

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Einleitung .....                                                             | 2  |
| 2 Vorversuche .....                                                            | 3  |
| 2.1 Die Idee .....                                                             | 3  |
| 2.2 Elektrostatikversuche .....                                                | 3  |
| 3 Gezielte Bewegung von Tröpfchen .....                                        | 4  |
| 3.1 Erste Versuche .....                                                       | 4  |
| 3.2 Computergesteuerte Bewegung eines Tröpfchens .....                         | 5  |
| 3.3 Probleme .....                                                             | 5  |
| 4 Bewegung von kleinen Festkörpern im elektrischen Feld .....                  | 6  |
| 5 Entwurf und Bau eine neuartigen Mikropumpe .....                             | 8  |
| 5.1 Der Pumpen - Prototyp .....                                                | 8  |
| 5.2 Die Verbesserte Pumpe .....                                                | 9  |
| 6 Tröpfchenbewegung unter dem Mikroskop .....                                  | 10 |
| 6.1 Gezielte Bewegung von Tröpfchen unter dem Mikroskop .....                  | 10 |
| 6.2 Entwurf von Ätzmasken .....                                                | 10 |
| 6.3 Bewegung von kleinen Tröpfchen unter dem Mikroskop mit Leiterplatten ..... | 13 |
| 7. Endgültige Bewegung eines Tröpfchens .....                                  | 14 |
| 8. Ausblick .....                                                              | 15 |
| 9 Links und Literatur .....                                                    | 15 |

## 1 Einleitung

Als wir dieses Jahr mit der Ideensuche begannen, wussten wir nicht, dass es uns in einen so neuen Zweig der Forschung wie die Mikrofluidik verschlagen würde. Am Anfang hatten wir ein paar Ideen, was man erfinden oder erforschen könnte. Aber wenn wir genauer darüber nachdachten und Nachforschungen im Internet anstellten, kamen wir zu dem Schluss, dass es diese Dinge schon gibt oder es nichts gibt, worüber man bei diesen Dingen noch forschen könnte. Als wir dann im Internet nach weiteren Ideen suchten, landeten wir auf einer Seite [1] von Wissenschaftlern, die in Bereich der Mikrofluidik forschen. Beim Lesen dieser Seite wurde unser Interesse für das Thema geweckt; wir suchten nach weiteren Informationen über die Mikrofluidik. Auf diesen Seiten erfuhren wir unter anderen etwas über bisherige Anwendungsbereiche der Mikrofluidik. Diese sind z.B. Minilaboratorien auf Computerchips, die in der Lage sind, einen Tropfen Blut vollständig zu analysieren. Weitere Anwendungsbereiche finden sich in der Medizin und in der Biotechnik. Ein weiterer Zweig der Mikrofluidik sind kleine Mikropumpen, die kleinste Flüssigkeitsmengen (Mikroliter und Nanoliterbereich) pumpen können.

Danach überlegten wir, mit welchen schulischen Mitteln uns der Einstieg in die Mikrofluidik gelingen könnte, denn es war offensichtlich, dass wir nicht an alle Stoffe und Materialien gelangen konnten, die die Wissenschaftler in den Forschungsinstituten benutzen. Daher versuchten wir über die Tröpfchenbewegung einen Einstieg in die Mikrofluidik zu schaffen.

## 2 Vorversuche

### 2.1 Die Idee

Nachdem wir uns Videoclips eines Forschungsinstituts [1] angesehen hatten, waren wir fasziniert von der Idee, geladene Tröpfchen über bestimmte Strecken oder auch im Kreis zu bewegen. Sofort wollten wir auch kleine Wassertröpfchen bewegen. Wir wollten ihnen eine bestimmte Ladung zuführen und sie dann im elektrischen Feld zwischen zwei Elektroden bewegen. Doch um uns zuerst einmal mit dem Aufladen von solchen Tröpfchen vertraut zu machen, führten wir einige Versuche zur Elektrostatik durch.

### 2.2 Elektrostatikversuche

Wir haben eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um uns mit den Grundlagen der Elektrostatik vertraut zu machen.

Der Aufbau für den ersten von uns durchgeführten Versuch besteht aus einem unteren Teil mit fünf Glocken und einem oberen Teil mit vier Pendeln (siehe Abb. 2.1). Die Glocke in der Mitte ist gegen die anderen isoliert. Wird eine Spannung an die mittlere Glocke angelegt, pendeln die Kugeln zwischen der inneren und den äußeren hin und her.

Die zunächst elektrisch neutralen Pendel werden zu der positiv geladenen inneren Glocke gezogen. Dann werden sie selber positiv geladen und abgestoßen bzw. von den äußeren Glocken angezogen. Dort nehmen die Pendel wieder Elektronen auf und geben ihre positive Ladung ab und werden erneut von der inneren Glocke angezogen.

Des Weiteren haben wir den „Kugeltanz“-Versuch (siehe Abb. 2.2) durchgeführt. Dieser besteht aus einer Plexiglaskammer, in deren Boden und Deckel Elektroden eingebaut sind. In der Kammer befinden sich mehrere Holundermarkkugeln, die zwischen der positiv geladenen Elektrode und der geerdeten Elektrode hin und her springen wenn eine Spannung angelegt wird. Das Springen der Kugeln kommt daher, dass sich die Elektronen in den Kugeln nach oben zur Plus-Elektrode ausrichten. Dadurch werden die Kugeln polarisiert. Da das Feld inhomogen ist, bewegen sich die Kugeln zur Plus-Elektrode hin. Dort angekommen, werden die Kugeln positiv geladen und fliegen wieder nach unten.



Abb.2.1 Der Glockentanz (Pendel zwischen zwei Glocken)



Abb.2.2 Die springenden Holundermarkkugeln in der Plexiglaskammer

Mit den gewonnenen Erfahrungen wollten wir anhand von einfachen Versuchen in die Mikrofluidik einsteigen. So einfach, wie wir es und vorgestellt haben, war es aber dann doch nicht.

### 3 Gezielte Bewegung von Tröpfchen

#### 3.1 Erste Versuche

Nach unseren neu gewonnenen Erfahrungen durch die Elektrostatikversuche haben wir versucht, mit Kaliumpermanganat gefärbtes Wasser in einem mit Rizinusöl gefüllten Kunststoffkästchen zwischen einer positiv geladenen und einer geerdeten Elektrode hin und her zu bewegen. Das Wasser mussten wir einfärben, damit wir es besser sehen konnten. Die Flüssigkeit bewegte sich zwar zwischen den Elektroden hin und her, wurde aber nach kurzer Zeit regelrecht zerfetzt, so dass wir sie nur noch unter einem Mikroskop sehen konnten (vgl. Abb. 3.3). Die Tröpfchen bewegen sich zwischen den Elektroden hin und her, weil sie geladen werden. Danach haben wir aus einer Platine jede zweite Leiterbahn mit einem Messer herausgetrennt (siehe Abb. 3.4) und versucht, die Flüssigkeiten zwischen einer geerdeten und einer positiv geladenen Leiterbahn zu bewegen. Dies ist uns auch gelungen, aber nach ein paar Sekunden hatten sich die Tröpfchen so weit zerteilt, dass wir sie nicht mehr sehen konnten.

Dann haben wir versucht, das Wasser über mehrere Leiterbahnen zu bewegen, indem wir abwechselnd eine Elektrode positiv geladen und eine geerdet haben. Dieser Versuch ist aber fehlgeschlagen, da es uns nicht gelungen ist, die Elektroden schnell genug aus- und einzuschalten.

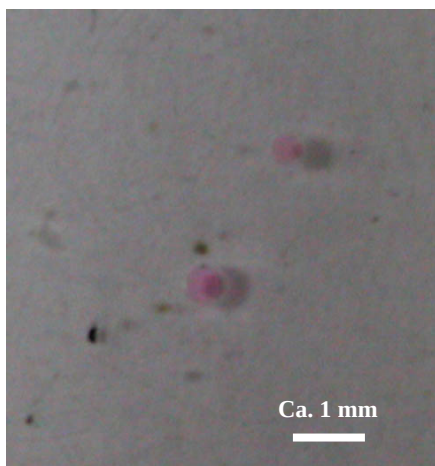


Abb. 3.1 Die pink gefärbten Wassertröpfchen in Silikonöl ohne Mikroskop vor dem Versuch, sie zu bewegen

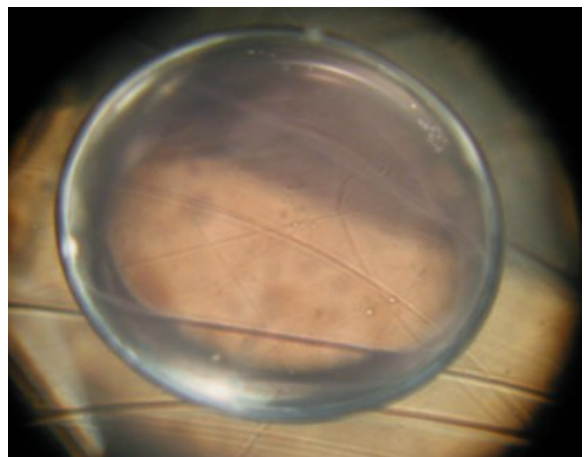


Abb. 3.2 Das Wassertröpfchen aus Abb. 3.1 unter dem Mikroskop (60fach vergrößert)

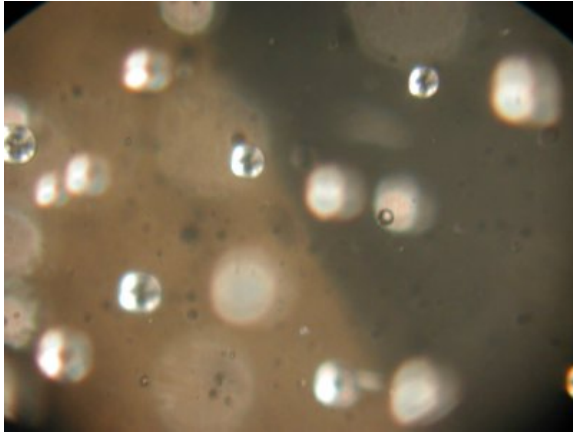


Abb. 3.3 Das Wassertröpfchen nach der Bewegung zwischen den beiden Elektroden. Es ist in viele noch kleinere Tröpfchen zerfetzt worden (Mikroskopansicht, 60fach vergrößert).

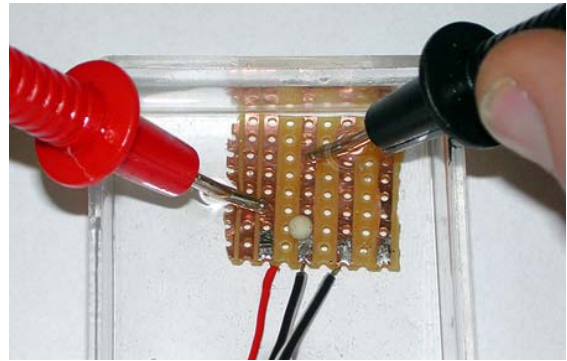


Abb. 3.4 Bewegung einer Zeolithkugel zwischen zwei Leiterbahnen.

Die Tröpfchen wanderten nicht über die gesamten Leiterbahnen, so wie wir es uns erhofften. Dadurch kamen wir dann auch schon zu unserem ersten großen Problem: Wie bewegen wir die Tröpfchen über mehrere Leiterbahnen, ohne dass sie zerfetzt werden?

Für uns war es trotzdem schon ein kleines Erfolgserlebnis, flüssige Tröpfchen zwischen zwei Elektroden hin und her bewegen, auch wenn das noch nicht so ganz funktionierte. Wir waren dennoch motiviert, unsere Versuche fortzusetzen und in immer kleinere Bereiche vorzudringen.

### **3.2 Computergesteuerte Bewegung eines Tröpfchens**

Die Tröpfchenbewegung könnte man eventuell automatisieren, indem man die Relais mit einem Chip ansteuert, auf dem ein Programm zur richtigen Schaltung der Elektroden gespeichert ist. Des Weiteren wollen wir die Elektroden über eine Relaisplatte ansteuern. Dabei bekommt jede Elektrode ein eigenes Relais, welches von einem Computerchip gesteuert wird. Den Chip kann man so programmieren, dass ein Tröpfchen beispielsweise drei Mal über eine bestimmte Strecke hin und zurück läuft. In der heutigen Forschung werden die Tröpfchen computergesteuert in verschiedene Richtungen bewegt. Unser Ziel ist es, solch eine computergesteuerte Tröpfchenbewegung mit einfachen und preiswerten Mitteln zu erreichen.

Eine Möglichkeit zur Computeransteuerung wäre die Verwendung eines C-Control Chips unter Verwendung der Programmiersprache C-Basic. Das System ist ein einfach zu bedienender Chip, der verschiedene digitale sowie analoge Ein- und Ausgänge besitzt. In einem Editor-Programm kann man das gewünschte Programm erstellen und anschließend über einen COM-Port vom PC auf den Chip aufspielen.

### **3.3 Probleme**

Unser größtes Problem war die Bewegung ganz kleiner Wassertröpfchen (Ca. 0,5 mm), da sie nach einigen Bewegungen so zerfetzt werden, dass man sie nur noch unter dem Mikroskop deutlich erkennen kann. Eine Überlegung zur Behebung dieses Problems war, die gesamte Apparatur so klein zu bauen, dass man nur sehr wenig Spannung benötigt und die Tröpfchen so bei der Bewegung nicht zerfetzt werden. Jedoch ist es nicht einfach, mit unseren groben Werkzeugen sehr kleine und komplexe Apparaturen zu bauen. Wir werden aber alles versuchen, um eine Apparatur zu bauen, die so klein wie möglich ist.

## 4 Bewegung von kleinen Festkörpern im elektrischen Feld

Nach den nur teilweise erfolgreichen Versuchen mit Tröpfchen haben wir versucht, kleine Festkörper zu bewegen. Wir nahmen einen Leiter (Bleikugeln) und einen Isolator (Zeolithkugeln). Zuerst versuchten wir, die Kugeln in einem mit Rizinusöl gefüllten Behälter von einer Elektrode zur anderen zu bewegen. Wir fanden heraus, dass die Geschwindigkeit der Bewegung von der angelegten Spannung und dem Abstand der Elektroden abhängt. Danach versuchten wir, die Kugeln auf einer Platine zwischen zwei Leiterbahnen hin und her zu bewegen, was aber nicht funktionierte, weil der Abstand zwischen den Leiterbahnen so klein war, dass bei der hohen Spannung ein Funke übersprang.

Dann kamen wir auf die Idee, den Abstand zu vergrößern, indem wir eine Leiterbahn aus der Platine heraustrennten und die Kugeln dann von der ersten zur übernächsten Leiterbahn zu bewegten. Diesmal hatten wir Erfolg: Die Bleikugeln sowie die Zeolithkugeln bewegten sich mit einer hohen Geschwindigkeit zwischen den Leiterbahnen hin und her. Dann wollten wir die Kugeln über mehrere Leiterbahnen bewegen, indem wir erst jede zweite Leiterbahn heraustrennten, damit kein Funke zwischen den Elektroden überspringt. Um die Kugeln dann zu bewegen, haben wir abwechselnd eine mit dem Pluspol des Bandgenerators verbundene Elektrode und mit einer geerdeten Elektrode die verschiedenen Leiterbahnen immer abwechselnd positiv geladen und geerdet. Aber die Kugeln bewegten sich immer nur zwischen zwei Leiterbahnen. Wir wollten die Kugeln zwingen, sich über die gesamte Platine zu bewegen, indem wir die Leiterbahn, die die Kugel gerade verlassen hatte, ausschalten. Das funktionierte aber nicht, weil die Kugeln zu schnell waren: Die Kugel war schon auf die Leiterbahn zurückgekommen, bevor wir diese vom Bandgenerator trennen konnten.

Dann haben wir im Internet nach Möglichkeiten gesucht, kleine Tröpfchen über größere Strecken zu bewegen. Auf der Seite eines Forschungsinstituts fanden wir eine Anleitung zum Bau einer Tröpfchenkammer [1] (Abb. 4.1). Diese Kammer war jedoch für den Mikrometerbereich gebaut, so dass wir sie entsprechend ändern mussten. Auch standen uns nicht alle Materialien zur Verfügung, weshalb wir andere verwenden mussten.

Unsere Kammer (Abb. 4.2) besteht aus zwei Plexiglasplatten im Abstand von etwas mehr als dem Kugeldurchmesser. Auf der oberen ist als geerdete Elektrode ein Streifen Alufolie aufgeklebt. Auf die untere Plexiglasplatte sind in kleinem Abstand mehrere kleine Streifen Alufolie aufgeklebt, die aber nicht mit dem Pluspol des Bandgenerators verbunden sind. Dann wird eine Kugel zwischen die Platten gelegt und die Kammer in einen mit Rizinusöl (später Silikonöl) gefüllten Plexiglasbehälter gelegt (Abb. 4.3, 4.4). Die Elektroden werden nacheinander mit einem im 90°-Winkel gebogenem Kupferdraht angesteuert, der mit dem Bandgenerator verbunden ist. Wie erhofft bewegte sich die Kugel von einer Elektrode zur nächsten, wobei sie sich aber immer zwischen der geerdeten Elektrode und der positiven Elektrode, auf der sie sich gerade befand, hin- und herbewegte.

Nach einigen erfolgreichen Versuchen tauchten aber erneut Probleme auf: Die Alufolie löste sich vom Plexiglas und das Hantieren mit dem Kupferdraht erschwerte das Filmen einer Tröpfchenbewegung erheblich, da der Draht immer im Bild war. Also bauten wir eine neue Kammer, diesmal mit Kupferelektroden, welche mit einem besseren Kleber befestigt waren, und einer Außenansteuerung der Elektroden. Hierzu probierten wir verschiedene Möglichkeiten aus: Zuerst benutzten wir Schalter aus den Elektro-Experimentierkästen unserer Schule, aber obwohl die Gehäuse der Schalter ziemlich groß sind, ist im Innern alles sehr klein, so dass ein Funke übersprang und die Elektroden immer positiv geladen waren. Eine weitere Idee war, Kabel durch Löcher von unten an die Kupferelektroden zulöten. Die Enden der Kabel waren auf eine Platine gelötet, auf der wir alle Leiterbahnen entfernt hatten, so dass nur noch die Stellen übrig waren, an die die Kabel angelötet waren (siehe Abb. 4.5). Dann wurden die Elektroden nicht wie vorher mit dem Draht in der Kammer sondern auf der

Steuerungsplatine angesteuert. Aber obwohl kein Funke übersprang, bewegten sich die Kugeln aus bisher ungeklärten Gründen nicht richtig.

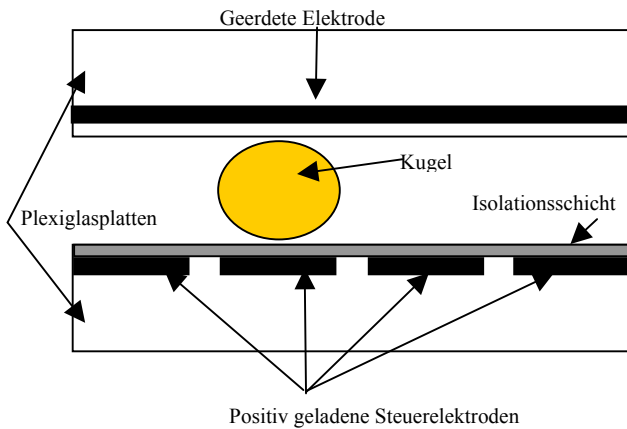


Abb. 4.1 Schematische Darstellung der Tröpfchenkammer nach [1]. Sie wird in einen mit Öl gefüllten Kunststoffbehälter gelegt.

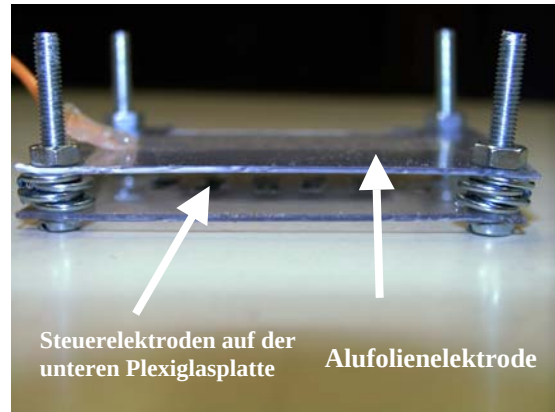


Abb. 4.2 Die erste Tröpfchenkammer

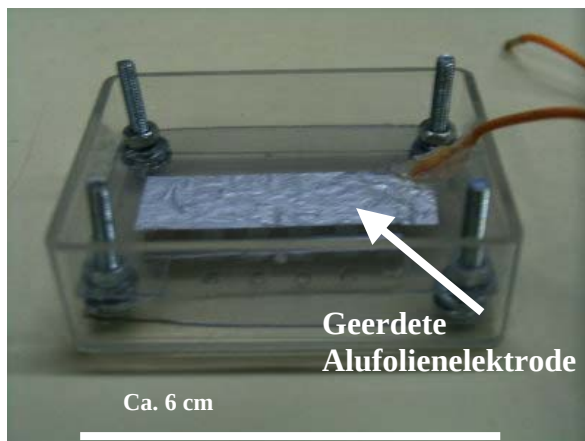


Abb. 4.3 Die Apparatur im Kunststoffbehälter, in den das Öl gefüllt wird (seitliche Draufsicht)



Abb. 4.4 Seitenansicht der Apparatur mit einer Zeolithkugel in einem mit Öl gefüllten Kunststoffbehälter.

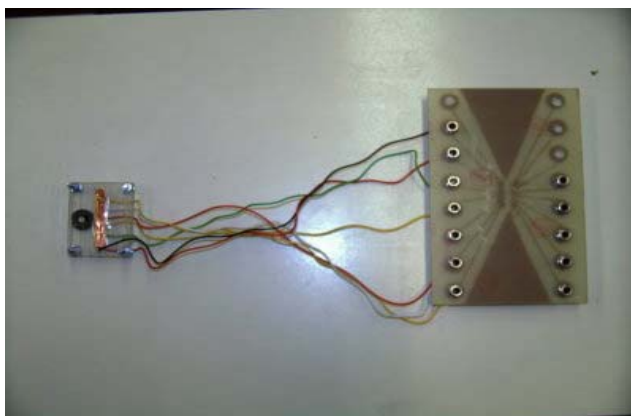


Abb. 4.5 : Die optimierte Apparatur. Die Kupferelektroden sind an die große Platine angeschlossen



## 5 Entwurf und Bau eine neuartigen Mikropumpe

### 5.1 Der Pumpen - Prototyp

Nachdem wir Festkörper gezielt im elektrischen Feld bewegen konnten, kamen wir auf die Idee, mittels dieses Prinzips eine Mikropumpe zu bauen. Unsere Mikropumpe soll nach einem völlig neuem System funktionieren, welches darauf beruht, dass sich ein kleiner Magnet ähnlich wie unsere festen Kügelchen in einem Plexiglasröhrchen zwischen zwei Elektroden im Silikonöl hin- und herbewegt. Ein anderer Magnet in einem danebenliegenden Plexiglasröhrchen wird vom ersten angezogen und dadurch mitbewegt. Dieser zweite Magnet soll in dem Plexiglasröhrchen, in dem er sich befindet, den Kolben einer Pumpe darstellen. Mit Hilfe dieses Kolbens wird eine beliebige Flüssigkeit durch die Pumpe bewegt. Rückschlagventile wie Herzklappenventile verhindern, dass das unerwünschte Zurückfließen der Flüssigkeit (siehe Abb. 5.1).

Die gesamte Pumpe soll jedoch nicht aus einzelnen Plexiglasröhrchen bestehen, sondern aus einem Plexiglasblock hergestellt werden. Die benötigten Verbindungskanäle werden mit verschiedenen dicken Bohrern in die Platte gebohrt; dadurch kann eine bessere Stabilität erreicht werden. Außerdem ist die Pumpe besser zu handhaben, wenn sie in einem kleinen Plexiglasblock untergebracht ist.

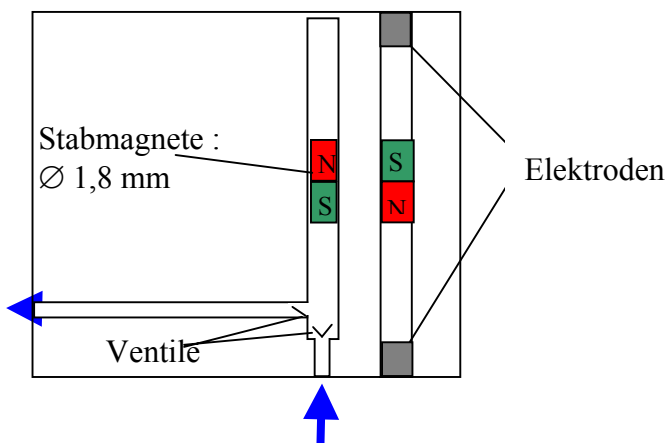


Abb. 5.1 Schematische Darstellung unserer Mikropumpe mit der Magnetkolben-Idee

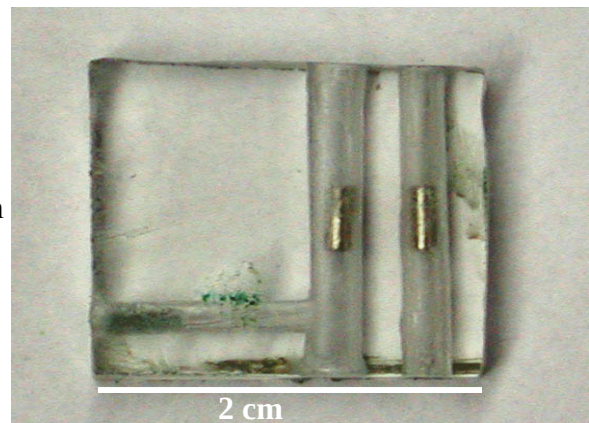


Abb. 5.2 Unsere erste Mikropumpe mit den zwei Stabmagneten

Der Bau einer solchen Pumpe ist, wie wir schnell feststellten, nicht sehr einfach, da man beim Durchbohren von Plexiglas aufpassen muss, dass es nicht zu heiß wird und schmilzt. Dies ist uns öfter passiert und so haben wir dem entsprechende viele Versuche gemacht, eine Pumpe zu bauen (siehe Abb. 5.2). Beim ersten Versuch, Wasser durch unsere Pumpe zu pumpen, kam die nächste Enttäuschung. Das Wasser wurde nicht gepumpt, sondern hing auf Grund der Adhäsionskräfte immer nur an dem Magneten und war somit immer da, wo sich der Magnet gerade befand. Nach längeren Überlegungen kam uns die Idee, die eigentlichen Ein- und Ausflusskanäle kleiner zu bohren, so dass das Wasser dort einen höheren Druck erreicht, was bedeutet, dass der Ansaugdruck durch den Magneten, der sich in einem größeren Röhrchen befindet auch größer wird. Also bauten wir wieder eine neue Pumpe, bei der die Ein- und Ausflusskanäle einen Querschnitt von nur einem Millimeter hatten. Dies gelang uns zunächst nicht, da das Plexiglas immer schmolz. Wir informierten uns über das Bearbeiten von Plexiglas und erfuhren, dass man Plexiglas nur mit einer langsam drehenden Bohrer und einer ständigen Kühlung des Bohrers bohren kann. Also ließen wir Wasser zur Kühlung beim Bohren in die Bohrlöcher fließen. Nun erhielten wir ein gutes Ergebnis (siehe Abb. 5.3). Zum Test haben wir die Ein- und Ausflusskanäle mit Wasser gefüllt, um zu sehen, wie gut der



Magnet das Wasser aus der Pumpe drücken kann, bzw. wie gut er es ansaugt. Dies funktionierte soweit recht gut, denn auch Wasser aus einer kleinen Glasschale konnte ohne Probleme angesaugt werden.

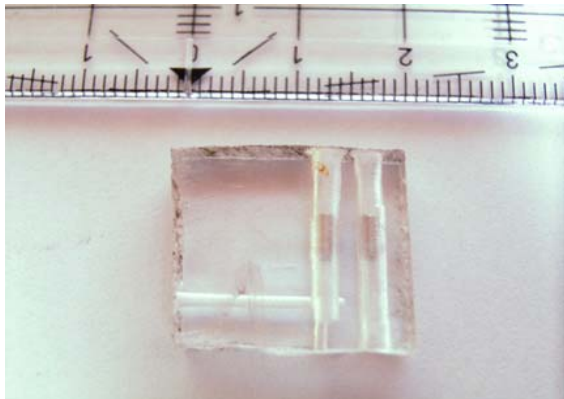


Abb. 5.3 Die Mikropumpe mit richtiger Bohrtechnik.

Der erste Schritt zu einer mm- Pumpe ist nun getan, wobei noch keine Ventile eingebaut sind. Wir erhoffen uns aber, über diese Pumpe und mit Hilfe der von uns gemachten Erfahrungen immer kleinere Pumpen bauen zu können, die dann schließlich in den Mikrometerbereich führen. Solche  $\mu\text{m}$ -Pumpen könnte man beispielsweise auf einer Leiterplatine bauen, indem man bestimmte Teile ätzt und verschiedene Platinenschichten übereinander klebt.

### 5.2 Die Verbesserte Pumpe

Da es sehr schwierig war, Ventile in die Pumpe einzubauen, haben wir uns entschlossen, die Pumpenkanäle in den Plexiglasblock zu fräsen und anschließend einen Deckel lösbar darauf zu befestigen. Dies hatte den Vorteil, dass wir gut in der Pumpe arbeiten konnten und Rückschlagventile aus dünner Plastikfolie gut einbauen konnten. Jedoch hatten wir bei dieser Pumpe ein neues Problem. Dies bestand darin, dass es uns nicht gelungen ist, in den Kanal des Antriebsmagneten Silikonöl zu füllen, ohne das eine Luftblase zurück blieb.

Es ist uns aber gelungen, Wasser durch die Pumpe zu pumpen, indem wir den Kolbenmagnet von außen mit einem anderen Magnet bewegt haben. Nun wussten wir, dass unsere theoretischen Überlegungen praktisch funktionieren. Das einzige Problem bestand darin, den Antriebsmagneten in der Pumpe selbst zu bewegen. Der Magnet bewegte sich unter anderem nicht, weil sich die beiden Magnete gegenseitig anziehen und somit an den Seitenwänden der Kanäle hängen bleiben, da diese zu uneben gebohrt sind. Um dies zu vermeiden, wollen wir kleine Glasröhrchen in den Plexiglasblock bauen, oder zwischen die Kanäle eine dünne Plexiglasplatte bauen, damit wir eine glatte Seitenwand haben.



Abb. 5.4 Die gefräste Pumpe mit den Ventilen (noch ohne Deckel)

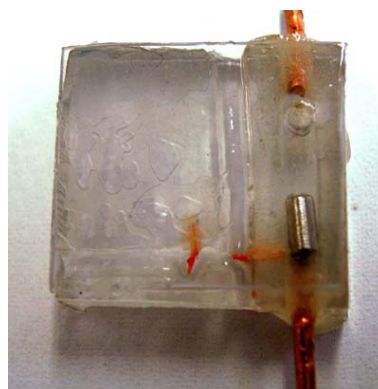


Abb. 5.5 Die gefräste Pumpe, mit Deckel und den Elektroden

## 6 Tröpfchenbewegung unter dem Mikroskop

### 6.1 Gezielte Bewegung von Tröpfchen unter dem Mikroskop

Alternativ könnte man Tröpfchen nehmen, die so klein sind, dass man sie nur unter einem Mikroskop sehen kann und daher auch unter diesem bewegen muss. Wir denken, dass die kleinen Tröpfchen sich nicht zerteilen, weil die Kohäsionskräfte kleine Tröpfchen besser zusammenhalten können als große. Außerdem sind die auftretenden Trägheitskräfte und Gewichtskräfte kleiner (vgl. Abb. 6.2). Wir haben versucht, kleine Tröpfchen unter einem Mikroskop zu bewegen, was aber nicht gelang, da wir die Tröpfchen nicht sehen konnten. Nach langen Überlegungen kam uns die Idee, die Tröpfchen unter UV-Licht zu bewegen. Hierzu färbten wir Wasser mit Uranin ( $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$ ) ein, so dass es unter UV-Licht gelblich-grün leuchtet und wir auch in einem abgedunkelten Raum kleine Tröpfchen unter UV-Licht sehen können (Abb. 6.1). Doch um diese nun unter dem Mikroskop zu bewegen, benötigen wir unsere selbstgebaute Tröpfchenkammer in kleinerem Format. Wir entschlossen uns, diese auf eine Leiterplatine zu ätzen; dazu mussten wir uns zuerst einmal über das Platinenätzen informieren. Der nächste Schritt war dann der Entwurf von Ätzmasken, mit deren Hilfe wir unsere Schaltung auf eine Platine ätzen können.

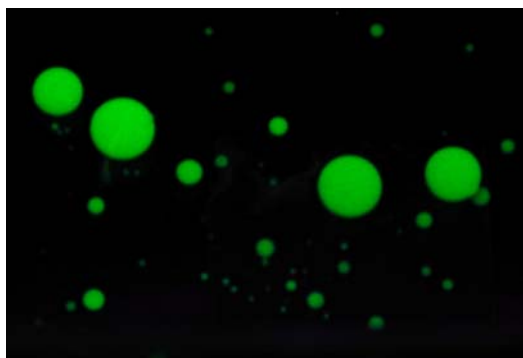


Abb. 6.1 Wassertröpfchen eingefärbt mit Uranin unter UV-Licht ( $\lambda = 366 \text{ nm}$ ).

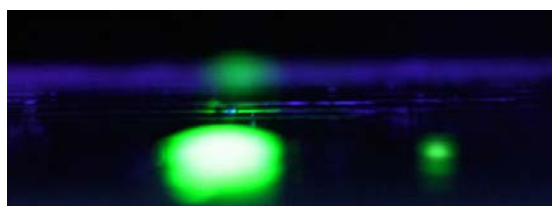


Abb. 6.2 Durch die Gewichtskraft werden große Tröpfchen flach gedrückt, weil die Kohäsionskräfte im Wasser nicht stark genug sind. Im Gegensatz dazu hält die Kohäsionskraft kleine Tröpfchen zusammen, weil die Gewichtskraft geringer ist.

### 6.2 Entwurf von Ätzmasken

Unser nächstes Ziel war nun der Einstieg in den Mikrometer-Bereich. Dazu entwarfen wir eine zweidimensionale Version unserer Apparatur, um diese auf eine Platine ätzen zu können. Wir zeichneten zuerst eine Vorlage für unsere Ätzmase auf dem PC, um diese dann später mit einer Spiegelreflexkamera zu fotografieren. Unsere Zeichnung machten wir bewusst in schwarzweiß, um später bei der Belichtung von Platinen die gewollten Teile deutlich ätzen zu können (siehe Abb. 6.3).

Diese Vorlage haben wir im Format DIN A4 ausgedruckt und auf einen schwarzen Untergrund geklebt. Alles, was auf der Zeichnung weiß ist, ist auf dem Negativ schwarz und wird später auf der Platine stehen bleiben. Da wir wissen, dass ein Negativ auf dem Film eine Größe von  $24 \times 36 \text{ mm}$  hat, konnten wir ungefähr abschätzen, wie groß der Abstand zwischen Vorlage und Kamera sein muss, damit die Apparatur nachher auf dem Film eine Seitenlänge von ca.  $1 \text{ mm}$  hat. Genau dieses Stück mit der Apparatur haben wir aus dem Negativ herausgeschnitten. Mit Hilfe dieses Stücks aus dem negativen Film können wir nun unsere Apparatur auf eine Platine ätzen, um so die Tröpfchen auf der Platine im Mikrometerbereich zu bewegen. Abbildung 6.4 zeigt unsere Ätzmase unter dem Mikroskop.

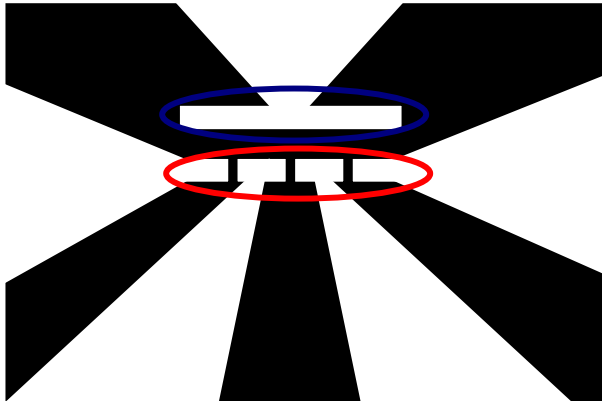


Abb. 6.3 Der erste Entwurf einer Ätzmaske. Man sieht in der Mitte unsere Apparatur mit einer geerdeten Elektrode (blau markiert) und den positiv geladenen Elektroden (rot markiert).

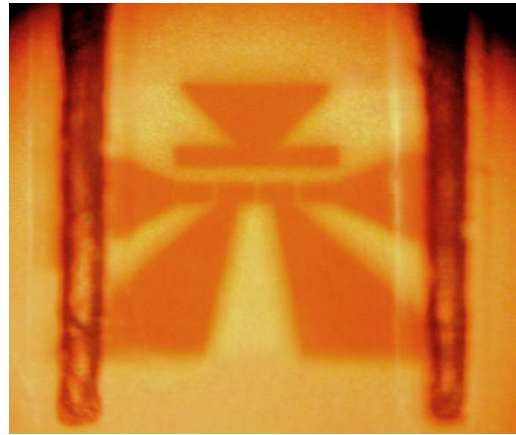


Abb. 6.4 Die Ätzmaske auf dem Negativfilm unter dem Mikroskop. Die beiden senkrechten Markierungen sind von einem Lineal. Der Abstand beträgt 1 mm.

Zuerst stellten wir die Lösungen zum Entwickeln und Ätzen her. Für den Entwickler gaben wir 1g Natriumhydroxid ( $\text{NaOH}$ ) auf 100ml Wasser, als Ätzflüssigkeit verwendeten wir 100ml Wasser mit 20g Natriumpersulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Nun machten wir wie in der Gebrauchsanweisung zum Ätzen beschrieben eine Probelichtung auf einer Platine mit den Maßen 6 x 1 cm. Die Platine bedeckten wir dabei mit einem Stück Negativ, um die tatsächlichen Bedingungen beim Übertragen der Vorlage zu simulieren. Wir haben ein kleines Stück von der Schutzschicht der Platine abgezogen und das freie Stück 20 Sekunden lang mit einer Osram Ultra-Vitalux-Lampe mit einer Leistung von 300W belichtet. Dann haben wir daneben einen weiteren Streifen abgezogen und beide Streifen weitere 20 Sekunden belichtet. Dies wiederholten wir insgesamt 15 Mal. Beim Belichten des letzten Stücks hat der Film nicht ganz bis ans Ende der Platine gereicht, so dass auf einem ca. 2 mm breiten Streifen bei der letzten Belichtung kein Film lag. Somit wurde der erste Streifen auf der Platine insgesamt fünf Minuten lang belichtet. Nun haben wir die belichtete Platine in ca. 20°C warme Entwicklerlösung gelegt. Laut Anleitung sollten die belichteten Teile nach 60 Sekunden eine blanke Kupferfarbe bekommen. Dies geschah jedoch nur bei dem 2 mm breiten Stückchen, das bei der letzten Belichtung nicht vollständig vom Filmstreifen bedeckt wurde. Daher stellten wir uns die Frage, ob der Negativfilm überhaupt durchlässig für UV-Licht ist. Trotzdem legten wir die belichtete Probeplatine in die Ätzlösung. Jedoch hat sich hierbei nicht viel getan. Die Lösung hat sich leicht getrübt, aber an der Platine nichts verändert.

Wir testeten, ob der Negativfilm UV-Licht durchlässt (siehe Abb. 6.5), indem wir unter eine UV-Lampe ( $\lambda = 366 \text{ nm}$ ) ein weißes Blatt Papier legten und darüber ein Stück von dem Negativ hielten. Wir konnten einen deutlichen Schatten sehen, der uns zeigte, dass der Film kein UV-Licht durchlässt.



Abb. 6.5 Der Filmstreifen unter UV-Licht ( $\lambda = 366 \text{ nm}$ ).

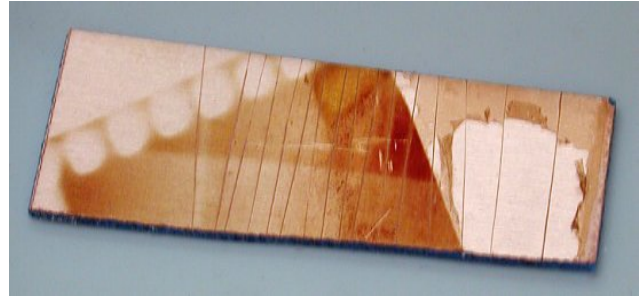


Abb. 6.6 Die belichtete Platine nach dem Entwickeln.

Den endgültigen Test machten wir danach: Wir haben das Stück Filmstreifen auf die Platine gelegt und diese zusammen mit dem Filmstreifen drei Minuten lang belichtet. Wieder haben wir die Platine in die Entwicklerlösung gelegt. Diesmal konnte man genau sehen, dass sich die belichteten Teile in eine glänzende Kupferschicht umwandeln, da der Entwickler die Schutzschicht des Kupfers wegätzt. Danach haben wir die Platine in die Ätzlösung gelegt. Sofort wurden die belichteten Teile weggeätzt, welche vorher durch den Entwickler ihre Säureschutzschicht verloren hatten (siehe Abb. 6.6). Somit haben wir eine Kupferschicht auf der Platine, die genau die Form des Films hat, der beim Belichten auf der Platine lag. Den Ätzzvorgang haben wir nicht beendet, da die Ätzzlösung zu kalt wurde. Sie braucht mindestens 38°C. Der Ätzzvorgang ist beendet, sobald an den belichteten Stellen die gesamte Kupferschicht entfernt ist und die darunter liegende blaue Kunststoffschicht sichtbar wird. Es ist also nicht möglich, mit Hilfe eines Farbnegativfilms eine Platine zu ätzen, weil man auf der Platine nur den Filmstreifen sehen würde und nicht die eigentliche Ätzzmaske, welche auf dem Negativ abgebildet ist.

Ein Schwarzweißfilm lässt UV-Licht der Wellenlänge 366 nm teilweise durch, für UV-Licht der Wellenlänge 254 nm ist er dagegen undurchlässig. Unsere Ätzzvorlage haben wir darum auch mit einem Schwarzweißfilm fotografiert. Jedoch warten wir leider immer noch auf die Entwicklung des Schwarzweißfilms, da diese heute nicht mehr überall gemacht wird und so entsprechend länger dauert. Wenn wir den entwickelten Film haben, wollen wir erneut versuchen, eine Platine mit dieser Vorlage zu belichten. Auch eine für Laserdrucker geeignete Folie haben wir auf Durchlässigkeit von UV-Licht getestet und haben festgestellt, dass sie bei der Wellenlänge von 366 nm UV-Licht durchlässig ist. Ebenso ist es mit einer Folie für normale Tintenstrahldrucker, so dass wir auch versuchen wollen, die Vorlage auf eine Folie zu drucken und mit dieser dann die Platine zu belichten.

In einem weiteren Versuch haben wir unsere Tröpfchenapparatur direkt mit einem Messer in die Schutzfolie der Platine geschnitten und die Stücke entfernt, die belichtet werden sollten. Wir belichteten die Platine anschließend für drei Minuten, entwickelten und ätzten diese wie oben beschrieben. Man kann einen deutlichen Unterschied zwischen Leiterbahn und nicht leitender Kunststoffschicht (blau) erkennen (Abb. 6.7).

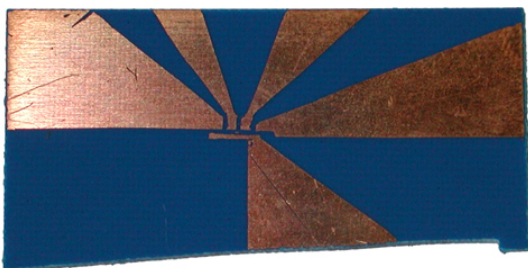


Abb. 6.7 Die fertige Platine.

### **6.3 Bewegung von kleinen Tröpfchen unter dem Mikroskop mit Leiterplatten**

Nachdem wir unsere Tröpfchenkammer erfolgreich auf eine Platine geätzt hatten, versuchten wir direkt, kleine Tröpfchen in ihr zu bewegen. Als Spannungsquelle nahmen wir nicht mehr den Bandgenerator, sondern ein Hochspannungsnetzgerät, das eine genauso hohe Spannung liefern kann wie der Bandgenerator, aber besser regulierbar ist. Die Platine mit der Kammer legten wir in eine mit Silikonöl gefüllte Glasschale unter eine UV-Lampe ( $\lambda = 366\text{nm}$ ). Als Tröpfchen nahmen wir mit Uranin gefärbtes Wasser. Da wir jedoch keine so kleinen Tröpfchen direkt aus der Pipette in die Kammer geben konnten, mussten wir ein großes Tröpfchen mit Hochspannung zerfetzen und dann ein kleines mit der Pipette absaugen und es in die Kammer geben, in der wir es nach dem selben Prinzip bewegen wollten, wie wir es in der großen Kammer mit den Kugeln getan haben. Das hat aber aus mehreren Gründen nicht funktioniert: Das Tröpfchen lag nicht unmittelbar in der Kammer, sondern schwebte im Silikonöl darüber. Das zweite Problem war, dass an manchen Stellen ein Funke übersprang, was jedoch im Silikonöl nicht hätte passieren dürfen. Dann kamen wir auf die Idee, Salzwasser zu benutzen, da in diesem Ionen vorhanden sind und das Wasser dadurch eine bessere Leitfähigkeit besitzt.

Analog zur Bewegung kleiner Festkörper (Zeolith-, Bleikügelchen) wollen wir als nächstes neben einer nicht leitenden Flüssigkeit (Wasser) auch versuchen, eine leitende Flüssigkeit zu verwenden, beispielsweise Salzwasser.



## 7. Endgültige Bewegung eines Tröpfchens

Um nun unsere Apparatur zu optimieren, haben wir uns erst einmal unsere erste Plexiglasapparatur vorgenommen. Dazu haben wir als geerdete Elektrode eine 2cm x 2cm große ITO-beschichtete (Indium Tin Oxide, Indium-Zinn-Oxid) Glasplatte benutzt. Diese wurde uns freundlicherweise von der Universität Bonn zur Verfügung gestellt. Mit dieser Elektrode ist es uns gelungen, ein Zeolithkügelchen auf der Apparatur zu bewegen und es gleichzeitig von oben zu beobachten (Abb. 7.1), da sie durchsichtig ist und den elektrischen Strom leitet.



Abb. 7.1 Ein Zeolithkügelchen unter der ITO-Elektrode (Durchmesser ca. 2mm)

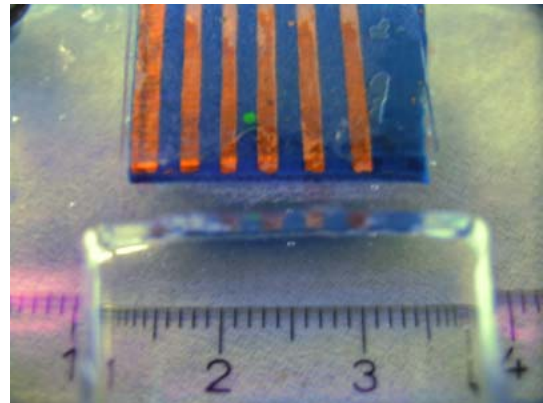


Abb. 7.2 Ein Wassertröpfchen unter der Apparatur (Durchmesser ca. 800µm)

Mit dieser durchsichtigen ITO-Elektrode wollten wir nun endgültig kleine Tröpfchen auf einer Platine bewegen. Dazu haben wir eine neue Platine (2cm x 2cm) geätzt, auf die wir verschiedene Leiterbahnen geätzt haben. Bei dieser kleineren Apparatur haben wir dann die ITO-Elektrode als geerdete Elektrode verwendet, damit wir das mit Uranin gefärbte Wassertröpfchen unter UV-Licht auch durch die ITO-Elektrode sehen konnten (Abb. 7.2). Es ist uns dann endlich gelungen, ein sehr kleines Wassertröpfchen (Durchmesser 800µm) auf dieser Apparatur zu bewegen. Das Tröpfchen wurde nicht zerfetzt, da wir nochmals ein anderes Silikonöl verwendeten, welches eine wesentlich niedrigere Viskosität hatte. Dies hatte natürlich zur Folge, dass wir eine geringere Spannung brauchten, um das Tröpfchen zu bewegen (die Spannung betrug immer noch 1 bis 2kV am Bandgenerator). Die Bewegung des Wassertröpfchens erfolgte über die Ansteuerung der verschiedenen Elektroden. Somit war dies das bisher größte Erfolgserlebnis, denn wir hatten es geschafft, mit einfachen Mitteln kleine Tröpfchen zu bewegen, was bisher nur in Forschungseinrichtungen möglich war. Diese Bewegung von kleinen Tröpfchen ist die Grundlage für den Bau eines Minilaboratoriums auf einer Leiterplatine.

Jedoch traten weitere Probleme bei der Tröpfchenbewegung auf: Da wir uns in der Mikrowelt befinden, verändert sich das Kräfteverhältnis. Während im Makroskopischen die Gravitationskraft eine viel stärkere Rolle spielt als die Elektrische Kraft, ist es im Mikroskopischen genau umgekehrt.

Das Hauptproblem bestand darin, dass das Tröpfchen auf Grund der Adhäsionskräfte bei Berührung der Elektroden das Tröpfchen an diese gezogen und flachgedrückt wird. Die Lösung hierfür wäre eine dünne wasserabweisende Schicht, die auf die Elektroden angebracht wird. Diese würde dann verhindern, dass das Tröpfchen an die Elektroden gezogen werden kann. Ein Beispiel für eine solche Schicht wäre eine ca. 50nm dünne Teflonschicht.



## 8. Ausblick

Zum aktuellen Zeitpunkt haben wir noch einige Ideen, die wir verwirklichen wollen. Diese sind unter anderem die Ansteuerung der Elektroden bei unserer Tröpfchenapparatur von außen und durch einen computergesteuerten Chip. Unsere Mikropumpe wollen wir insgesamt noch optimieren und eventuell noch etwas verkleinern. Die Magnetkanäle müssen glatter gebohrt werden. Wenn uns dies nicht gelingt, wollen wir in die Bohrkanäle kleine Glasröhrchen einbauen, sodass wir durch diese eine glatte Oberfläche für die Beweglichkeit der Magnete gewährleisten. Das Ziel unserer Mikropumpe ist es natürlich, sie so klein zu bauen, dass man sie implantieren kann und sie somit als Medizinpumpe zum Beispiel für Insulin bei Diabetikern dienen kann. Des Weiteren wollen wir die Elektroden der Apparatur mit einer wasserabweisenden Schicht versehen, damit wir die Tröpfchen bewegen können, ohne dass diese an die Elektroden gezogen werden. Wir sind weiterhin sehr motiviert, bis zum Wettbewerb noch einige Versuche zu machen und sind zuversichtlich, die beschriebenen Probleme lösen zu können.

## 9 Links und Literatur

- [1] <http://www.ee.duke.edu/Research/microfluidics>
- [2] <http://www.heise.de/newsticker/data/wst-24.09.03-002/>
- [3] <http://www-gs.e-technik1.uni-rostock.de/gs/deutsch/gradu/gradhomes/wego/wego.html>
- [4] Spektrum der Wissenschaft Ausgabe 1 / 2004