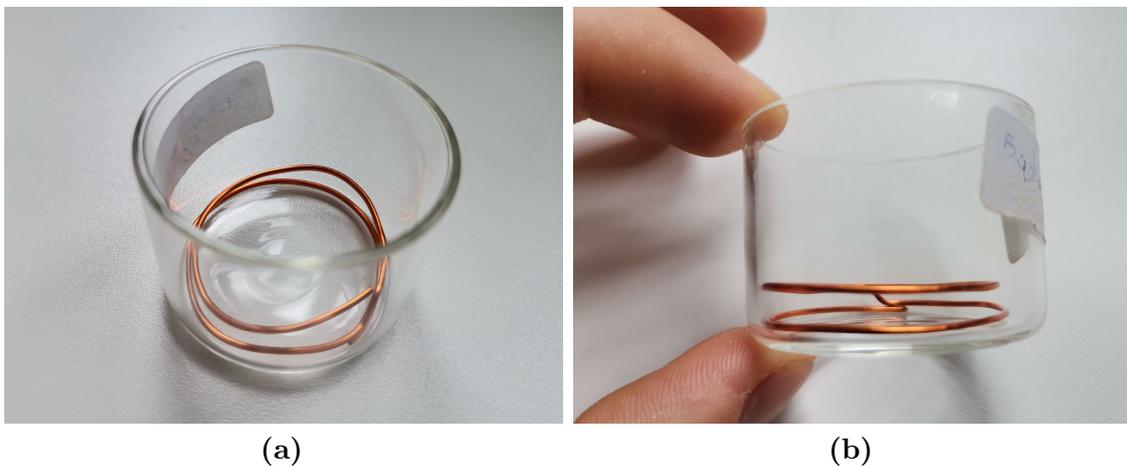


Abbildung 3.7: Die Kupferspirale wird aufgewickelt, sodass zwei parallele Teller entstehen.

Der 1,0mm dicke Kupferdraht wird mit der Kombizange auf eine Länge von 104,0mm geschnitten. Danach wird er um zwei Windungen aufgewickelt, sodass er gerade

noch in das Becherglas aus den vorherigen Aufbauten passt und außerdem zwei Kreisringe entstehen, die parallel zueinander liegen. Die *Spirale* steht somit auf dem unteren Ring, während der obere als parallel zum Boden gerichteter Träger dient. Die Höhe des Gestells beträgt 5mm . Nachdem beides mit M.Q.W. gründlich gespült wurde, wird die Spirale in das Becherglas gelegt. Der Trägerring soll so groß sein, dass das Deckglas mit dem Array auf dem Draht liegen kann, ohne das Array selbst zu berühren. Das wird ausgenutzt, indem die Probe umgedreht mit dem Array nach unten zeigend auf den Träger gesetzt wird. Es hängt also kopfüber in das Becherglas. Nun wird M.Q.W. in das Glas gefüllt, bis das Deckglas untergetaucht ist. Das Ganze wird schließlich in das Ultraschallbad gebracht. Hier kann das Glas schwimmen, ohne dass äußeres Leitungswasser ins Innere gelangen kann. Die Idee hinter diesem Aufbau ist, dass die Steine durch den Ultraschall gelöst werden und danach nicht mehr auf das Array, sondern in das Becherglas sedimentieren können. Dort benötigen sie, aufgrund der Sinkstrecke von 5mm , einige Minuten, bis sie wieder auf eine Oberfläche gelangen, an der sie sich festsetzen könnten.

3.4.2 Durchführung

Das Ultraschallbad wird für 10 Minuten eingeschaltet, anschließend wird der Aufbau aus dem Bad und die Testprobe aus dem Becherglas genommen. Im direkten Anschluss wird das Glas mit seinem Inhalt auf den Vortexmischer gestellt und 30 Sekunden geschüttelt. Danach wird die Suspension in sieben Reaktionsgefäße abpipettiert. Sie werden in einen Reaktionsgefäßhalter gestellt, in dem die möglichen Backsteine in die Spitzen ihrer Gefäße sedimentieren können. Währenddessen wird noch einmal das Array der Testprobe unter dem Mikroskop A bei 10-facher Vergrößerung betrachtet: Es sind kaum noch Backsteine zu finden! Auch ein genauerer Blick mit 100-facher Vergrößerung zeigt kaum Kolloide, was sich in Abbildung 3.8 nachvollziehen lässt. Sicherheitshalber wird auch der Boden des Becherglases unter dasselbe Mikroskop bei 10-facher Vergrößerung gelegt: Es werden hier keine Steine gefunden. Also müssen die Backsteine in der Suspension sein, die in die sieben Gefäße pipettiert wurde. Diese gilt es nun zu konzentrieren, um das Verhältnis $\frac{\text{Wassermenge}}{\text{Anzahl der Backsteine}}$ zu minimieren. Auf diese wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, in einem zukünftigen Versuchstropfen Backsteine zu finden.

3 Lösen der quaderförmigen Kolloide

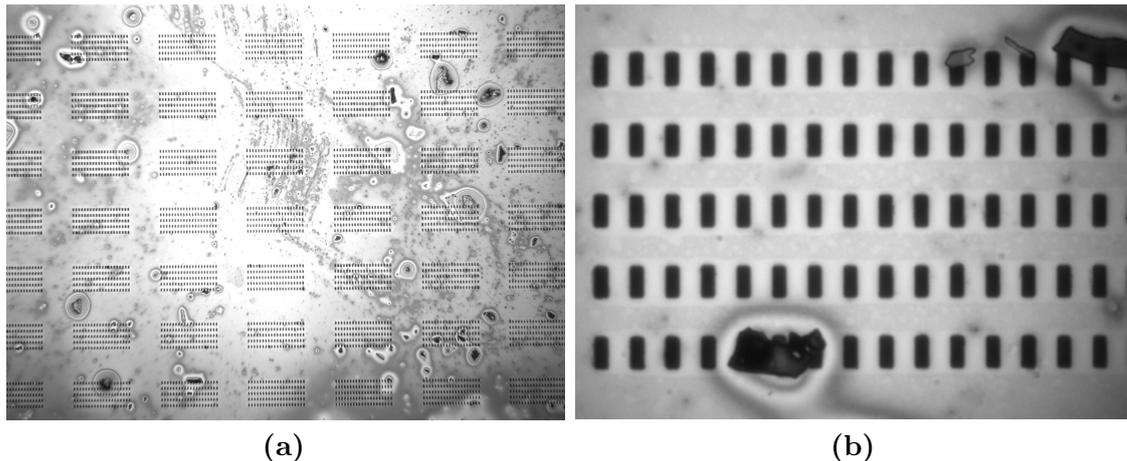


Abbildung 3.8: (a) 10-fache Vergrößerung, (b) 100-fache Vergrößerung

3.4.3 Konzentration

Die Proben werden für 15 Minuten in die Zentrifuge gesetzt, damit die Sedimentierung der Steine in die Gefäßspitzen beschleunigt wird. Das *Oberwasser* wird jeweils bis auf einen Rest von ca. 0,1ml in ein neues Gefäß gegeben. Hierbei wird mit einer Pipette sehr behutsam gearbeitet, um ein Aufwirbeln der Steine zu vermeiden. Die Pipettenspitze wird nur knapp unter die Wasseroberfläche getaucht. Die Reste werden auf dem Vortexmischer für 30 Sekunden geschüttelt und in ein neues Reaktionsgefäß gegeben. Diese Suspension wird wieder für 15 Minuten in die Zentrifuge gesetzt und anschließend auf die gleiche Weise bis auf einen Rest von 0,1ml abpipettiert.

3.4.4 Untersuchung

Die Probe wird auf dem Vortexmischer 30 Sekunden lang geschüttelt, das Muster wird mit M.Q.W. gewaschen. Es wird ein Tropfen von $10\mu\text{l}$ auf das Muster pipettiert und unter das Mikroskop B gelegt. Anschließend wird, nach einer Wartezeit von ca. 5 Minuten, das Muster fokussiert und nach Backsteinen gesucht. Nach einer nur fünfminütigen Suche sind zwei aneinander klebende Backsteine zu sehen (vgl. Abbildung 3.9)! Es werden bei einer weiteren Suche auch weitere Backsteine gefunden, wodurch der Erfolg der Lösungsstrategie mit einer Kupferspirale unterstrichen wird!

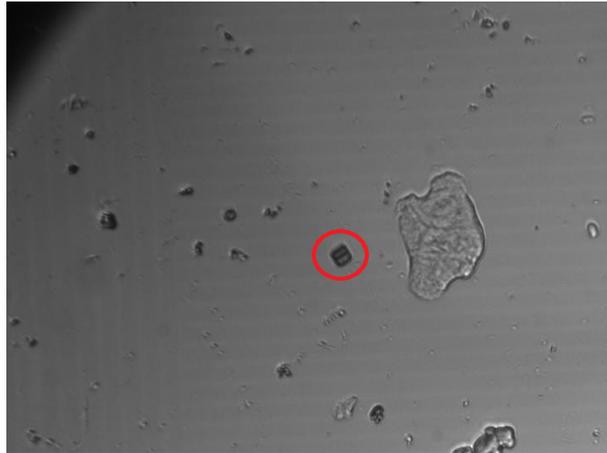


Abbildung 3.9: Es sind zwei aneinander klebende Backsteine zu sehen. Die Aufnahme wurde bei 40-facher Vergrößerung gemacht

Es wurden also zwei zuverlässige Methoden zur Auslösung der quaderförmigen Kolloide gefunden und umgesetzt. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel für Experimente mit den Teilchen benutzt.

4 Bewegung der quaderförmigen Kolloide im Vergleich mit Bipedes

4.1 Was sind Bipedes?

Ursprünglich wurde sich bisher mit runden Kolloiden beschäftigt. Diese reagieren auf den Einfluss, der sich aus den unterschiedlichen Magnetisierungen der Muster im Zusammenspiel mit dem externen Magnetfeld ergibt. In x-, y- und z-Achse um das Muster herum angebrachte Spulen erzeugen und verändern dieses äußere Feld. Das Ansteuern der Spulen geschieht wiederum über Programme, die als *Loops* bezeichnet werden [1]. *Bipedes* werden nun stangenförmige Objekte benannt, die sich aus den runden Kolloiden zusammensetzen. Die Kugeln kollidieren miteinander und bilden diese Formen aufgrund starker dipolarer Wechselwirkungen, die durch das externe Magnetfeld induziert werden. Sie haben zwei Pole und können aus unterschiedlich vielen Kugeln bestehen, sodass ihre Länge, je nach Anzahl, variiert. Sie richten sich außerdem nach der, durch den Loop vorgegebenen Magnetfeldrichtung aus. Während der topologische Transport einer einzelnen Kugel um eine Einheitszelle des Musters geschieht, indem ein Loop geschlossen wird, passiert dies bei den Bipedes auf eine ähnliche Weise. Es berührt immer nur ein Ende die Oberfläche des Musters, das andere wird durch das externe Magnetfeld angehoben. Wird der Loop so programmiert, dass hierbei ein Wechsel zwischen den beiden Enden geschieht, kann man eine Art Laufbewegung produzieren, in der die Pole, wie Füße, von Einheitszelle zu Einheitszelle spazieren [2].

4.2 Laufbewegung

Ein Backstein soll auf dem Muster zu einer Laufbewegung provoziert werden. Hierfür wird das externe Magnetfeld über einen Modulationsloop auf eine bestimmte Weise

periodisch verändert, er wird als *Laufloop* bezeichnet. Derselbe Loop sorgt auch bereits bei den Bipeds aus runden Kolloiden für eine Wanderung entlang der x-Achse¹, was später in *Video3* [4] zu sehen ist. In Abbildung 3.6 wird einer der gefundenen Backsteine der erfolgreichen Lösungsmethode aus 3.3 gezeigt. Allerdings zeigt er keinerlei Anzeichen der erwarteten Brown'schen Bewegung, die bei den meisten Fremdpartikeln um den Backstein herum deutlich zu erkennen ist. Auch, nachdem der Loop aktiviert wird, ist keine Bewegung zu sehen. Dasselbe gilt auch für die sieben anderen gefundenen Steine, sie kleben alle fest. Hierbei handelt es sich um dasselbe, aufgrund der Adhäsionskraft auftretende *Klebephänomen*, das zuvor im Lösevorgang aus Kapitel 3 überwunden wurde. Hier wird zur Lösung für das Problem eine mechanische Strategie eingesetzt, wobei eine Glasnadel benutzt wird, die sich über einen Metallarm sehr fein entlang aller Raumkoordinatenachsen verschieben lässt. Die Nadel selbst wird aus der Spitze einer Glaspipette hergestellt, die über der Flamme eines Bunsenbrenners so lange erhitzt wird, bis sie weich wird und sich mit einer Metallpinzette und einer schnellen Bewegung in die Länge ziehen lässt. Der dabei entstehende Glasfaden reißt ab einer gewissen Länge und je nach Dauer des Erhitzens und der Schnelligkeit des Ziehens ist dieser Faden an seiner Abrissstelle schließlich dicker oder dünner. Auf diese Weise kann eine sehr feine Spitze hergestellt werden, die anschließend abgeschnitten und an eine dickere Metallnadel geklebt wird, die wiederum an einem Metallarm befestigt ist. Die hier verwendete Glasnadel hat eine Spitze mit einem Durchmesser von ca. $20\mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 4.1). Sie wird zwischen zwei Spulen, diagonal über das Muster, in den Versuchstropfen geführt und solange justiert, bis sie durch das Mikroskop zu sehen und fokussiert ist. Die Öffnung zwischen den beiden Spulen ist hierfür vergrößert worden, indem die Spulenwände abgeschliffen worden sind. Der Bewegungsradius der Nadel umfasst somit beinahe das gesamte Muster. Die Spitze kann innerhalb einer Genauigkeit von nur wenigen μm bewegt werden, wodurch der Backstein präzise angesteuert werden kann. Mit einer behutsamen Berührung, wird dieser von seiner Unterlage gelöst und kann daraufhin auf den Modulationsloop reagieren. Der Laufloop ist hierbei bereits im Voraus aktiviert worden. *Video1* [4] zeigt die Starthilfe durch die Nadel, aus der Szene wurde auch Abbildung 4.1 entnommen. Jetzt kann auch das Ergebnis des

¹Das Muster liegt immer so unter dem Objektiv, dass dessen Norden noch oben zeigt. Gedanklich wird zur Orientierung ein zweidimensionales Koordinatensystem aufgespannt, dessen y-Achse von unten nach oben und die x-Achse von links nach rechts verläuft. Dementsprechend ist mit oben und unten die positive und negative y-Richtung gemeint, sowie mit rechts und links die positive und negative x-Richtung gemeint ist.

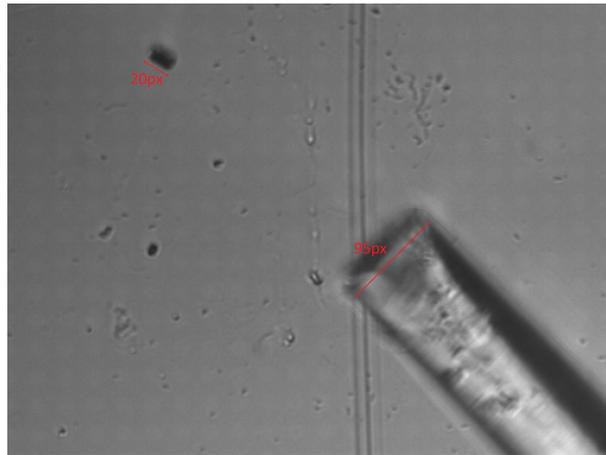


Abbildung 4.1: Hier wird der Durchmesser der Glasnadelspitze über eine Pixelmessung bestimmt: Der Backstein hat eine bereits bestimmte Länge von $4,2\mu\text{m}$ die bei 40-facher Vergrößerung mit $20px$ gemessen wird. Damit lässt sich der Durchmesser der Spitze bestimmen, der mit $95px$ gemessen wurde: $\frac{4,2\mu\text{m}}{20px} \cdot 95px \approx 20\mu\text{m}$

Lauffoops gesehen werden: *Video2* [4] zeigt hierbei eine Laufbewegung von rechts nach links. Im Folgenden wird die Bewegung mit der der Biped verglichen.

4.2.1 Vergleich mit den Biped

In *Video3* [4] ist auf einem zweizähligen Muster ein Backstein und ein Biped, bestehend aus drei runden Kolloiden, zu sehen. Die Kugeln wurden, nachdem der Backstein gefunden wurde, nachträglich über eine weitere Suspension mit einer Pipette zugeführt. Nachdem der Backstein wieder mithilfe der Glasnadel von der Oberfläche gelöst und der Loop aktiviert wurde, beginnen er und das Biped nebeneinanderher zu laufen. Betrachtet man das Biped ist die typische Laufbewegung gut zu erkennen:

1. Das Biped liegt parallel zum Untergrund und richtet sich der vorherrschenden Magnetfeldrichtung aus, sodass es entlang deren Richtung zeigt.
2. Ein Ende wird angehoben, während das andere auf einer Stelle bleibt.
3. Das angehobene Ende wird auf der gegensätzlich magnetisierten Fläche abgesetzt
4. Der Vorgang wiederholt sich mit dem anderen Ende

Somit wechseln sich die beiden Pole ständig ab - ein Schritt nach dem anderen.

Der Backstein zeigt auf dem ersten Blick dieselbe Bewegung. Auch er wechselt offensichtlich zwischen zwei Enden und läuft mit diesen abwechselnd zwischen den beiden

4 Bewegung der quaderförmigen Kolloide im Vergleich mit Bipeds

verschieden magnetisierten Flächen hin und her, parallel zum Biped. Allerdings ist hier noch nicht klar, wo genau die Enden liegen, die die Pole des Backsteins bilden. Er richtet sich, wie auch das Biped, entlang des Magnetfelds aus. Über einen Videoausschnitt soll nun mit dem Biped verglichen werden, über welche Kanten bzw. Ecken sich der Stein ausrichtet. Je nach Drehung gegenüber dem Biped, könnte man folgern, ob er sich über eine seiner Diagonalen ausrichtet oder über seine Seitenlängen. Hierfür wird ein Screenshot aus dem Video genommen. Dieser wird aufgenommen, als Biped und Backstein im Laufprozess parallel zum Untergrund liegen. So kann die eigentlich dreidimensionale Magnetfeldrichtung als zweidimensional betrachtet werden. Das ist auch die Perspektive die wir in der Draufsicht, in der wir das Geschehen durch das Objektiv sehen, haben. Abbildung 4.2 zeigt, dass sich der

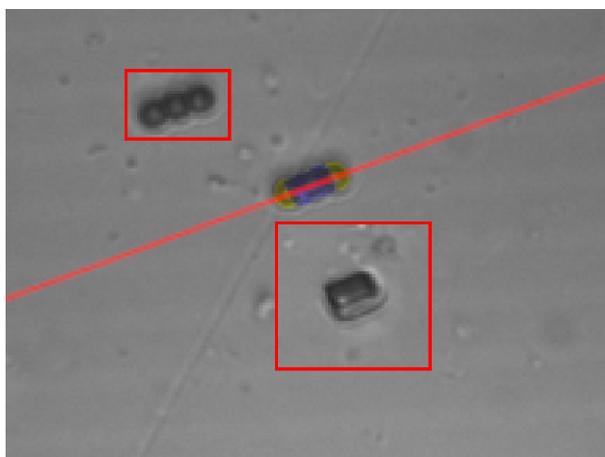


Abbildung 4.2: Das Bild wurde aus *Video3* [4] aufgenommen. Es wurde zusätzlich mit der Bildbearbeitungssoftware Gimp folgendermaßen bearbeitet: Der Backstein wird ohne Skalierung oder Drehung ausgeschnitten und unterhalb des gelb eingefärbten Bipeds gesetzt. Er wird mit einem roten Rahmen markiert. Das Biped wird kopiert und zum Vergleich oberhalb und ohne Einfärbung gesetzt. Es wird ebenfalls mit einem roten Rahmen markiert. Eine Kopie des Backsteins wird blau eingefärbt und transparent über das gelbe Biped gelegt. Das Biped zeigt entlang der externen Magnetfeldlinien, was mit der roten Gerade gekennzeichnet wird, die durch die Pole des Bipeds verläuft.

Backstein, parallel zum Biped, über seine lange Kantenlänge ausrichtet und nicht über seine Diagonalen. Wäre eine Ausrichtung über eine der Diagonalen passiert, wäre der Stein zum Biped um den Winkel

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2,1\mu m}{4,3\mu m}\right) \approx 26^\circ \quad (4.2)$$

gedreht. Abbildung 4.3 bestätigt die Rechnung mithilfe der Software ImageJ und

verdeutlicht den Winkel in einer Skizze aus GeoGebra.

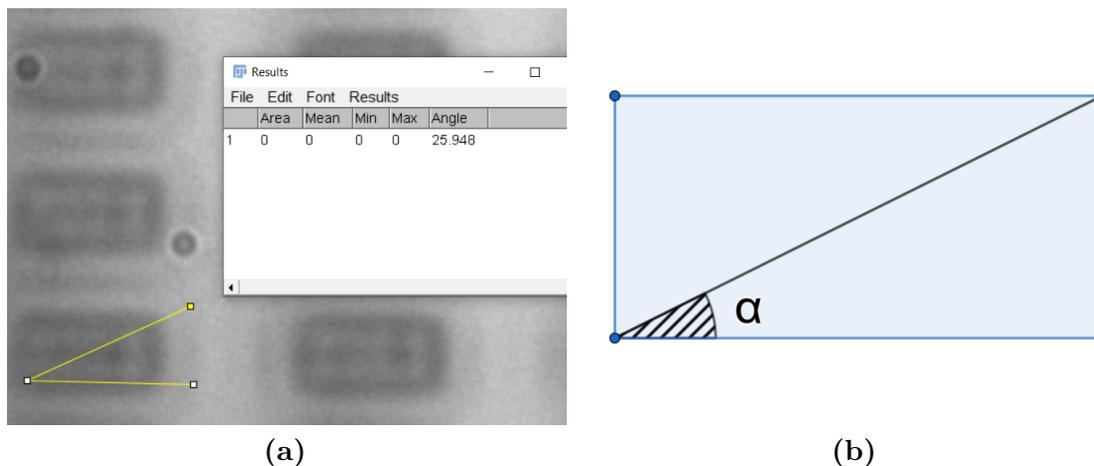


Abbildung 4.3: (a) zeigt einen Ausschnitt einer Aufnahme bei 100-facher Vergrößerung. Der Winkel der Diagonalen zur Seitenlänge des Backsteins wurde mit ImageJ gemessen. (b) zeigt eine Skizze dieses Winkels.

Der Loop wird mehrmals aus- und wieder eingeschaltet, er wird auch einmal rückwärts abgespielt, die Bewegung des Backsteins geschieht jedoch immer simultan und parallel zu der des Bipeds, ohne eine Verdrehung oder anderen Transformationen.

4.3 Drehung

Die Idee ist hier, die Ausrichtung eines Backsteins zum externen Magnetfeld unter die Lupe zu nehmen. Der Stein hat theoretisch, aufgrund seiner mehrdimensionalen geometrischen Eigenschaften, im Gegensatz zum Biped, mehr Möglichkeiten sein Dipol über die verschiedenen Kanten und Ecken auszubilden. Im Experiment aus 4.2.1 hat sich der Backstein entlang seiner Seitenlänge ausgerichtet. Betrachtet man die rechteckig ferromagnetisch beschichtete Seite, also die, die auf das Magnetfeld reagiert, könnte man allerdings auch erwarten, dass die stabilste Lage eine Ausrichtung über eine der Diagonalen wäre. Somit würde er den Zustand geringster potentieller Energie wählen, da das Drehmoment gleich 0 wäre. Dieser Fall ist allerdings nur eine Vermutung, die im Folgenden experimentell überprüft werden soll. Hierfür werden wieder runde Kolloide in die Suspension hinzugefügt, damit Bipeds zum Vergleich gebildet werden können. Der Loop, der hier zum Einsatz kommt, wird als *Fliploop* bezeichnet und beschreibt folgenden Bewegungsablauf: Es wird zweimal

in die positive und zweimal in die negative y-Richtung gedreht, wobei nach jeder Drehung wieder zurück in die Ausgangslage gesprungen wird. Grundlegend wird die Magnetfeldrichtung in jedem Schritt um das Doppelte des in Gleichung 4.2 berechneten Winkels α , also ca. 52° gedreht. Die Drehung geschieht um die z-Achse, während die Magnetfeldrichtung in der x-y-Ebene bleibt.

4.3.1 Drehung ohne Pause

Die Bewegungsabläufe geschehen direkt nacheinander. *Video4* [4] zeigt das Ergebnis des Loops an zwei- und dreifachen Bipeds im Vergleich zu einem Backstein. Es lässt sich kein bemerkenswerter Unterschied erkennen. Auch die Ausrichtung der betrachteten Objekte ist, wie zuvor, parallel zueinander. D.h. der Backstein richtet sich wieder entlang seiner Seitenlänge aus und nicht über eine seiner Diagonalen. In Abbildung 4.4 wird das verdeutlicht.

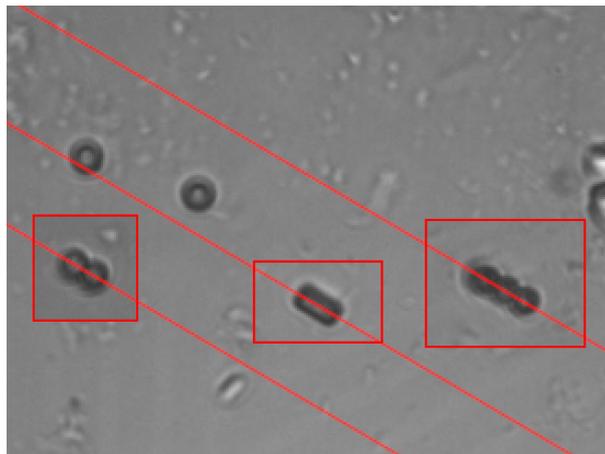


Abbildung 4.4: Der Backstein richtet sich parallel zu den Bipeds aus

4.3.2 Drehung mit Pause

Der Unterschied liegt nun darin, dass zwischen jeder Drehung eine kleine Pause eingelegt wird. Das soll bedeuten, dass das externe Magnetfeld für einen Moment abgeschaltet wird, sodass der Backstein, unabhängig von einer vorherigen Ausrichtung, erneut auf das Magnetfeld reagieren kann. Die Idee ist, den Backstein dazu zu veranlassen, sich nicht nur über die Seitenlänge zu orientieren. Zusätzlich wird auch

Biped	Backstein
52	50
-52	-50
keine Bewegung	34
-52	-80
52	47
keine Bewegung	39
-53	-90
43	44
52	53
-49	-48

Tabelle 4.1: Die Werte haben die Einheit *Grad* und geben jeweils eine Drehung um die z-Achse an. Es wird immer von der zuvor erreichten Ruhelage aus gemessen.

die Periodendauer eines Loops variiert und somit die Ablaufgeschwindigkeit, was wiederum auch die Pausenlänge beeinflusst. Einerseits wird mit dieser Variation darauf geachtet, dass der Loop nicht zu schnell abläuft und hydrodynamische Reibungskräfte einen zu großen Einfluss auf die Bewegung des Steins haben, andererseits soll dieser sich auch nicht zu langsam bewegen, um die Videodatei nicht unnötig in die Länge zu ziehen. Der erste Versuch wird mit einer Periodendauer von $8, \bar{6}s$ gemacht. Das Ein- und Ausschalten des Magnetfelds dauert jeweils $0, \bar{6}s$ und erfolgt annähernd linear. Wie in *Video5* [4] zu sehen ist, ist der Bewegungsablauf des Backsteins nicht mehr identisch zu dem, der Bipeds. Der Stein zeigt vor manchen Drehungen seltsame Ausschläge, kurz darauf springt er wieder ins gewöhnliche Bewegungsschema zurück. Eine weitere Betrachtung bei langsamerer Ablaufgeschwindigkeit von $16, \bar{6}s$ in *Video6* [4] und $106, \bar{6}s$ in *Video7* [4] zeigt das Gleiche, allerdings natürlich langsamer, was es leichter macht die Abläufe zu erkennen. Die Aus- und Einschaltzeit beträgt $3, \bar{3}s$ und $33, \bar{3}s$. Auch hier sind diese Ausschläge zu beobachten. Teilweise passieren sie, bevor an den Bipeds überhaupt eine Drehung zu erkennen ist. Um mehr Klarheit zu schaffen, werden die Ergebnisse der Messungen mit Fiji ImageJ tabellarisch aufgeführt. In dieser Messung wurde die Bewegung eines zweifachen Bipeds Schritt für Schritt mit der des Backsteins verglichen und die Winkel, um die sich beide gedreht haben, gemessen. Die Werte in Tabelle 4.1 sind in *Grad* angegeben.

Aufgrund der Messungenauigkeit können Messfehler von $\pm 5^\circ$ vernachlässigt werden. Trotzdem zeigt die Messung am Backstein deutlich zwei besondere Ereignisse. Beide sind zusätzliche Drehungen in Momenten, als sich das Biped nicht bewegt. Sobald

4 Bewegung der quaderförmigen Kolloide im Vergleich mit Bipeds

sich aber das Biped in die entgegengesetzte Richtung dreht, passt sich auch der Stein wieder an und gleicht die zusätzliche Drehung wieder aus. Im ersten Fall geschieht dies mit einer Drehung um 34° , was daraufhin mit einer Weiteren um -80° ausgeglichen wird. Effektiv hat sich der Stein also um $34^\circ + (-80^\circ) = -46^\circ$ gedreht. Im zweiten Fall sind das $39^\circ + (-90^\circ) = -51^\circ$. Abbildung 4.5 und 4.6 zeigen die beiden Fälle.

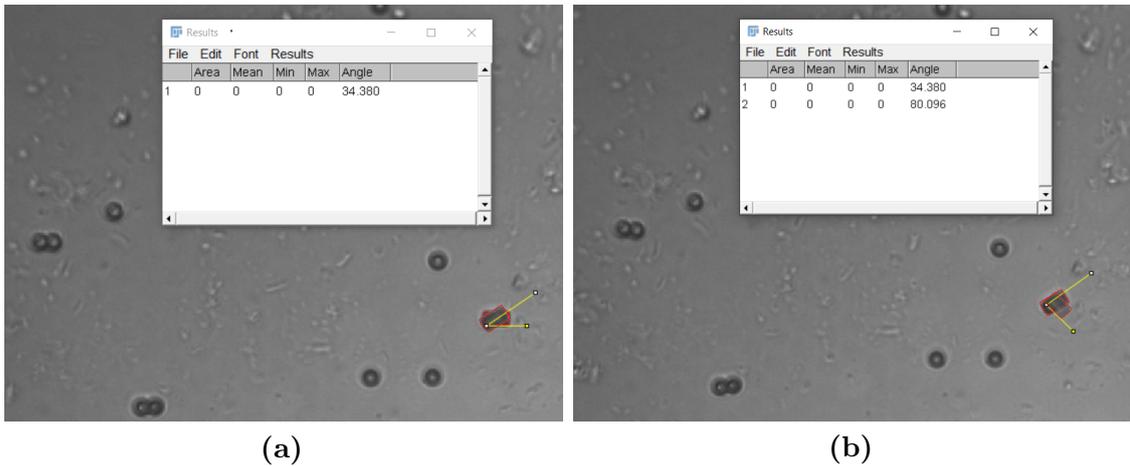


Abbildung 4.5: Die Darstellung zeigt die Überlagerung der Bilder unmittelbar vor und nach der Drehung aus dem ersten Fall. (a) stellt die zusätzliche Drehung dar. (b) stellt die ausgleichende Drehung in die Gegenrichtung dar.

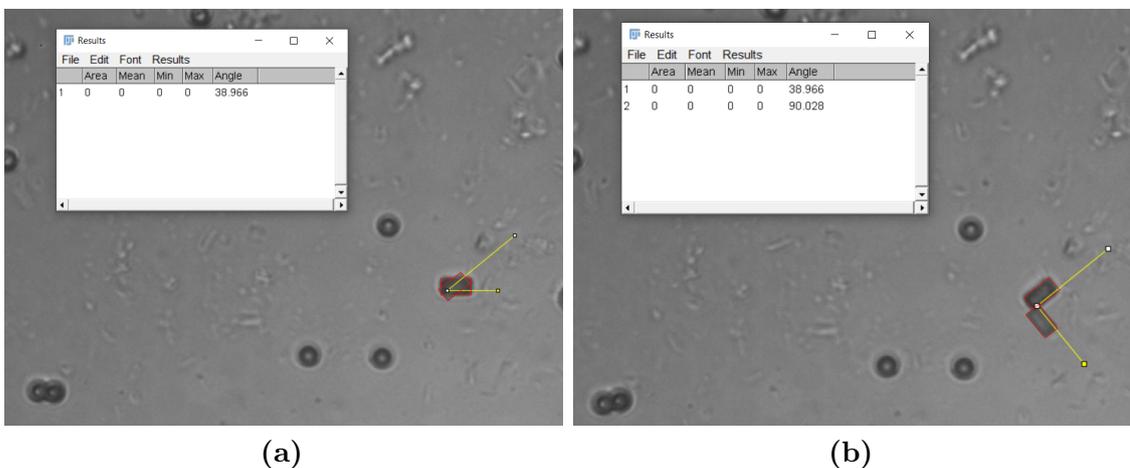


Abbildung 4.6: Die Darstellung zeigt die Überlagerung der Bilder unmittelbar vor und nach der Drehung aus dem zweiten Fall. (a) stellt die zusätzliche Drehung dar. (b) stellt die ausgleichende Drehung in die Gegenrichtung dar.

Nun stellt sich natürlich die Frage nach der Ursache: Betrachtet man hierfür die

zusätzlichen Ausschläge genauer, könnte möglicherweise ein Ausrichtungswechsel entlang einer Diagonalen die Antwort sein. Der Stein liegt eigentlich zu jedem Zeitpunkt parallel zum Biped, er richtet sich also über die Seitenlänge aus. Im Moment der zusätzlichen Drehung ist diese Seitenlänge aber nach der Messung um 34° bzw. 39° verdreht. Das ist natürlich auch im Bereich möglicher Messfehler zu viel, wenn man das mit α vergleicht. Trotzdem wäre es möglich, sollte das Muster selbst Verunreinigungen oder der Backsteins sogar Beschädigungen an der Beschichtung aufweisen, die die Drehung zusätzlich beeinflussen würden. Dann kann es sich tatsächlich bei den Extradrehungen um den Diagonalenwinkel handeln, was bedeuten würde, dass sich der Backstein einen Moment lang darüber ausrichtet, sich dann aber wieder umorientiert. Um diese Überlegung allerdings zu bestätigen, sind Versuche mit weiteren Backsteinen notwendig!

5 Herstellung weiterer Kolloide

5.1 Große Backsteine

Um weitere Versuche machen zu können, sind mehr Backsteine notwendig. Es muss also noch eine Probe mit Backsteinen in einem Array hergestellt werden. Dieses Mal sollen allerdings auch größere Backsteine dabei sein. Sie sollen eine Größe von $14\mu\text{m} \cdot 6\mu\text{m} \cdot 2\mu\text{m}$ haben. Um die stärkeren Adhäsionskräfte, aufgrund der größeren Auflagefläche, zu minimieren, werden im Folgenden zwei Lösungsansätze vorbereitet.

5.1.1 Backsteine mit Krümmung

Um die Auflagefläche zu verringern, wird versucht den Vorteil der Runden Kolloide auf die Quader zu übertragen. Die großen Auflageflächen sollen abgerundet werden, was mit einer Krümmung der Ober- und Unterseite geschieht. Abbildung 5.1 zeigt hiervon eine Skizze, die mit der Software Blender modelliert wurde. Für die Herstellung wird ein genaueres Modell erstellt [5]. Es bildet maßstabsgetreu die Größenverhältnisse ab und gibt eine Krümmung vor, deren Höhe $0,25\mu\text{m}$ darstellt. Die Stl-Datei *BacksteinKrümmung* zu diesem Modell liegt im Anhang bei. Die Herstellung selbst wird von M. Sc. Sapida Akhundzada (Experimentalphysik IV - Universität Kassel) übernommen. Bei einer Untersuchung mit Mikroskop A wurden schließlich Aufnahmen vom fertigen Array gemacht, in dem die Steine wie zu Beginn angebracht sind. Sie sind in Abbildung 5.2 zu sehen.

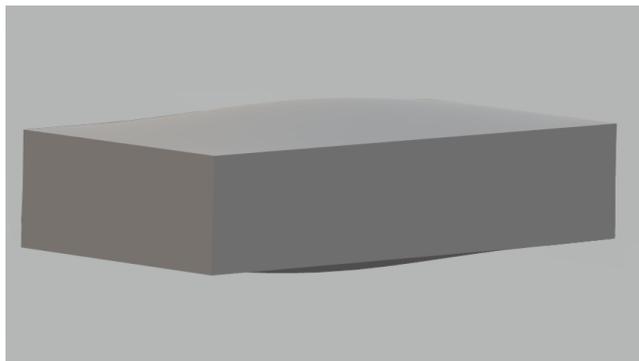


Abbildung 5.1: Es wurde mit Blender eine Skizze modelliert, die die Krümmung des Backsteins darstellt. Die Krümmung ist hier für die Darstellung wesentlich stärker ausgeprägt, als beim genauen Modell.

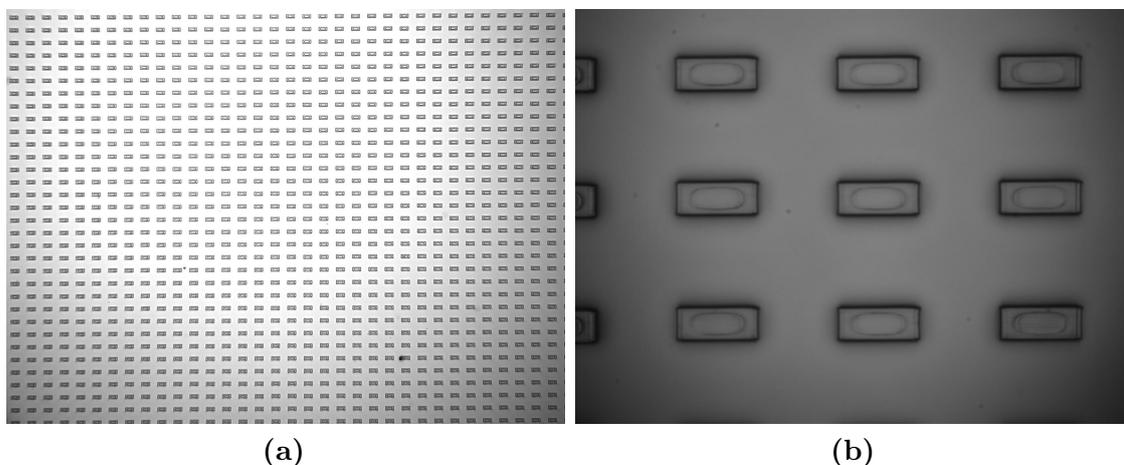


Abbildung 5.2: Beide Aufnahmen zeigen das Array, in dem sich die Backsteine mit einer Krümmung befinden. (a) wurde bei 10-facher, (b) bei 100-facher Vergrößerung aufgenommen.

5.1.2 Backsteine mit Füßen

Eine alternative Lösung, welche die Auflagefläche ebenfalls verringert, liefert die Idee, *Füße* an die großen Oberflächenseiten der Backsteine anzubringen. Der Stein wird hierbei nur auf sehr kleinen Flächen liegen, während seine quaderförmigen Eigenschaften beibehalten werden können. Abbildung 5.3 zeigt eine Skizze des Blendermodells. Bei der Herstellung in Kassel wurden auch Bilder von den fertigen Steinen aufgenommen, wie in Abbildung 5.4 zu sehen ist. Das fertige Array wird in Abbildung 5.5 unter dem Mikroskop A untersucht.

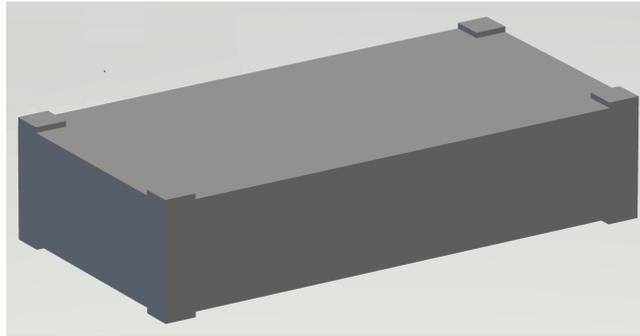


Abbildung 5.3: Es wurde mit Blender eine Skizze modelliert, die die Füße des Backsteins darstellt.

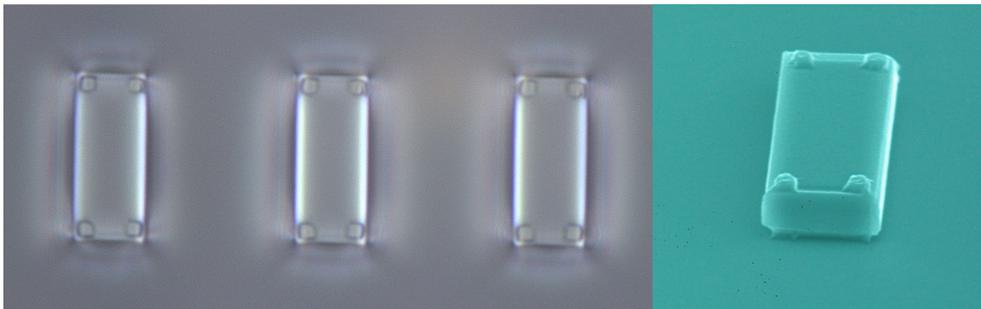


Abbildung 5.4: M. Sc. Sapida Akhundzada (Experimentalphysik IV - Universität Kassel) hat bei der Herstellung Bilder von den Steinen in Draufsicht und aus räumlicher Perspektive gemacht. Man kann die kleinen Absätze an den Ecken sehr gut erkennen. Sie dienen als Füße.

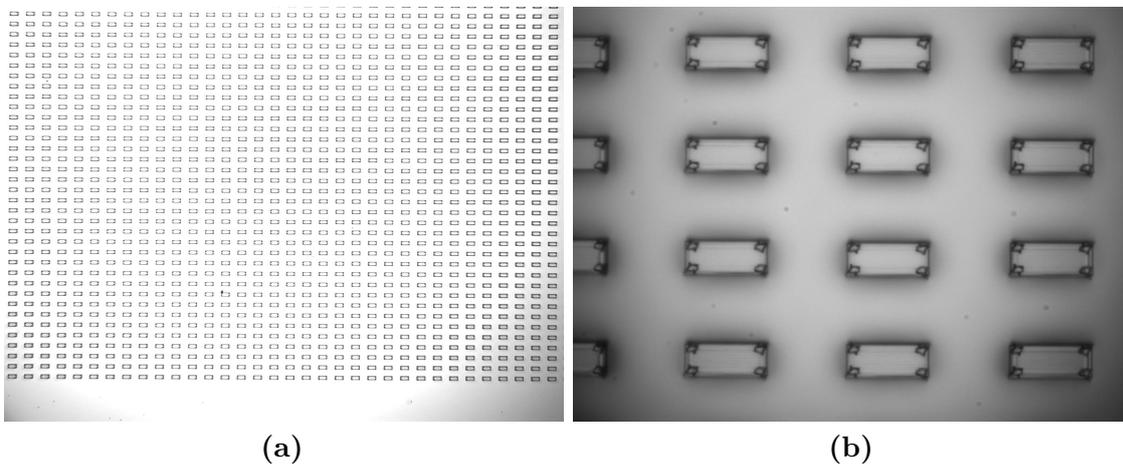


Abbildung 5.5: Beide Aufnahmen zeigen das Array, in dem sich die Backsteine mit Füßen befinden. (a) wurde bei 10-facher, (b) bei 100-facher Vergrößerung aufgenommen.

5.2 Dreiecke

Die Forschung mit quaderförmigen Kolloiden und ihr topologischer Transport ist selbstverständlich noch längst nicht abgeschlossen. Trotzdem soll auch eine Betrachtung weiterer kolloidaler Formen motiviert werden. Hierzu werden Dreiecke vorbereitet. Sie sind gleichseitig, bei einer Seitenlänge von $20\mu\text{m}$ und einer Dicke, wie bei den großen Backsteinen, von $2\mu\text{m}$. Bei so großen Seitenlängen sind die Auflageflächen nochmal deutlich größer, als die, der Backsteine. Dies würde wieder zum *Klebenbleiben* führen, was auch hier über zwei Möglichkeiten reduziert werden soll. Wie bei den großen Backsteinen, werden Dreiecke mit Krümmungen und Füßen vorbereitet. Die Herstellung wird auch hier wieder von M. Sc. Sapida Akhundzada (Experimentalphysik IV - Universität Kassel) übernommen.

5.2.1 Dreiecke mit Krümmung

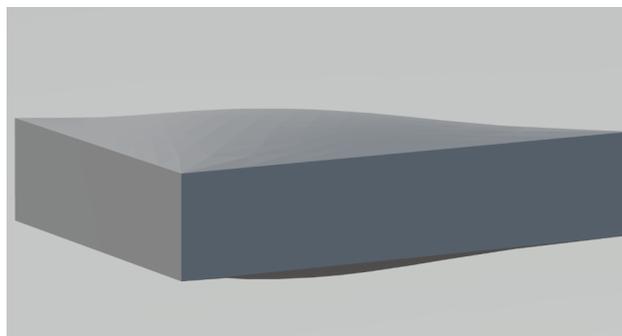


Abbildung 5.6: Es wurde mit Blender eine Skizze modelliert, die die Krümmung des Dreiecks darstellt.

Abbildung 5.6 stellt eine Skizze des Modells eines Dreiecks mit Krümmung an Unter- und Oberseite dar. Beim maßstabsgetreuen Modell für die Herstellung ist die Krümmung jeweils $0,25\mu\text{m}$ hoch. Die STL-Datei *DreieckKrümmung* liegt im Anhang bei [5]. Die Untersuchung der fertigen Arrays unter Mikroskop A zeigt Abbildung 5.7.

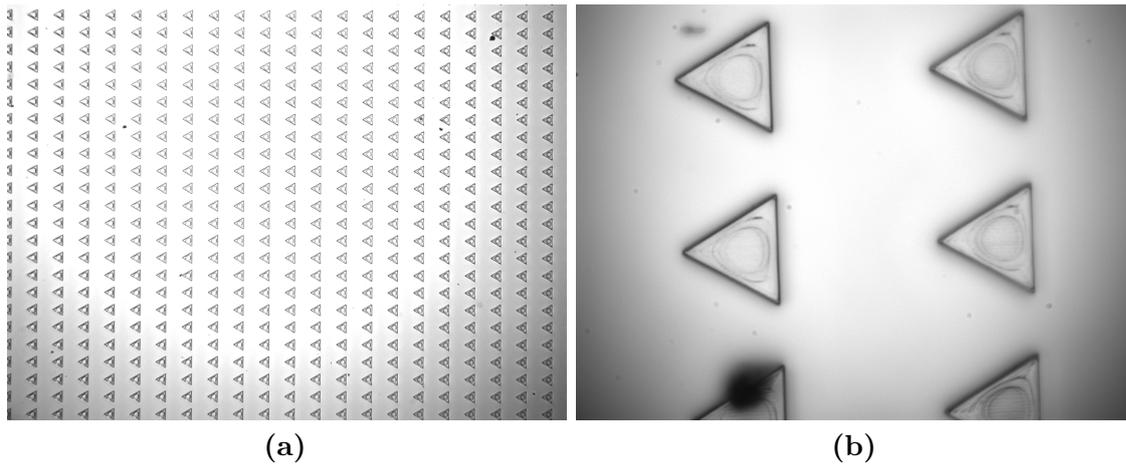


Abbildung 5.7: Beide Aufnahmen zeigen das Array, in dem sich die Dreiecke mit einer Krümmung befinden. (a) wurde bei 10-facher, (b) bei 100-facher Vergrößerung aufgenommen.

5.2.2 Dreiecke mit Füßen

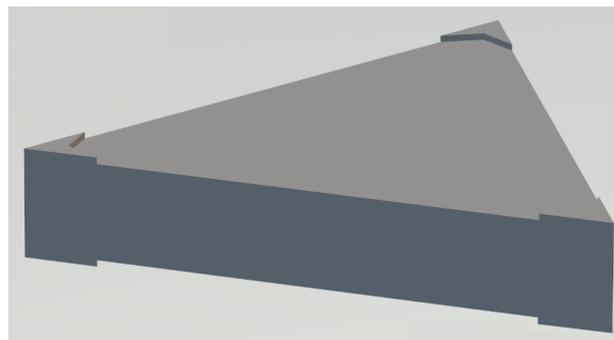


Abbildung 5.8: Es wurde mit Blender eine Skizze modelliert, die die Füße des Dreiecks darstellt.

Abbildung 5.8 stellt eine Skizze des Modells eines Dreiecks mit Füßen an Unter- und Oberseite dar. Die Untersuchung der fertigen Arrays unter dem Mikroskop A zeigt Abbildung 5.9.

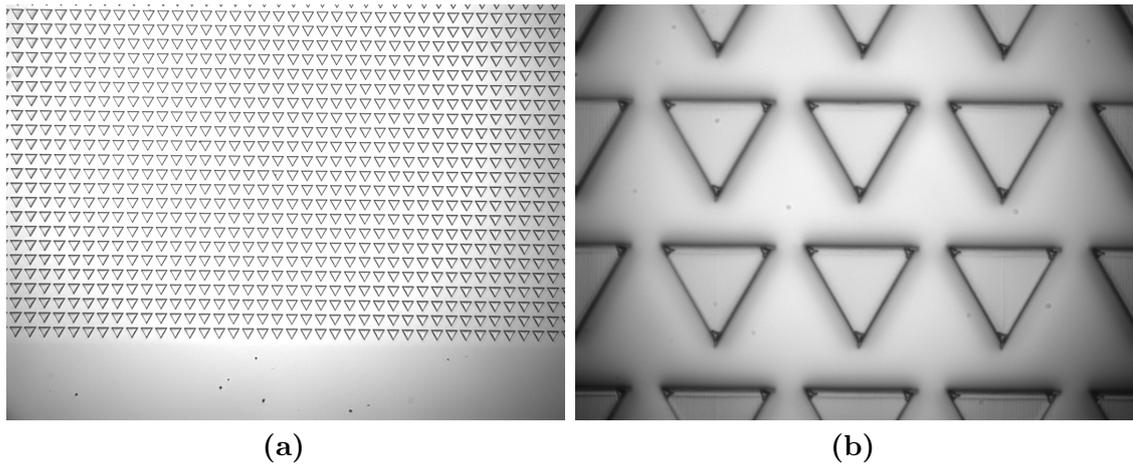


Abbildung 5.9: Beide Aufnahmen zeigen das Array, in dem sich die Dreiecke mit Füßen befinden. (a) wurde bei 10-facher, (b) bei 100-facher Vergrößerung aufgenommen.

Im Anhang liegt auch eine Sammlung der vier verschiedenen Skizzen als 3D-Modelle in Form der STL-Datei *Kolloidenskizzen* bei [5].

Mit diesem kleinen Ausblick, in dem die Fortsetzung der Betrachtung der neuen quaderförmigen und dreieckigen Kolloiden motiviert werden soll, endet diese Arbeit, aber bei Weitem nicht der Inhalt dieses Themas.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Testprobe	9
2.2	Arraygröße	10
2.3	Maßstab	10
2.4	Hauptprobe	11
2.5	Pixelmessung bei 10-facher Vergrößerung	12
2.6	Pixelmessung bei 100-facher Vergrößerung	12
2.7	Pixelmessung	13
3.1	Hydraulische Kammer	16
3.2	Ungelöste Backsteine bei 100-facher Vergrößerung	17
3.3	Einige gelöste Backsteine	18
3.4	Gelöste Backsteine bei 100-facher Vergrößerung	18
3.5	Gelöste Backsteine bei 10-facher Vergrößerung	19
3.6	Backstein auf Muster	20
3.7	Kupferspirale	20
3.8	Leeres Array	22
3.9	Backsteinpaar auf Muster	23
4.1	Glasnadelspitzze	27
4.2	Magnetfeldausrichtung	28
4.3	Backsteindiagonale	29
4.4	Backsteinausrichtung	30
4.5	Erste zusätzliche Drehung	32
4.6	Zweite zusätzliche Drehung	32
5.1	Backstein mit Krümmung als Modell	36
5.2	Backsteine mit Krümmung unter dem Mikroskop	36
5.3	Backstein mit Füßen als Modell	37
5.4	Backstein mit Füßen Aufnahme	37

Abbildungsverzeichnis

5.5	Backsteine mit Füßen unter dem Mikroskop	37
5.6	Dreieck mit Krümmung als Modell	38
5.7	Dreieck mit Krümmung unter dem Mikroskop	39
5.8	Dreieck mit Füßen	39
5.9	Dreiecke mit Füßen unter dem Mikroskop	40

Literaturverzeichnis

- [1] J. Loehr, D. de las Heras, M. Loenne, J. Bugase, A. Jarosz, M. Urbaniak, F. Stobiecki, A. Tomita, R. Huhnstock, I. Koch et al., Lattice symmetries and the topologically protected transport of colloidal particles. *Soft matter* **13**, 5044–5075 (2017).
- [2] M. Mirzaee-Kakhki, A. Ernst, D. de las Heras, M. Urbaniak, F. Stobiecki, J. Gördes, M. Reginka, A. Ehresmann and T. M. Fischer, Simultaneous polydirectional transport of colloidal bipeds. *Nature Communications* **11**, 1–6 (2020).
- [3] S. Akhundzada, Backsteine Ablösen - Anleitung.
- [4] Die Videoaufnahmen liegen der Bachelorarbeit auf einer CD-ROM bei.
- [5] Die STL-Dateien liegen der Bachelorarbeit auf einer CD-ROM bei.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Diese Arbeit wurde von mir bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht.

Bayreuth, den 08. August 2022

.....

Thomas Märker