

Mikropumpen in der Mikrotechnik

Jan Consbruch, iNano
Institut für angewandte Nano- und optische
Technologien der Hochschule Niederrhein

Abstract

Heutzutage beschränkt sich der Einsatz von Mikropumpen auf ausgewählte Anwendungen, wie z.B. Tintenstrahldrucker, Pipetiergeräte oder andere Laboranwendungen. Durch die Entwicklung von leistungsfähigen und zugleich günstigen Mikropumpen die sich für den Einsatz in Massenartikel oder zur Verwendung als Einwegprodukt eignen kann das bisher kleine Feld der mikrofluidischen Anwendungen stark erweitert werden. Im Folgenden werden sowohl grundlegende Begriffe und Prinzipien von Mikropumpen erklärt als auch die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen zum Thema „Low-Cost-Mikropumpe“ dargestellt.

Die meisten heute erhältlichen Mikropumpen sind nach einem Prinzip gebaut, wie in Abbildung 1 [Nam1] dargestellt.

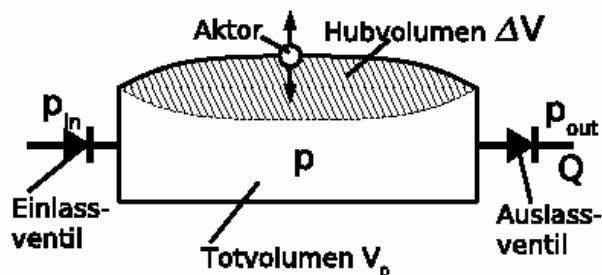


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Mikropumpe

Hierbei befindet sich, zentral gesehen, eine Pumpenkammer mit dem Volumen V . Dieses kann mit Hilfe eines membranförmigen Aktors, um das Hubvolumen ΔV , verändert werden. Durch diese Volumina wird ein wichtiges Maß für die Leistungsfähigkeit einer Mikropumpe, das Kompressionsverhältnis Ψ angegeben:

$$\Psi = \frac{V}{\Delta V} \quad (1)$$

Das Totvolumen V_0 steht für das Restvolumen, das die Pumpenkammer noch aufweist, wenn die Pumpe vollkommen, mit Hilfe des Aktors, entleert ist.

Durch das auf- und abwölben der Membran und die daraus resultierende Volumenänderung ΔV in der Pumpenkammer, entsteht in der Pumpenkammer abwechselnd ein positiver und ein negativer Differenzdruck, wodurch abwechselnd Fluid[1] aus der Pumpe heraus- bzw. in sie hinein gedrückt wird. Um diesen ungerichteten Prozess in einen gerichteten Flüssigkeitsstrom \dot{Q} zu lenken, werden die Ventile am Ein- und am Auslass verwendet. Die Ventile sind als Dioden dargestellt da sie, analog zu den Dioden in der Elektrotechnik, als fluidische Dioden bezeichnet werden können.



Abbildung 2: Membranpumpen nach dem a) elektrostatiscchen, b) dem piezoelektrischen und c) nach dem thermischen Prinzip

Natürlich gibt es auch andere Prinzipien um Fluide mit Mikropumpen zu fördern, z.B. die Osmosepumpe oder die Elektrophoresepumpe, um nur zwei Möglichkeiten zu nennen.

Gelöscht: ¶

Verschiedene Aktorprinzipien stehen für die Verwendung in Mikromembranpumpen zu Verfügung. In Abbildung 2 sind drei Beispiele aufgeführt. Bei allen Pumpen befindet sich im unteren Bereich die Pumpenkammer. In 2 a) ist eine Membranpumpe, die nach dem elektrostatiscchen Prinzip arbeitet, dargestellt. Hier wird die Tatsache genutzt, dass sich zwei geladene Platten bei gleicher Ladung abstoßen bzw. sich bei unterschiedlicher Ladung anziehen. Um diesen Effekt auszunutzen ist jeweils an der Membran und an der darüber befindlichen Abdeckung eine Elektrode, hier schwarz dargestellt. Polarisiert man nun die Elektroden wie oben beschrieben, wölbt sich die Membran nach oben und unten und erzeugt so die Volumendifferenz ΔV .

Abbildung 2 b) zeigt einen Aktor nach dem piezoelektrischen Prinzip, dieser arbeitet mit einem Biegeaktor. Der Biegeaktor kann durch Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung durchgebogen werden, wobei die Richtung der Biegung von der Polarität der Spannung abhängt und sich die Auslenkung des Aktors proportional zum Betrag der Spannung ist.

In der letzten Abbildung, 2 c), ist eine Pumpe nach dem thermischen Prinzip dargestellt. Bei diesem Aktorprinzip befindet sich in der luftdichten Kammer über der Pumpenkammer ein Heizelement (schwarz dargestellt) das die Füllung der Kammer erwärmen kann. Durch die Erwärmung dehnt sich diese aus und bewirkt so eine Volumenänderung in der Pumpenkammer. Als Füllung können

Gase verwendet werden, die sich durch die Erwärmung hinreichend ausdehnen, oder Flüssigkeiten mit einem niedrigen Siedepunkt, sodass diese, wie dargestellt, durch das Heizelement von der flüssigen Phase in die Gasphase überführt werden können.



Abbildung 3: Darstellung a) einer fluidischen Tesla-Diode und b) eines aktiven Ventils mit piezoelektrischem Biegeaktor

Für die Erzeugung eines gerichteten Flüssigkeitsstroms stehen wiederum verschiedene Prinzipien zur Erzeugung eines Ventils bzw. einer fluidischen Diode zur Verfügung. In Abbildung 3 sind zwei Beispiele aufgeführt. Abbildung 3 a) stellt eine Tesla-Diode, und zur Verdeutlichung der Flussrichtung, dar [Sch1]. Diese weist unterschiedliche Flusswiderstände in Abhängigkeit von der Flussrichtung auf. In Durchlassrichtung, von links nach rechts, strömt die Flüssigkeit überwiegend durch die geraden Kanäle und hat so einen relativ kleinen Flusswiderstand. Strömt die Flüssigkeit jedoch in die andere Richtung (von rechts nach links) muss sie immer wieder durch die gebogenen Kanäle wodurch sich der Flusswiderstand vergrößert. Außerdem entsteht im Bereich in dem der gebogene und der gerade Kanal zusammen treffen ein Rückstau, der wiederum den Flusswiderstand in die Sperrichtung vergrößert.

Weitere fluidische Dioden sind z.B. die Schnecken-Diode oder die Käfer-Diode, allerdings kann auch ein trichterförmiger Durchlauf als Flussdiode dienen.

In Abbildung 3 b) ist eine aktive Ventilklappe, die aus einem piezoelektrischen Biegeaktor besteht, zu sehen. Dieser besteht aus einem Substrat, das die eigentliche Ventilklappe bildet und einem Piezoaktor, grau dargestellt, der auf der Ventilklappe aufgebracht ist. Durch das Anlegen einer Spannung zieht sich der Piezoaktor zusammen und biegt somit das Substrat nach oben. Der Vorteil dieses Ventils ist die Steuerbarkeit, die es ermöglicht das Ventil zu schließen bevor ein Rückstrom überhaupt entstehen kann. Allerdings müssen die Ventile dann auch gesteuert werden und es entsteht zusätzlicher Aufwand, da die Ventile in der Pumpe kontaktiert werden müssen. Auch für dieses Prinzip stehen weitere Aktorprinzipien, wie z.B. das elektrostatische, zur Verfügung.

Eine weitere Möglichkeit für ein Ventil ist ein passives Ventil bzw. Rückschlagventil. Dieses wird durch den Flüssigkeitsstrom geöffnet bzw.

geschlossen und benötigt keinerlei Steuerung. Diese Variante ähnelt dem aktiven Ventil in Abbildung 3 b) allerdings ohne den Piezoaktor.

Für die Bestimmung des Volumenstromes \dot{Q} stehen verschiedenste Messmethoden zur Verfügung. Hier wurde die geförderte Flüssigkeit über einen längeren Zeitraum in eine Küvette gepumpt und anschließend das Gesamtvolumen bestimmt, welches dann durch die geförderte Zeit dividiert wurde. So konnte leicht ein arithmetischer Mittelwert gebildet werden, der die Schwankungen der Fördermenge ausgleicht und die Genauigkeit erhöht.

Hierbei ergaben sich die Kennlinien wie in Abbildung 4 zu sehen. Auf der x-Achse ist die Frequenz des Steuersignals in Hz zu sehen und auf der y-Achse ist die resultierende Fördermenge in μl aufgetragen. Alle Messungen sind mit einem Rechtecksignal als Steuersignal aufgenommen, deren Amplituden rechts

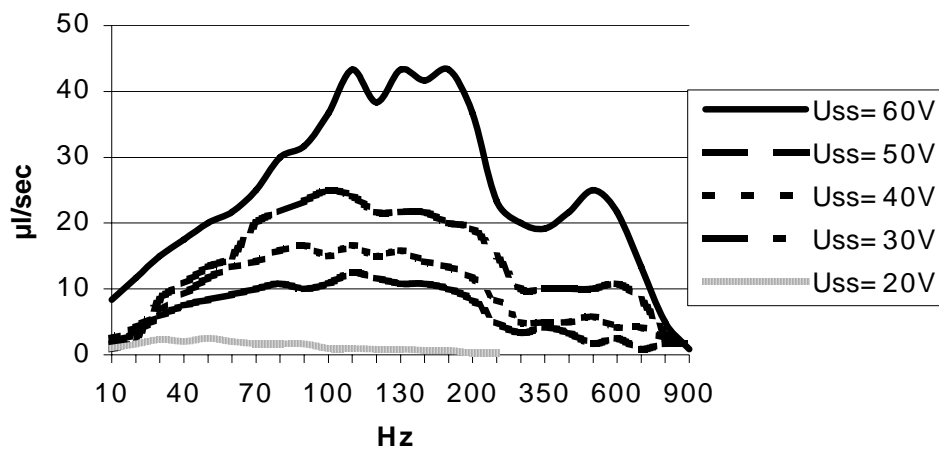


Abbildung 4: Förderkennlinie der Mikropumpe in der Legende dargestellt sind.

In der Grafik ist gut zu erkennen, dass die Förderrate, beinahe linear, bis zu einer Frequenz von 70Hz bis 100Hz, je nach Signalamplitude, zunimmt. Dies ist der Arbeitsbereich, in dem die Pumpe später arbeiten soll. Bei größeren Frequenzen sinkt die Förderrate, und mit ihr die Effektivität stark ab.

Besser ist das noch in Abbildung 5 zu erkennen, in der die Fördermengen aus Abbildung 4 durch die jeweilige Frequenz geteilt wurden. Hierbei ergibt sich die Füllmenge der Pumpe pro Pumpenhub ΔV , die auf der y-Achse in μl aufgetragen ist. Ansonsten ist die Grafik äquivalent zur vorherigen.

Hier ist besonders gut zu sehen, dass die Füllmenge pro Pumpenhub mit zunehmender Steuerfrequenz stark abfällt, wodurch noch verdeutlicht wird, dass der Frequenzbereich von 0-100Hz genutzt werden sollte.

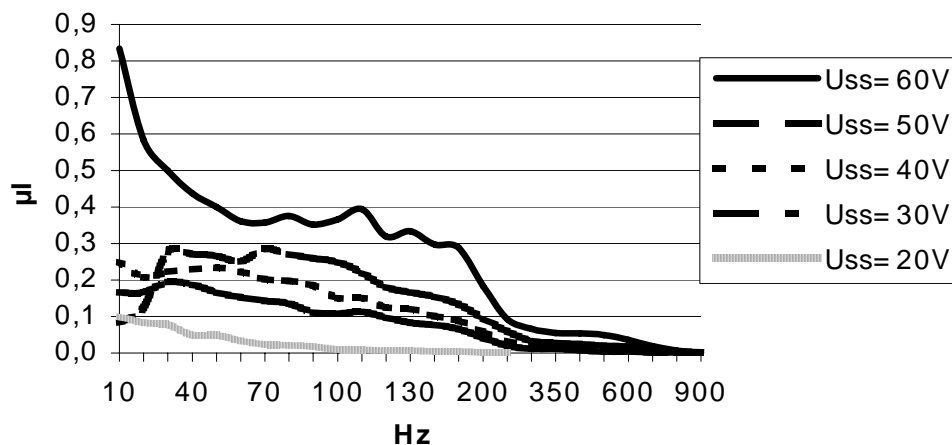


Abbildung 5: Fördervolumen pro Pumpenhub der Mikropumpe

Für die Messung der maximalen Förderhöhe kann ein einfaches Verfahren verwendet werden. Die Pumpe ist hier mit ihrem Einlassstutzen, über einen Schlauch, mit einem Vorratsbehälter verbunden. An den Auslassstutzen ist ein Schlauch angeschlossen, der senkrecht nach oben befestigt ist. Durch das Variieren der Signalfrequenz der Pumpe kann dann das Maximum der Förderhöhe bestimmt werden. Hierbei zeigte sich, dass das Maximum der Förderhöhe im gleichen Frequenzbereich wie das Maximum des Fördervolumens befindet.

Durch die Bestimmung dieser beiden wichtigen Kennwerte kann, unter Verwendung der Dichte der Flüssigkeit ρ und der Erdbeschleunigung g , kann die maximale Leistung der Pumpe berechnet werden [Boe1]. Durch Multiplikation dieser Werte mit der maximalen Förderhöhe ergibt sich der maximale Gegendruck, gegen den die Pumpe arbeiten kann. Durch Multiplikation dieses Wertes mit dem maximalen Volumenstrom der Pumpe und Division durch zwei ergibt sich die maximale Leistung der Pumpe.

$$p_{\max} = \rho \cdot g \cdot h_{\max} \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{p_{\max} \cdot \dot{Q}_{\max}}{2} \quad (3)$$

Die maximale Leistungsaufnahme der Pumpe bzw. des Aktors sollte durch weitere Messungen bestimmt werden, da diese die letzte wichtige Kenngröße einer Mikropumpe darstellt. Durch Division der maximalen Leistungsabgabe der Pumpe P_{ab} durch die maximale Leistungsaufnahme des Aktors P_{zu} ergibt sich der Wirkungsgrad der Mikropumpe η .

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (4)$$

Für die getestete Mikropumpe konnten die folgenden Kennwerte ermittelt werden:

Maximale Förderrate:	2,7 ml/min (45 µl/sec)
Minimale Dosiermenge:	100 nl
Maximaler Gegendruck:	7,26 kPa
Maximale Leistungsaufnahme:	4,16 mW
Effektivität:	0,04%
Mindesthaltbarkeit:	> 5,5x10 ⁸ Lastwechsel
Dimensionen:	20x20x5 mm

Tabelle 1: Kennwerte der Mikropumpe

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades fällt auf, dass diese sehr klein ist. Allerdings ergeben sich für die meisten Mikropumpen solch kleine Wirkungsgrade.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Herstellung einer Low-Cost-Mikropumpe, die sich für den Einsatz in Massenartikeln eignet, möglich ist. Hierbei können durch den Verzicht auf Reinraumtechnik und übliche Mikrostrukturierung beträchtliche Fertigungskosten eingespart werden, sodass diese Mikropumpe auch für die Verwendung als Wegwerfartikel geeignet ist.

Begriffserklärungen:

- [1] Ein Stoff mit flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften, der als Kontinuum betrachtet wird (Alles Gas und Flüssigkeiten)[www1]

Quellenangaben:

[Nam1] Nam-Trung Nguyen, Steven T. Wereley: Fundamentals and Applications of Microfluidic, Artech House, 2002

[Boe1] Leopold Böswirth: Technische Strömungslehre, Vieweg Fachbücher der Technik, 2000

[Sch1] Michael Schlüter: Mikrofluidische Strukturen für biochemische Analysen, www.docschlueter.de, 2004

[www1] Wikipedia, Fluid, <http://de.wikipedia.org/wiki/Fluid>