

Integrierte Druckmessung bei einer Mikropumpe

Projektleiter
Dr. Jan Albers

Förderung
Fachhochschule
Dortmund
Forschungsbudget

Stud. Mitarbeiter
Markus Vogt

Kooperation
Bartels
Mikrotechnik GmbH,
ELMOS
Semiconductor AG

Kontakt
Dr. Jan Albers
Fachbereich
Informations- und
Elektrotechnik
Fachhochschule
Dortmund
Sonnenstraße 96
44139 Dortmund
Tel.: (0231) 9112-798
E-Mail: jan.albers
@fh-dortmund.de

Kurzfassung:

Mikropumpen entwickeln sich nach und nach zu einem kostengünstigen Serienprodukt, das eine breite Palette an Anwendungen bieten, z. B. in der Medizintechnik, Pharmaindustrie oder Biotechnologie. So bietet die Firma Bartels Mikrotechnik eine Mikropumpe an, die mit einer Piezomembran arbeitet und für die kostengünstige Massenproduktion geeignet ist (Abb. 1).

Ein Problem bei Mikropumpen ist das Messen von relevanten Werten wie Durchflüsse oder auch Druck in den Pumpkanälen. Für die Durchflussmessung sind verschiedene Verfahren entwickelt worden (Kapillare, Waagen, Anometer). Das Messen von Drücken ist aufgrund der kleinen Mikrokanäle noch ein großes Problem. Standard-Drucksensoren haben zu große Messköpfe, die nur mit einem Schlauch an den Druckkanal angeschlossen werden könnten. Dies führt zu einer starken Verfälschung der Messungen. Außerdem sind ihre Membranen zu träge, um auf die kleinen Leistungen der Mikropumpen zu reagieren. Mittlerweile gibt es aber mikrostrukturierte Drucksensoren auf Siliziumbasis, die klein genug sind, um ein integriertes System aufzubauen. So stellt die Firma ELMOS Semiconductor AG in Dortmund ein Drucksensorchip her, der schon die komplette Mess- und Auswertelektronik enthält.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die mikrostrukturierten Drucksensoren geeignet sind, den Förderdruck der Mikropumpe zu bestimmen. Insbesondere zeigt sich, dass die Trägheit der Mikrosensoren klein genug ist, um das Pumpsignal der Membranpumpe auch bei 60Hz noch nachvollziehen zu können. Des weiteren wird eine Möglichkeit aufgezeigt, die Drucksensoren in einem miniaturisierter Venturi-Rohr zur Messung des Durchflusses der Mikropumpe zu verwenden.

Beschreibung der Komponenten:

Bei der Mikropumpe der Firma Bartels handelt es sich um eine Piezopumpe, so dass die Bewegung des Mediums durch eine Piezomembran erzeugt wird. Die Piezomembran der Pumpe verbiegt sich beim Anlegen einer Spannung. Wird die Membran mit einem sinusförmigen Signal angesteuert, beginnt sie zu schwingen. Durch diese Schwingungen füllt und leert sich die Pumpkammer. Dies allein würde jedoch nicht zu einer Pumpbewegung führen. Darum sind am Eingang und am Ausgang jeweils Mikroventile eingebracht. Diese sind so angeordnet, dass sie beim Befüllen der Pumpkammer den Ausgang schließen und beim Leeren den Eingang. Hierdurch entsteht eine Pumpbewegung.

Diese Pumpe besteht aus Spritzgussteilen, so dass sie in großen Stückzahlen einfach und günstig gefertigt werden kann. Der einfache Aufbau der Pumpe macht sie sehr robust und mindert ihre Störanfälligkeit. Die folgenden Tabelle gibt einige Pumpendaten an:



Abb. 1: Mikropumpe der Firma Bartels

Mikropumpe der Firma Bartels

- Medien: Gase, Flüssigkeiten
- dynamische Viskosität: < ~ 120 mPas
- Partikeltoleranz: < 50 µm
- Förderrate
- Flüssigkeiten: 50 nl/min – 5 ml/min
- Gase: 50 µl/min – 15 ml/min
- Förderdruck:
- Flüssigkeiten: max. 500 mbar
- Gase: max. 60 mbar

Aus dem Datenblatt der Pumpe ist zu entnehmen, dass für gasförmige Stoffe ein Druck von 60 mbar zu erwarten ist. Dies verlangt nach sensiblen Drucksensoren. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um mikrostrukturierte Siliziummembranen mit piezoresistive Aktivgebietswiderstände. Die Widerstände liegen in der Membran und sind zu einer Wheatstonschen Messbrücke zusammen geschaltet (Abb. 2).

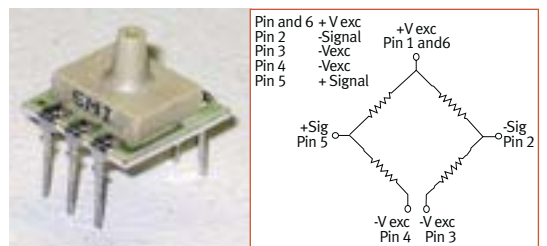


Abb. 2: Drucksensor von Elmos

Diese Drucksensoren besitzen die notwendige Sensibilität und geben ein entsprechend großes Messsignal. Sie haben aber den Nachteil, dass ihr Signal eine Temperaturabhängigkeit zeigt und sie deshalb aufwendig kalibriert werden müssen. Die dafür notwendigen Messungen konnten an der FH-Dortmund mit einem Messaufbau von Herrn Prof. Eden durchgeführt werden.

Die Kalibrierung ergab, dass der anliegende Druck und die Ausgangsspannung bei 20°C ein lineares Verhältnis zueinander besitzen. Es müssen aber Korrekturfaktoren eingesetzt werden, die es dann ermöglichen, jeden einzelnen Spannungswert des Sensors $V(p)$ in einen Druck $p(V)$ umzurechnen. Die angegebenen Messwerte wurden wie folgt bestimmt:

$$P(V) = \frac{V(p) - n}{m} = \frac{V(p) + 0,00683}{0,000564 \frac{V}{\text{mbar}}}$$

Verwendet wurden sechs Sensoren mit drei unterschiedlichen Druckbereichen: 0.15PSI, 0.8PSI, 1.5PSI.

Messung des Pumpenförderdruckes

Zur Messung des Förderdruckes wurde der folgende Messaufbau realisiert (Abb. 3). Der Messaufbau besteht neben den Drucksensoren, der Pumpe und der Pumpelektronik aus einer konstanten Spannungsquelle und einem Oszilloskop zum Aufzeichnen der Messsignale (2x Spannungssignal der Drucksensoren, Steuerungssignal, Spannungsquelle)

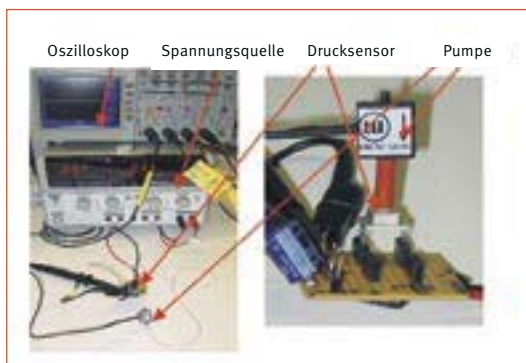


Abb. 3: Messaufbau

Zur Bestimmung des maximalen Förderdruckes beim Pumpen von Luft wurden sechs Drucksensoren (jeweils zwei der folgenden Sensortypen: 0.15PSI, 0.8PSI und 1,5PSI) mit einem kurzen Schlauch direkt an die Pumpe angeschlossen. In

Diagramm 1 ist der gemessene Druck gegen den Pumpwert aufgetragen. Der Pumpwert wird an der Pumpelektronik eingestellt und bestimmt die Leistung der Pumpe.

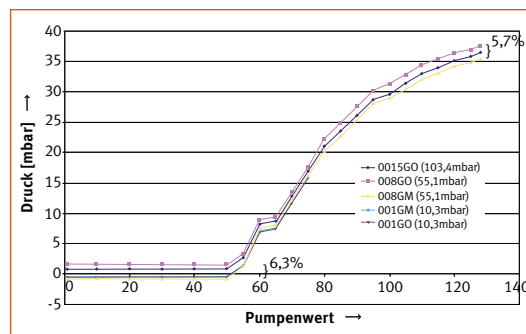


Diagramm 1: Messung mit verschiedenen Sensoren

Die Ergebnisse zeigen den erwarteten Verlauf des Förderdruckes. Die unterschiedlichen Sensoren zeigen eine maximale Abweichung der Kurven von 6,3%. Die verschiedenen Offsets zwischen den Kurven sind auf die Genauigkeit der Messeinrichtung zurück zu führen. Damit sind alle Sensoren grundsätzlich geeignet, den Förderdruck aufzunehmen.

Als Nächstes wurde eine Langzeitmessung (1 Stunde) durchgeführt. Dabei wurde der Förderdruck mit zwei verschiedenen Sensoren und deren Eingangsspannung gemessen. Dies wurde bei drei verschiedenen Pumpwerten 0%, 50% und 100% durchgeführt. Das Diagramm 2 zeigt die Ergebnisse bei einem Pumpwert von 0%. Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass das Signal der Sensoren grundsätzlich stabil ist und der Eingangsspannung folgt. Hieraus ist zu schließen, dass für diesen Aufbau eine konstante Spannungsquelle von großer Bedeutung ist. Schwankungen in der Eingangsspannung machen sich schon bei einer Größenordnung von 1 mV bemerkbar.

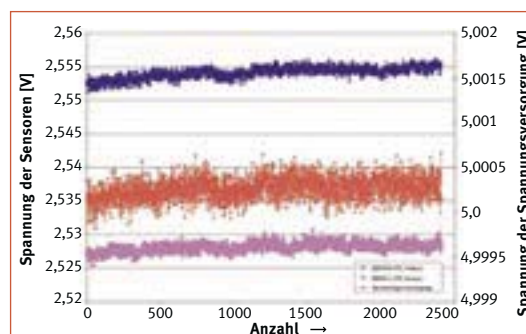


Diagramm 2: Langzeitmessung

In einer weiteren Messreihe wurde untersucht, welchen Einfluss die Schlauchart sowie die Schlauchlänge auf den statischen Förderdruck der Pumpe haben. Hierzu wurden zwei verschiedene Schläuche mit unterschiedlichen Längen verwendet. Ein Gummischlauch und ein Tygenschlauch. Der Gummischlauch wurde in zwei verschiedenen Längen verwendet, 2 cm und 50 cm. Der Tygenschlauch wurde mit einer Länge von 50 cm verwendet. Als Sensor wurde ein Sensor mit einem Messbereich von 0.8 PSI (55,3 mbar) gewählt. Dieser wurde verwendet, da die zu erwartenden maximalen Drücke bei 60 mbar (siehe Datenblatt) lagen. Dieser Versuch wurde bei Umgebungstemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Diagramm 3 zu sehen.

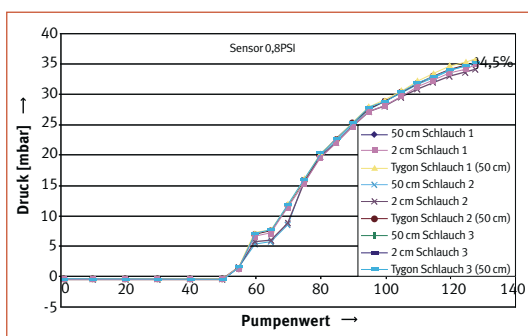


Diagramm 3: Förderdruck bei verschiedenen Schlauchlängen

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass der maximale Fehler bei 4,5% des Endausschlages liegt. Weiterhin kann bei den Abweichungen keine Systematik in Bezug auf die Schlauchlänge festgestellt werden. Somit bleibt festzuhalten, dass bei Schläuchen von einer Länge bis 50 cm

die Länge keinen Einfluss hat. Ebenso konnte kein systematischer Unterschied zwischen den Materialien Gummi sowie Tygon festgestellt werden. Der Offset lässt sich dadurch erklären, dass für die Umrechnung der Spannungswerte in Druckwerte die Kalibrierkurve für 20°C angenommen wurde. Real lag die Raumtemperatur aber nicht exakt bei 20°C.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Geschwindigkeit ermittelt, in der die Drucksensoren auf Schwankungen des anliegenden Drucksignals reagieren. Dies ist wichtig, um später die Reaktionszeiten des gesamten Systems korrekt beschreiben zu können. Eine Änderung im Versuchsaufbau wurde durchgeführt. Für diesen Versuch wurde eine andere Ansteuerlektronik für die Pumpe verwendet. Diese erlaubt, neben der Einstellung der Spannungsamplitude auch die Einstellung der Frequenz sowie die Einstellung der Signalform. Für diese Versuche wurde die Amplitude auf den maximalen Wert für Dauerbetrieb eingestellt. Als Signalform wurde Sinusform gewählt und die Frequenz wurde zwischen den Versuchsreihen variiert.

Aus den verschiedenen Oszillogrammen (Abb. 4) ist zu entnehmen, dass bis zu einer Frequenz von 60 Hz die einzelnen Pumpbewegungen erkennbar sind. Ein solches Wissen und Auswerten des Drucksignals erlaubt auch eine Prüfung der Funktionalität der Pumpe. So können einzelne Pumpzyklen beobachtet werden.

Theoretische Betrachtungen zur Messung des Durchflusses mit Hilfe der Drucksensoren

Aus der Strömungsmechanik ist bekannt, dass bei einer Querschnittsverengung eines durchströmten

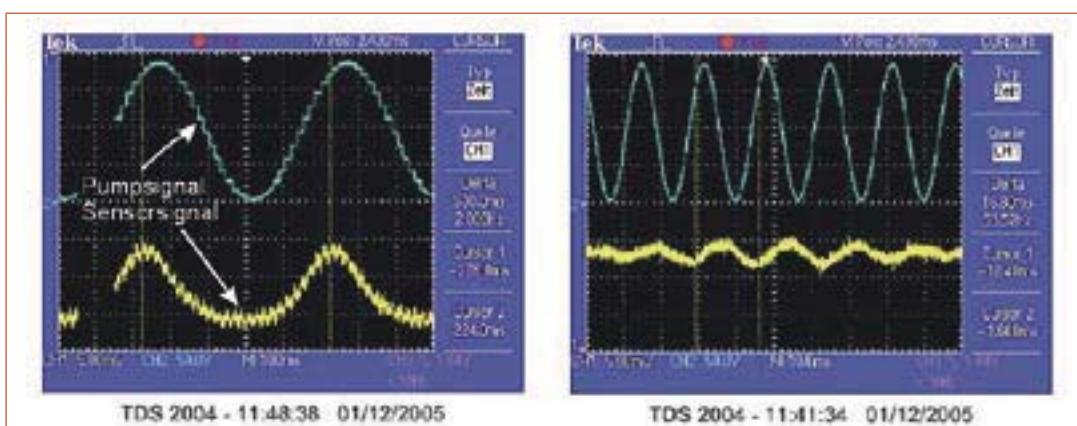


Abb. 4: Drucksignale bei verschiedenen Frequenzen

Rohres der statische Druck geringer wird. Sind die Querschnitte vor und in der Verengung bekannt, so kann mit der Gleichung von Bernoulli der Volumenstrom berechnet werden. Die so arbeitenden Durchflussmesser werden als Venturi Rohr bezeichnet.

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} * v_1^2 \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]$$

In den folgenden Simulationen (Diagramm 4) wurden die Querschnitte für ein Venturi Rohr berechnet, mit dem der Durchfluss der vorhandenen Pumpe mit den vorhandenen Sensoren bestimmt werden könnte. Die Simulationen wurden für Luft für Wasser durchgeführt. Der Druckunterschied soll in beiden Fällen gleich 10 mbar sein, da dies der Vollausschlag des empfindlichsten Sensors ist. Der Querschnitt A1 (Querschnitt der nicht verengten Stelle) wurde auf 1,3 mm festgelegt, da es sich hierbei um den Innendurchmesser der verwendeten Schläuche handelt. Der Durchmesser A2 wurde variiert. Die maximale Förderrate der Pumpe für Luft liegt bei 15000 µL/min und für Wasser bei 5000 µL/min.

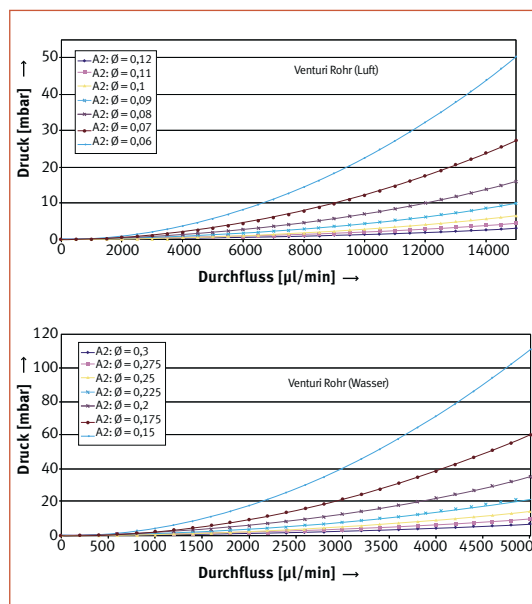


Diagramm 4: Simulation des Venturi Rohrs

Die Berechnungen haben gezeigt, dass bei entsprechender Dimensionierung der Komponenten eine Durchflussmessung unter zu Hilfenahme der Drucksensoren möglich wird. Aus diesen Berechnungen wurde folgendes Modell für eine Venturie Messsystem entwickelt (Abb. 6).

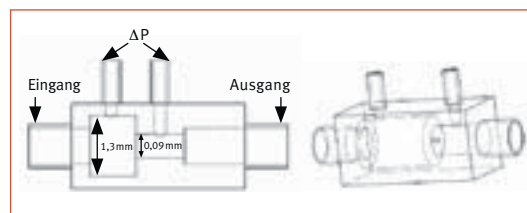


Abb. 6: Modell eines Venturie Rohrs

Die Schwierigkeit liegt darin, dass der Druck quadratisch vom Durchfluss abhängt. Dies bedeutet für kleine Durchflussraten extrem kleine Drücke und bei höheren Durchflussraten schnell steigende Drücke. Außerdem ist aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen Flüssigkeiten und Gasen von ungefähr tausend notwendig, die Aufbauten unterschiedlich auszulegen. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass die Berechnungen sämtliche Störfaktoren wie z. B. Reibungsverluste in den Leitungen vernachlässigen. Des Weiteren wurde die Luft als inkompressibel angenommen.

Die hier vorgestellten Modelle sollen eine Möglichkeit darstellen, in Zukunft ein geregeltes Mikropumpensystem mit Drucksensor aufzubauen. Ein solches komplexes System in Mikrotechnik herzustellen, würde viele Vorteile und auch neue Anwendungsgebiete erschließen. So ist es denkbar, herkömmliche Infusionspumpen durch kleinere, leichtere und damit für den Patienten angenehmere zu ersetzen. Auch im Bereich der Messtechnik könnten solche Anwendungen von großem Nutzen sein, so könnten mit einem solchen System kleinere portable Messgerät gebaut werden. Die kleinen Förderraten der Pumpe können auch helfen beim Dosieren hoch präziser Mischungen.

Literatur zum Thema:

- „A Single-Chip Pressure Sensor“; J.G. Markle, M.L. Dunbar, H. Allen, R. Bornefeld, W. Schreiber-Prillwitz, O. Stöver; Sensors (4/2004)
- „Modulare Reifendruck Kontrollsysteme“; ELMOS newsletter (4/2004)
- „Mikrofluidik im Aufschwung“; TZDO news, 4/2004, 6. Jhrg., S. 14
- „Disposable micropump“; Medical Device Technology, December 2004, S. 35
- „High Potential of Microfluidics“; European Biotechnology News, Nr. 11, Volume 3, S. 45
- „Micropump“, medical device technology, S. 39; (4/2004)