

F&M

Feinwerktechnik
Mikrotechnik
Messtechnik

103. Jahrgang 1-2 / 95

Michael Freygang, Hartmut Glosch, Jürgen Merz,
Villingen-Schwenningen

Automatisiertes Meßsystem für kleinste Volumenflüsse

CARL HANSER VERLAG

Alle Rechte, auch die des
Nachdrucks, der photo-
mechanischen Wiedergabe
dieses Sonderdrucks
und der Übersetzung,
behält sich der Verlag vor.

Michael Freygang,
Hartmut Glosch,
Jürgen Merz,
Villingen-Schwenningen

Automatisiertes Meßsystem für kleinste Volumenflüsse

Wie vielfältig der Einsatz professioneller PC-Meßtechnik sein kann, beweist eine Applikation am Institut für Mikro- und Informationstechnik. Ein ausgeklügeltes Meßsystem dient dort zur automatischen Charakterisierung mikromechanischer Ventile und Pumpen mit Volumenflüssen im Bereich von 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ bis zu einigen ml/min .

Sicher keine alltägliche Aufgabe für ein Standard-Meßsystem. Um so interessanter sind die Erfahrungen der Autoren, die verraten, worauf man als Anwender achten sollte, um vor künftigen Meßproblemen nicht kapitulieren zu müssen.

Automated measuring system for the smallest volume flows. The wide variety of application of professional PC measurement techniques is demonstrated at the Institute for Micro and Information Techniques. A sophisticated measurement system is used for an automatic characterization of micromechanical valves and pumps with volume flows ranging from 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ to some ml/min . Certainly not an every day routine for a standard measurement system. All the more interesting are the experiences gathered by the authors who disclose what should be observed by users in order to master future measuring problems.

Ein Arbeitsschwerpunkt des Instituts für Mikro- und Informationstechnik, kurz IMIT, ist die Entwicklung von Ventilen, Schaltern und Pumpen in Silizium-Mikromechanik. Ein Ziel ist, Mikropumpen für die genaue Dosierung von Volumenflüssen im Bereich von einem $\mu\text{l}/\text{min}$ bis zu wenigen ml/min herzustellen. Anwendungsfelder für diesen Flußbereich sind unter anderem die Medizintechnik (Medikamentendosierung, Insulinpumpe), die chemische Analysetechnik sowie die Schmierung von Lagern.

Bild 1 verdeutlicht das Prinzip der Membranpumpe. Sie besteht aus einer 25 μm dicken Siliziummembran, die mit konventioneller Ätztechnik der Silizium-Mikromechanik hergestellt wurde. Zwei integrierte Rückschlagventile werden durch das Bewegen der Membran wechselseitig geöffnet oder geschlossen, wodurch der Pumpvorgang realisiert wird. Diese Rückschlagventile bestehen aus Silizium-Biegebalken, die über den ebenfalls in Silizium geätzten Ein-/Auslaßkanälen angeordnet sind. Für die aus drei Siliziumchips bestehende Pumpe wurden verschiedene Antriebsvarianten konzipiert. So werden neben einem externen pneumatischen Antrieb auch in Silizium integrierte Antriebe, wie thermisch-bimetallische, thermo-pneumatische und piezoelektrische Dünnschichten, untersucht.

Außer der Antriebsform werden auch die geometrischen Abmessungen der gesamten Pumpe, der Pumpmembran sowie der Ventile variiert. Von diesen verschiedenen Varianten wurden und werden Funktionsmuster hergestellt. Darüber hinaus gilt es auch die Voraussetzungen zu schaffen, um diese Pumpen den jeweiligen Spezifikationen entsprechend skalieren zu können. Dies ist auch einer der Gründe für die hohe Anzahl verschiedener Varianten, die alle zu charakterisieren sind. Weiter wurde das Bauteilverhalten mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen simuliert [1]. Stimmen die Ergebnisse

der Simulationen mit den Meßergebnissen überein, so lassen sich Pumpen mit voraussagbaren Eigenschaften bei gegebenen Außenabmessungen entwickeln und fertigen [2]. Die Charakterisierung dieser Pumpen besteht hauptsächlich in der Aufnahme von Durchfluß-zu-Gegendruck-Kennlinien.

Meßprinzip bestimmt über Software-Einsatz

Das Prinzip des Durchflußmeßsystems [3] beruht auf der Laufzeitmessung einer in eine Meßpipette injizierten Gasblase und ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Beim Passieren der ersten Marke wird die Zeitmessung gestartet und bei der zweiten Marke wieder gestoppt.

Herzstück des am IMIT entwickelten Durchflußmeßgerätes ist ein Z80 kompatibler Mikrocontroller vom Typ

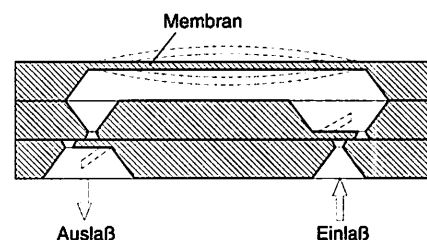


Bild 1. Aufbauschema einer mikromechanisch hergestellten Pumpe: Beim Bewegen der Membran werden die Ventile wechselseitig geöffnet oder geschlossen

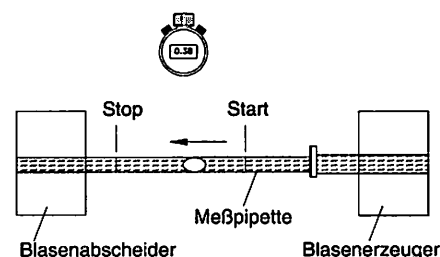


Bild 2. Schematische Darstellung des Meßprinzips: Laufzeitmessung einer Luftblase in einer Meßpipette mittels zweier Meßmarken

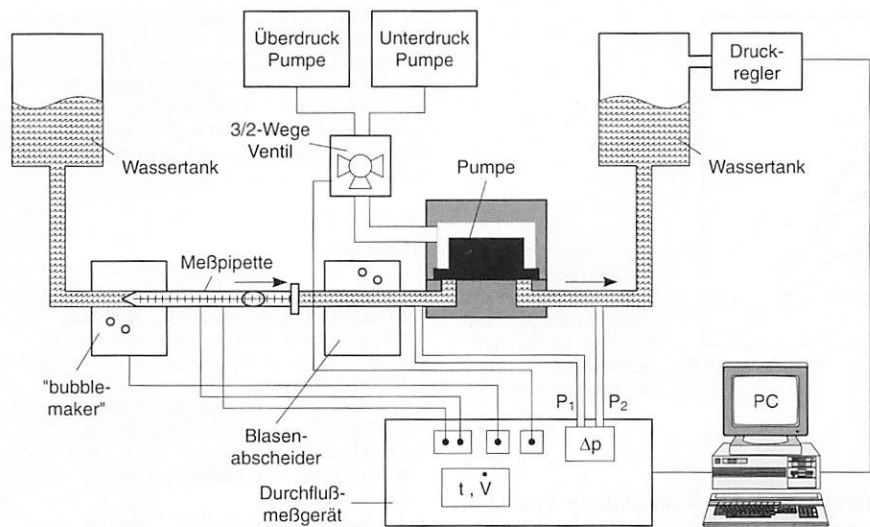


Bild 5. Schema des gesamten Meßsystems zur automatischen Erfassung von Druck-Durchflußkennlinien bei mikromechanisch hergestellten Pumpen mit externem pneumatischen Antrieb

stelle kann das Meßgerät auch mit einem PC gesteuert werden.

Fehlerbetrachtung

Der Fehler in der Bestimmung der Durchflußmenge setzt sich aus dem Fehler in der Zeitmessung und dem Fehler in der Volumenbestimmung zusammen:

$$\Delta \dot{V} = \frac{1}{t} \cdot \Delta V + \frac{V}{t^2} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Am größten ist der Fehler, wenn die Zeitmessung an der unteren Grenze liegt ($t_u = 6$ s). Zur Überprüfung der Rechnung und zur Kalibration wurde das Meßsystem an eine medizintechnische Spritzenpumpe angeschlossen. Die Abweichung zum eingestellten Fluß an der Spritzenpumpe war immer kleiner zwei Prozent. In der Tabelle sind die errechneten und ermittelten Werte zusammengefaßt.

PC ermöglicht Automatisierung

Über die RS232-Schnittstelle können die eingesetzte Meßpipette, die Länge der Luftblase, die eingestellte Antriebsfrequenz und das Ein- und Ausschalten dieser Frequenz programmiert und ausgelesen werden. Außerdem läßt sich durch das Auslösen einer Luftblase die Messung starten. Ein zur Verfügung stehendes Statuswort zeigt das Ende einer Messung, deren Zeitdauer und den zugehörigen Volumenfluß an. Dies er-

möglicht die Antriebssteuerung der Bauelemente und die Durchflußmessung auf elegante Weise. Zur Automatisierung der Druckmessung und der Ansteuerung des Gegendrucks kommt eine AD/DA-Wandlerkarte (Keithley DAS1600) zum Einsatz. Die Karte erfaßt die Analogspannung der Differenzdrucksensoren während der Messung und mittelt die Spannung über den Meßzeitraum.

Mit einer Analogspannung wird über einen Druckregler aus dem Hause Proemtec der gewünschte Druck erzeugt. Dieser Druck beaufschlagt den Flüssigkeitstank, in den die Mikropumpe das Fluid befördert. Dies ermöglicht, einen Gegendruck exakt einzustellen. Die beschriebene und in Bild 5 dargestellte Konfiguration ermöglicht die Durchflußmessungen an den verschiedensten – nicht nur mikromechanischen – Bauelementen.

Für die spezielle Anwendung zur Charakterisierung von Pumpen wurde das Meßsystem weiter ergänzt. So wird mit einem Laservibrometer der Firma Polytec die Auslenkung der Pumpmembran gemessen. Das Signal wird mit einem Speicheroszilloskop aufgezeichnet und über IEEE-Bus an den PC übergeben. Mit einer mathematischen Routine wird die Spitzenamplitude der Pumpmembranschwingung berechnet und mit abgespeichert. Aus diesem Spitze-Spitze-Wert läßt sich das verdrängte Pumpvolumen schnell berechnen. Durch Vergleich des Pumpvolumens pro Zeit mit dem gemessenen Fluß wird der Wirkungsgrad des Pumpvorgangs ermittelt.

Bild 6 zeigt die Bedienoberfläche der Software. Diese Oberfläche und die gesamte Steuerung des Meßsystems wurde mit Hilfe der Meßdatenerfassungssoftware Testpoint aus dem Hause Keithley, Germering, erstellt.

Für eine automatisierte Kennlinien-Messung können mehrere Parameter verändert werden. Es kann der Start- und der Enddruck sowie die Schrittweite eingestellt werden. In gleicher Weise läßt sich die Antriebsfrequenz der Pumpe verändern. Wird für den neuen Meßwert der Druck variiert, so kann eine entsprechend eingestellte Wartezeit gewährleistet, daß sich das Meßsystem zum Zeitpunkt der Messung in einem stationären Zustand befindet. Desweiteren können Messungen bei gleichen Parametern mehrfach wiederholt werden.

Die Software ermöglicht in einfacher Weise, die verschiedenen Bus-Kommunikationsformen zu integrieren. Die Programmstruktur von Testpoint erlaubt für die einzelnen Geräte Objekte zu programmieren, in denen der gesamte Befehlssatz des Geräts vorhan-

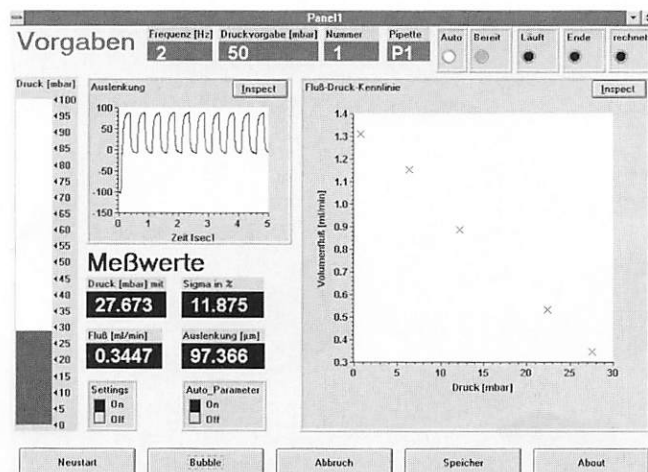


Bild 6. Bedienoberfläche des mit Testpoint erstellten automatisierten Steuerprogramms mit graphischer Darstellung der Meßwerte und des Meßstatus durch stilisierte LEDs
Bild: Keithley, Germering

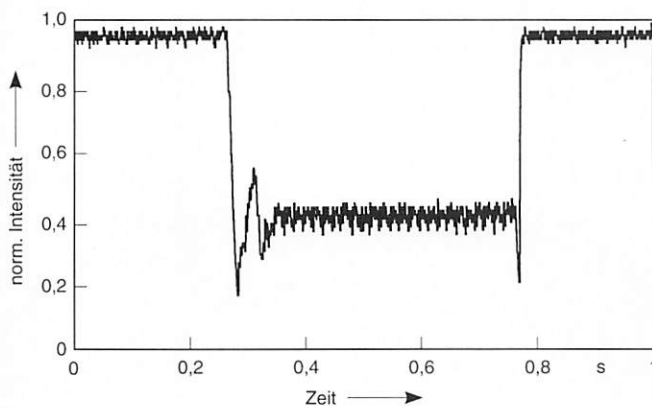


Bild 3. Signalkurve bei Durchgang einer Luftblase durch eine Lichtschranke. Der Signalabfall auf rund 50 Prozent beim Übergang Glas-Luft-Glas ist deutlich erkennbar

Z80C015 mit integrierter Peripherie. Die zugehörigen Routinen sind in der Programmiersprache C geschrieben.

Die Start- und Stopperkennung wird durch Lichtschranken realisiert. Die Sendedioden sind zur Unterdrückung von Fremdlichtstörungen mit 1 kHz moduliert. Das Ausgangssignal wird mittels Lichtwellenleiter (LWL) mit Kerndurchmesser 0,3 mm zur Meßpipette geführt. In der Pipette wird es entsprechend dem Medium gedämpft und über einen andere LWL zur Empfängerdiode zurückgeleitet.

Die Dämpfung des Signals ist für die Übergänge Glas-Wasser-Glas oder Glas-Luft-Glas (Luftblase) unterschiedlich. Nach der Fresnel'schen Formel [4]

$$\rho_x = \left[\frac{n'_x - n_x}{n'_x + n_x} \right]^2 \quad (1)$$

ist der Verlust beim Übergang von Glas-Wasser rund 0,3 Prozent, während der Verlust beim Übergang von Glas-Luft etwa vier Prozent beträgt. Durch die größere Strahlaufweitung beim Übergang Glas-Luft im Verhältnis zu

Glas-Wasser wird der Anteil der von der Empfängerfaser aufgenommenen Lichtintensität beim Durchgang einer Luftblase weiter verringert. Beide Effekte führen rechnerisch zu einer Intensitätsverringerung beim Durchgang einer Luftblase von etwa 50 Prozent. Dies stimmt mit dem in Bild 3 dargestellten, gemessenen Signalverlauf gut überein.

Tabelle. Technische Daten des Meßsystems und Fehlerbetrachtung

Pipette	2 ml	0.5 ml	0.1 ml
Meßvolumen [µl]	500	126.48	30.60
Meßbereich [µl/min]	80–5000	15–1200	3–300
theor. max. Fehler [% v. M.]	1.6	1.8	1.9
Reproduzierbarkeit [% v. M.]	< 1	< 1.4	< 1.9

Das Empfängersignal wird nach einer Vorverstärkung und nach einem Bandpaß mit 1 kHz Mittenfrequenz in einem Komparator mit einer Schwellenspannung verglichen und erzeugt beim Übergang Wasser-Luft einen Interrupt am Mikrocontroller. Mit diesem

Interrupt wird die Zeitmessung getriggert. Die Einstellung der Schwellenspannung ist über zwei Potentiometer von der Frontplatte aus möglich.

Als Meßstrecke dienen handelsübliche Meßpipetten. Die Lichtschranken sind in einem konstanten Abstand von 43,7 mm angeordnet, wodurch das Meßvolumen V in der Pipette bestimmt ist. Somit läßt sich der Volumenstrom \dot{V} durch die Laufzeitmessung einer Luftblase in der Meßstrecke berechnen:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Um die Meßzeit t in sinnvollem Rahmen zu halten, wurden als Grenzen $t_0 = 10$ min und $t_u = 6$ s angesetzt. Unter Verwendung einer 2 ml-Pipette erhält man einen Meßbereich von 80 µl/min bis 5 ml/min. Durch die Verwendung von kleineren Pipetten (0,5 ml und 0,1 ml) kann der Meßbereich bis auf 3 µl/min erweitert werden. Nimmt man längere Meßzeiten in Kauf oder verkürzt man die Meßstrecke, so können auch

noch kleinere Flüsse gemessen werden. Zur Luftblasengenerierung ist im Meßgerät eine Membranpumpe eingebaut, die einen konstanten Ausgangsdruck erzeugt. Über ein Magnetventil wird durch diesen Ausgangsdruck eine Luftblase in die Meßstrecke eingebracht. Die zur Messung eingebrachte Luftblase wird nach der Meßstrecke mit einem Blasenabscheider wieder aus der Flüssigkeit entfernt.

Zur Messung des Druckabfalls an den Bauteilen sind im Meßgerät zwei Drucksensoren mit den Bereichen 0–69 mbar und 0–1000 mbar integriert. Die Druckwerte werden auf einer Anzeige dargestellt und stehen als analoge Ausgangsspannungen zur Verfügung. Für den Antrieb der mikromechanischen Pumpen besitzt das Gerät zusätzlich einen Leistungsausgang mit steuerbarer Frequenz.

Das am IMIT entwickelte Meßgerät kann als Stand-alone-Gerät (Bild 4) benutzt werden, da alle Funktionen über eine Tastatur bedient werden können. Über eine integrierte RS232-Schnitt-

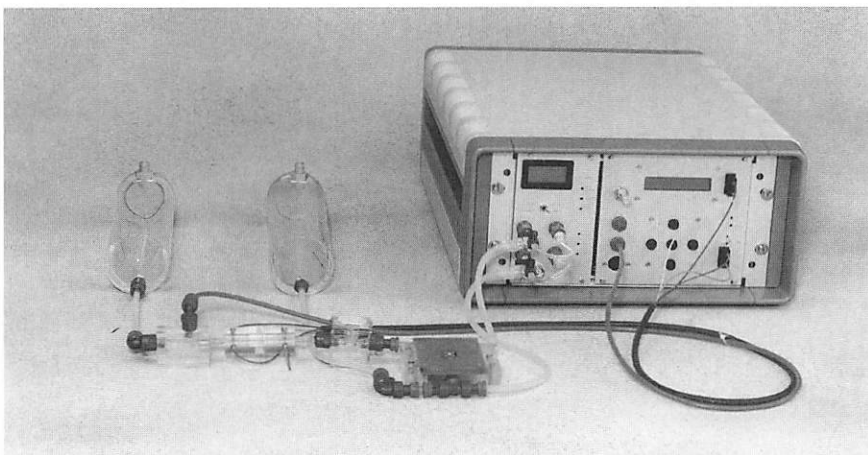


Bild 4. Darstellung des gesamten Meßsystems als Stand-alone-Gerät (rechts) mit der Meßstrecke

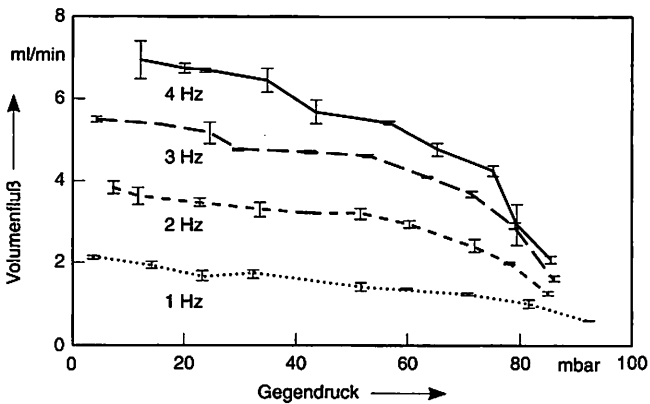


Bild 7. Kennlinien einer Mikropumpe bei unterschiedlichen Antriebsfrequenzen, die mit dem Meßsystem automatisiert aufgenommen wurden

den ist. Diese Befehle können dann mit nur einer Befehlszeile oder mit der Maus in andere Meßprogramme integriert werden.

Fazit

Das Meßsystem in seiner momentanen Ausführung ermöglicht die Erfassung von Volumenflüssen im Bereich von rund 1 µl/min bis etwa 5 ml/min mit einem Fehler kleiner zwei Prozent vom Meßwert. Gleichzeitig können Differenzdrücke von Flüssigkeiten bis zu 1 bar mit ±1 mbar Fehler gemessen werden. Durch Verkürzung der Meß-

strecke und der Verwendung von kleineren Meßpipetten könnte der Meßbereich noch um eine Größenordnung nach unten erweitert werden.

Nachteile bei herkömmlichen Meßarten (beispielsweise der Wägetechnik), wie hohe Störanfälligkeit durch Erschütterungen und der enorme Zeitaufwand, werden durch das vorgestellte Meßsystem weitgehend umgangen. Insbesondere durch die Automatisierung muß die Messung nicht ständig durch einen Operator überwacht werden. Mit diesem Meßsystem konnte die Dauer der vollständigen Charakterisierung einer Mikropumpe von mehreren Tagen bei manueller Messung auf vier Stunden reduziert werden.

Die Mikropumpen, -ventile und -schalter sowie deren Antriebe wurde im Rahmen des durch das Land Baden-Württemberg geförderten Verbund-Projekts »Mikroaktoren« entwickelt. Die Autoren bedanken sich bei Herrn Straatman für viele hilfreiche Ideen und die Unterstützung bei der Entwicklung des Meßsystems.

Literatur

- 1. M. Freygang, H. Glosch, H. Haffner, S. Messner, Dr. B. Schmidt, H. Straatman: Characterization of a valve as a part of an active driven pump, Actuator 94, Bremen, VDI/VDE Verlag, 1994.
- 2. H. Sieglösch: Technische Fluidmechanik Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1984.
- 3. O. Fiedler: Strömungs- und Durchflußmeßtechnik. Oldenbourg Verlag, München, 1992.
- 4. J. Jackson: Klassische Elektrodynamik. Walter de Gruyter, Berlin, 1983.

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Phys. Michael Freygang, Jahrgang 1964, studierte Physik an der Uni Tübingen. Seit 1992 arbeitet er am IMIT auf dem Gebiet der mikromechanischen Pumpen sowie der Schwingungsmeßtechnik.
Dipl.-Ing. Hartmut Glosch, Jahrgang 1958, ist Werkzeugmacher und studierte Physikalische Technik an der FH Heilbronn. Seit 1993 ist er am IMIT für elektrische Meßtechnik und Software zuständig.
Dipl.-Ing. Jürgen Merz, Jahrgang 1964, ist Elektrotechniker und seit 1990 am IMIT beschäftigt. Er arbeitet im Bereich Elektronische Steuerungen. (10548)

Alle nicht gekennzeichneten Bilder: IMIT