

Micromanipulation of small particles with ultrasound

Doctoral Thesis

Author(s):

Haake, Albrecht

Publication date:

2004

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004843228>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 15681

Micromanipulation of Small Particles with Ultrasound

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

ALBRECHT HAAKE

Dipl.-Ing., Technische Universität Berlin

born July 10th 1972

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Dual, examiner

Prof. Dr. A. Stemmer, co-examiner

Zürich, 2004

ABSTRACT

The topic of this thesis is the micromanipulation of small particles using ultrasound. The term "Particle" is used here to refer to any solid, liquid or gaseous material that has material properties which differ from the fluid in which it is suspended. "Manipulation" means to locate particles at specified points and to then displace them from these points. "Micro" denotes the dimensions; the diameter of the particles and the displacement distances will be in the micrometer range. Two methods for ultrasonic micromanipulation are introduced.

The first method uses a one-dimensional standing sound wave in a resonator to position particles. In this resonator the particles are collected at specified locations in the standing wave. The particles can be displaced by moving the standing wave. The resonator consists of a fluid container, in which the sound wave is established, and a piezo transducer at each end. For such a transducer, comprised of a support layer, a piezo layer and the fluid, a theoretical model was developed. It describes the behavior of the transducer when it is used to emit sound waves or when it is used to measure and reflect sound waves. With this model the full resonator can be described theoretically. This theoretical description is then used to investigate two methods to move the standing wave in the resonator: to apply voltages of different magnitude to the two transducers and to apply voltages of different phase. It is shown that both methods are capable of displacing the standing wave and moving the particles. However, the displacement range is limited by a pressure reduction in the sound wave. This effect appears when the waves of the two transducer are superimposed in a certain way so that they cancel out. This problem led to the development of an alternative micromanipulation device.

The second method displaces the particles by a sound field that is excited by a vibrating glass plate. The particles are suspended in a fluid which fills the gap between this glass plate and a rigid, plane surface of an arbitrary body. The implementation of this method led to an acoustic micromanipulation device (**Fig. I-1** on p. 1). The advantages of this method and the fabricated device are:

- The device has a simple assembly, is cheap and easy to make.
- The excitation and the electronics are very simple, requiring only function generators, an amplifier and a simple voltage divider. No computer is needed.
- Particles can be positioned on any rigid or plane surface (which is not a part of the device) in almost any liquid medium. No special container is necessary.
- Particles can be positioned in a large region that is defined by the size of the glass plate (in the present case the device is 14mm × 14mm).
- It is possible to manipulate many particles in parallel.

A theoretical model for the sound field that arises between the vibrating glass plate and the rigid surface was developed. With this theoretical description it was possible to deduce the force field that acts on a particle suspended in the fluid. A quasi one-dimensional plate vibration will excite a force field that concentrates the particles in lines and a quasi two-dimensional vibration will concentrate particles in points. As a next step the glass plate was included into the model. This gave the dispersion relation of this system which relates the wavelength of the plate vibration and the frequency. It was found that when the fluid layer is approximately as thick or thinner than the vibrating plate there is a relatively small effect on the plate vibration.

The technical realization of this system led to an ultrasonic micromanipulation device, termed "glass-piezo-unit". The glass-piezo-unit consists of a 1mm thick glass plate with the dimensions 14mm \times 14mm and four piezoelectric elements fixed on the edges. The glass-piezo-unit is held by a clamp made of stainless steel. This device is driven by a voltage with a frequency between 500kHz and 3MHz and an amplitude of up to 30V_{rms}. The dispersion relation of the device was measured and a good agreement with the theory was found. The actual contours of the force field in the fluid layer were traced experimentally by the equilibrium position of suspended particles. The equilibrium positions that is predicted by the theoretical investigation could be confirmed. Finally, the application of the suggested method of ultrasonic micromanipulation to displace particles was illustrated. The particles (diameter between 10 μ m and 150 μ m, human cells and polymeric micro spheres) were positioned on an object slide. Three principles were introduced. One method is to excite the glass-piezo-unit with a voltage which has an increasing (or decreasing) frequency. The particle or particles displace because the wavelength is reduced (or inverse). The displacement range of this method is in the hundred micrometer to millimeter range. Another principle is to displace the whole glass-piezo-unit. The particles will follow that movement and change their position relative to the object slide. The last suggested method is to run two opposite piezoelectric elements of the glass-piezo-unit with the same frequency but different amplitude. The vibrations excited by the two transducers are superimposed. It is possible to change the relative position of the loops and nodes of the resulting vibration of the glass plate by changing the amplitudes of the applied voltages. The particles follow the change of the plate vibration. The frequency ramping method worked well for large displacements in the millimeter range and the other two methods are better for the micrometer range.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Thema dieser Arbeit ist die Mikromanipulation von kleinen Partikeln mit Ultraschall. "Partikel" bezieht sich hierbei auf jedes feste, flüssige oder gasförmige Objekt, dessen Materialeigenschaften sich von denen des Fluides unterscheiden, in dem es suspendiert ist. "Manipulation" bedeutet, Partikel an bestimmten Punkten anzuordnen und dann zu verschieben. "Mikro" verweist auf die Dimensionen; die Grösse der Partikel und die Verschiebungsdistanzen liegen im Mikrometer-Bereich. Zwei Ansätze für die Ultraschall-Mikromanipulation werden vorgestellt.

Beim ersten Ansatz wird eine eindimensionale, stehende Welle in einem Resonator verwendet, um die Partikel zu positionieren. Die Partikel werden an bestimmten Positionen der stehenden Welle konzentriert. Der Resonator besteht aus einem Behälter mit je einem Piezo-Aktuator an jedem Ende. Für einen solchen Aktuator, aufgebaut aus einem Trägermaterial und einer piezoelektrischen Schicht, wurde ein theoretisches Modell entwickelt. Es beschreibt das Verhalten des Aktuators, wenn dieser genutzt wird, um Schallwellen auszusenden oder um einfallende Schallwellen zu messen. Mit diesem Modell kann der ganze Resonator theoretisch beschrieben werden. Diese theoretische Beschreibung findet bei der Untersuchung zweier Methoden zur Verschiebung einer stehenden Welle Anwendung: An die Elektroden der beiden Aktuatoren werden entweder Signale unterschiedlicher Spannungsamplitude oder unterschiedlicher Phase angelegt. Es kann gezeigt werden, dass mit beiden Methoden die stehende Welle verschoben und somit die Partikel bewegt werden können. Die Distanz, um die die Partikel verschoben werden kann, ist jedoch durch einen Druckabfall in der Schallwelle beschränkt. Dieser Effekt tritt auf, wenn die Wellen der beiden Aktuatoren in einer bestimmten Art und Weise interferieren, so dass sie sich destruktiv überlagern und auslöschen. Dieses Problem führte zur Entwicklung eines weiteren Ansatzes der Mikromanipulation mit Ultraschall.

Zur Anordnung und Verschiebung von Partikeln wird beim zweiten Ansatz ein Schallfeld genutzt, das durch eine vibrierende Platte erzeugt wird. Die Partikel sind in einem Fluid suspendiert, das den Raum zwischen dieser Platte und einer festen Oberfläche oder einem beliebigen Körper füllt. Aufbauend auf dieser Methode wurde ein Gerät entwickelt (**Abb. I-1** auf S. 1). Die Vorteile dieser Methode und des Gerätes sind:

- Das Gerät kann einfach und billig hergestellt werden.
- Die Anregung und die Elektronik sind sehr einfach. Es werden nur Funktionsgeneratoren, ein Verstärker und ein einfacher Spannungsteiler benötigt. Ein Computer ist nicht notwendig.

-
- Partikel können auf jeder festen oder ebenen Oberfläche, die nicht ein Teil des Gerätes ist, in fast jeder Flüssigkeit positioniert werden. Es ist kein spezieller Behälter notwendig.
 - Partikel können auf einer grossen Fläche, bestimmt durch die Grösse der Glasplatte (für das bestehende Gerät $14\text{mm} \times 14\text{mm}$), positioniert werden.
 - Es können viele Partikel gleichzeitig manipuliert werden.

Für das Schallfeld, das zwischen der vibrierenden Glasplatte und der festen Oberfläche entsteht, ist ein theoretisches Modell entwickelt worden. Damit ist es möglich, das Kraftfeld zu berechnen, das auf ein Partikel wirkt. Eine quasi-eindimensionale Plattenschwingung konzentriert die Partikel in Linien und eine quasi-zweidimensionale Plattenschwingung in Punkten. Im nächsten Schritt wurde das mechanische Verhalten der Platte selber in das Modell integriert. So ergibt sich die Dispersionsbeziehung des Systems, die den Zusammenhang zwischen Wellenlänge in der Platte und Frequenz herstellt. Es stellte sich heraus, dass der Einfluss der Fluidschicht gering ist, wenn diese eine der Platte vergleichbare Dicke aufweist.

Die technische Realisation dieser Methode führte zu einem Ultraschall-Mikromanipulationsgerät. Dieses besteht aus einer 1mm dicken Glasplatte der Grösse $14\text{mm} \times 14\text{mm}$ und vier piezoelektrischen Aktuatoren, die an den Kanten angeklebt sind. Das Gerät wird durch eine Einspannung aus Edelstahl gehalten. Es wird mit einer Spannung von bis zu $30V_{\text{rms}}$ in einem Frequenzbereich zwischen 500kHz und 3MHz betrieben. Die Dispersionsbeziehung des Gerätes wurde gemessen und es besteht eine gute Übereinstimmung mit dem entwickelten Modell. Die Konturen des Kraftfeldes wurden experimentell durch die Gleichgewichtslage suspensierter Partikel bestimmt. Die gefundenen Gleichgewichtspositionen waren durch die Theorie vorausgesagt worden. Schliesslich wurde auch die Anwendung der Methode für die Verschiebung von Partikeln, hauptsächlich menschliche Zellen und Mikrokugeln (Grösse zwischen $10\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$) gezeigt, die sich auf einem Objektträger befinden. Drei verschiedene Prinzipien wurden getestet. Beim einem Prinzip wird das Gerät mit einer Spannung mit steigender (oder fallender) Frequenz angetrieben. Die Partikel werden verschoben, da die Wellenlänge mit steigender Frequenz sinkt. Die Verschiebungsdistanz liegt bei einigen Millimetern. Ein weiteres Prinzip ist es, das Gerät mit konstanter Frequenz und Amplitude zu betreiben und das ganze Gerät zu verschieben. Die Partikel folgen dieser Verschiebung. Beim letzten vorgestellten Prinzip werden zwei gegenüberliegende Piezo-Aktuatoren mit gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Amplitude betrieben. Die beiden Plattenschwingungen der beiden Piezo-Aktuatoren überlagern sich und durch Variation der Amplituden ist es möglich die Knoten der Plattenschwingung und somit auch die Partikel zu verschieben. Die Verschiebungsdistanzen der beiden letzten Prinzipien lag bei unter einem Millimeter mit einer Genauigkeit im Mikrometerbereich.