

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5895

**Entwicklung eines
miniaturisierten fluidischen
Oszillators zur Ansteuerung
fluidischer Aktoren für die
minimalinvasive Medizintechnik**

U. Gebhard, H. Hein
Institut für Mikrostrukturtechnik

Juli 1997

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5895

**Entwicklung eines miniaturisierten fluidischen Oszillators zur
Ansteuerung fluidischer Aktoren für die minimalinvasive
Medizintechnik**

U.Gebhard*, H.Hein

Institut für Mikrostrukturtechnik

* von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe
genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1997

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines flüssigkeitsbetriebenen Mikro-Oszillators, der als Antriebs- und Ansteuereinheit eines miniaturisierten doppeltwirkenden Zylinders mit Kolben (Mikro-Linearaktor) verwendet werden kann, dargestellt. Die Motivation für diese Entwicklung ergab sich aus einem Konzept des von der Europäischen Gemeinschaft geförderten ESPRIT-Projektes IMICS, das ein aus Oszillator und Linearaktor mit Werkzeug aufgebautes Mikrosystem als therapeutische Komponente eines Herzkatheters vorsieht. Zusätzlich zur Entwicklung des Mikro-Oszillators wird ein Mikro-Linearaktor vorgestellt sowie ein aus Oszillator und Linearaktor modular aufgebautes Mikrosystem beschrieben.

Es wird zunächst die experimentelle Untersuchung eines wasserbetriebenen, miniaturisierten bistabilen Wandstrahlelementes beschrieben. Ziel dieser Untersuchung war die Überprüfung der Realisierbarkeit eines flüssigkeitsbetriebenen, miniaturisierten fluidischen Oszillators. Mit Hilfe einer Finite Elemente Methoden (FEM) Simulation eines Oszillatormodells, dessen Abmessungen sich an denen des Wandstrahlelementes orientieren, wird dieses Ergebnis dann bestätigt. Durch eine Variation des Volumenstroms und die Skalierung der Oszillatorgeometrie werden der Betriebsbereich des fluidischen Mikro-Oszillators und die Beeinflussungsmöglichkeiten der Frequenz numerisch bestimmt.

Es wird dann die experimentelle Oszillator-Designentwicklung dargestellt. Diese unterteilt sich in die Untersuchung von verschiedenen Strahlablenelementen mit einfachem Rückführungskanal und die Untersuchung von fluidischen Oszillatoren mit verschiedenen Steuerräumen. Diese feinmechanisch aus PMMA gefertigten Strukturen besitzen Versorgungsdüsenweiten von 500 μm und Strukturhöhen von 2500 μm . Es werden zunächst Funktionstests mit Stickstoff als Arbeitsfluid beschrieben. Im Anschluß daran werden die Strukturen unter Verwendung von deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid charakterisiert.

Das so ermittelte Oszillatordesign wird dann verkleinert. Es wird das Betriebsverhalten eines weiteren feinmechanisch hergestellten Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 300 μm und einer Strukturhöhe von 1500 μm untersucht, wodurch die Funktionsfähigkeit eines miniaturisierten Oszillators nachgewiesen wird. Außerdem wird erstmals ein als Primärstruktur aus PMMA in LIGA-Technik gefertigter Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 100 μm und einer Strukturhöhe von 500 μm präsentiert. Bei der Verwendung von Wasser als Arbeitsfluid werden für diesen Mikro-Oszillator Frequenzen zwischen 250 und 400 Hz für Volumenströme von 2 bis 5 ℓ/h ermittelt. Der numerisch bestimmte lineare Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Volumenstrom wird experimentell verifiziert. Das Betriebsverhalten des in LIGA-Technik gefertigten Mikro-Oszillators ist durch eine geringe Oberflächenrauigkeit sowie eine sehr symmetrische Geometrie der Struktur stabil und reproduzierbar.

Mit diesem Mikro-Oszillator und dem Mikro-Linearaktor wird dann ein Mikrosystem aufgebaut, mit dem fluidische Strömungsenergie in mechanische Energie, in Form einer oszillierenden translatorischen Kolbenbewegung umgewandelt werden kann. Die prinzipielle Betriebsfähigkeit dieses Mikrosystems bei der Verwendung von Wasser wird experimentell nachgewiesen. Es wird somit die Verwendbarkeit des entwickelten fluidischen Mikro-Oszillators als Antriebs- und Ansteuereinheit eines Linearaktors bestätigt. Mit einer Kolbenbewegung ab einem Versorgungsdruck von 700 hPa und einem Volumenstrom von 1.6 ℓ/h , entspricht der ermittelte Betriebsbereich weiteren Vorgaben des IMICS-Projektes.

Development of a Miniaturized Fluidic Oscillator to Control Fluidic Actuators for Minimally Invasive Therapy

This thesis describes the development of a liquid-driven micro-oscillator that can be used as a driving and controlling unit for a miniaturized double-acting piston unit (micro-linear actuator). This research was motivated and supported by the European Community sponsored ESPRIT Project IMICS, which outlines a microsystem consisting of an oscillator and a linear actuator equipped with a tool as a therapeutical component of a cardiac catheter.

The development of the micro-oscillator as well as a micro-linear actuator are presented and a modularly build microsystem consisting of these two components is described.

The thesis first describes experiments with a water-driven, miniaturized, bistable wall attachment amplifier. The aim of the experiments was to verify the feasibility of a liquid-driven, miniaturized fluidic oscillator.

Confirmation was obtained by means of an FEM-simulation of an oscillator model with dimensions derived from those of the wall attachment amplifier. The operating range of the fluidic micro-oscillator and the possibilities to influence its frequency were determined numerically by varying the volume flow and scaling the oscillator geometry.

Following is the description of the experimental development of the oscillator design, which comprised the examination of various beam deflection elements with simple feedback channels and of fluidic oscillators with different control chambers. These structures were precision made of PMMA. Their supply nozzle is 500 μm in width and their structural height is 2500 μm . A description of functional tests using nitrogen as a working fluid is followed by a characterization of the structures when deionized water is used.

The oscillator design thus obtained was then miniaturized. By examining another precision made oscillator with a supply nozzle of 300 μm in width and a structural height of 1500 μm , the functionality of a miniaturized oscillator was proven. Furthermore, an oscillator made of PMMA is presented which for the first time was fabricated using the LIGA-technique. This oscillator has a supply nozzle of 100 μm in width and a structural height of 500 μm . Frequencies between 250 and 400 Hz and volume flows between 2 and 5 ℓ/h were determined for this micro-oscillator when using water as a working fluid. The linear correlation of frequency and volume flow determined numerically was verified experimentally. The functional behavior of the micro-oscillator made using the LIGA-technique is stable and reproducible owing to low surface roughness and the very symmetrical geometry of the structure.

By combining this micro-oscillator and the micro-linear actuator a microsystem was then realized in which fluidic energy was converted into mechanical energy in the form of an oscillating translatory piston movement. Experiments show that this microsystem, when operated with water, can be employed as a driving and controlling unit of a linear actuator. With a piston movement from 700 hPa upwards and a volume flow of 1.6 ℓ/h , the determined operational range corresponds to further stipulations of the IMICS project.

INHALT

Einleitung	1
1. Mikro-Wandstrahlelemente zur Ansteuerung fluidischer Aktoren	4
1.1 Hydraulische Mikro-Wandstrahlelemente (WSE)	4
1.1.1 Funktionsprinzip, Herstellung und Design	4
1.1.2 Experimentelle Untersuchungen	7
1.2 Entwicklung eines fluidischen Mikro-Linearaktors (LA)	13
1.2.1 Funktionsprinzip, Design und Herstellung	13
1.2.2 Experimentelle Untersuchungen	16
1.3 Charakterisierung des fluidischen WSE-LA- Mikrosystems	18
1.3.1 Aufbau des Mikrosystems	18
1.3.2 Betriebsverhalten	19
2. Numerische Simulation fluidischer Oszillatoren	23
2.1 Funktionsprinzip und Entwurf des fluidischen Oszillators	23
2.2 Durchführung der Finite Elemente Simulationen	25
2.3 Ermittlung des Betriebsbereichs des Oszillators	28
2.4 Skalierungsuntersuchungen unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze	34
3. Experimentelle Oszillator-Designentwicklung	39
3.1 Meßtechnik	40
3.2 Untersuchungen zur Gestaltung der Rückkopplung	44
3.2.1 Strahlelemente mit einfacher Rückkopplung	44
3.2.2 Experimentelle Ergebnisse	46
3.3 Untersuchungen zur Gestaltung des Steuerraumes	53
3.3.1 Fluidische Oszillatoren	53
3.3.2 Experimentelle Ergebnisse	56
4. Miniaturisierung des fluidischen Oszillators	65
4.1 Feinmechanisch gefertigte miniaturisierte Oszillatoren	66
4.1.1 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Stickstoff	67
4.1.2 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Wasser	69

4.2 Mikro-Oszillatoren in LIGA-Technik	71
4.2.1 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Stickstoff	72
4.2.2 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Wasser	74
5. Fluidisches Oszillator-Linearaktor-Mikrosystem	78
5.1 Aufbau des Mikrosystems	78
5.2 Betriebsverhalten	79
Zusammenfassung und Ausblick	84
Anhang	89
A.1 Konstruktionsdaten des Wandstrahlelementes und des Linearaktors	89
A.2 Konstruktionsdaten des fluidischen Oszillators der FEM-Simulation	94
A.3 Konstruktionsdaten der Strahlablenelemente	96
A.4 Konstruktionsdaten der experimentell untersuchten fluidischen Oszillatoren	100
Bezeichnungen	103
Literaturverzeichnis	106

Einleitung

Durch die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik konnte sich die Medizintechnik in den vergangenen Jahrzehnten entscheidend verändern. So waren früher Operationen üblich, die ein Öffnen des Körpers erfordern, während in jüngster Zeit in zunehmendem Maße minimalinvasive Operationsmethoden zum Einsatz kommen. Bei diesen Methoden wird durch eine kleine Öffnung im Körper ein für den jeweiligen Eingriff geeignetes, miniaturisiertes Werkzeug eingeführt und die Operation ohne direkten visuellen und tastenden Kontakt durchgeführt. Eine solche Operation ist für den Patienten wesentlich verträglicher, da ein Operationstrauma vermieden, postoperative Schmerzen vermindert und lange Heilungszeiten, die darüber hinaus sehr kostenintensiv sein können, deutlich reduziert werden.

Auch in der Herzchirurgie, deren wesentliches Betätigungsfeld die Behandlung koronarer Arteriosklerose ist, konnten neue Operationsmethoden entwickelt werden.

Bei koronarer Arteriosklerose kommt es durch Ablagerungen in den Herzkranzgefäßen zu einer Blut- und Sauerstoffunterversorgung des Herzmuskels, was einen unter Umständen tödlichen Herzinfarkt verursachen kann. Die bei diesem Krankheitsbild bisher üblichste Behandlungsmethode stellt die Bypass-Operation dar, bei der durch eine Transplantation von gesunden, körpereigenen Gefäßen eine Umgehung der erkrankten Herzkranzgefäße realisiert wird. Da bei dieser Operation ein Öffnen des Brustkorbes mit den weiter oben genannten Nachteilen unumgänglich ist, konzentriert sich die Entwicklung neuer Therapieformen auch hier auf minimalinvasive Operationsmethoden. Bei diesen Methoden wird ein Herzkatheder in das erkrankte Herzkranzgefäß eingeführt, an dessen Spitze ein geeignetes therapeutisches Instrument angebracht ist. Die bekannteste minimalinvasive Therapie in der Herzchirurgie ist die Ballondilatation, bei der ein an der Spitze des Katheters angebrachter Ballon expandiert, die Arterie entsprechend erweitert und der Blutfluß somit wieder vergrößert wird. Wesentlicher Nachteil dieser Methode ist die meist nur kurzzeitige Wirkung dieser Aufweitung, da die Dehnung der Gefäßwand nach gewisser Zeit nachläßt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der mechanischen Zerkleinerung der Ablagerungen, wobei zwei verschiedene Verfahren unterschieden werden. Bei der DCA-Methode (Directional Coronary Atherectomy) werden mit Hilfe eines rotierenden Schneidwerkzeugs weiche bis mittelharte Ablagerungen abgeschabt und in eine Kammer in der Katheterspitze geschoben. Bei der Rotablator-Methode wird ein mit Diamantsplittern besetzter, ebenfalls rotierender Schneidkopf zur Entfernung von harten bis sehr harten Ablagerungen eingesetzt und die abgefrästen Partikel über die Blutbahn ausgeschwemmt. Beide Verfahren haben den Nachteil, daß sich die Antriebsquelle des Werkzeugs außerhalb des Körpers befindet und das Drehmoment mit Hilfe einer langen, relativ starren Antriebswelle übertragen werden muß. Dadurch werden die Flexibilität des Katheters stark vermindert sowie große Reibungsverluste der Antriebswelle an der Innenwand des Katheterschafts erzeugt.

Die genannten minimalinvasiven Behandlungsmöglichkeiten der Herzchirurgie sind also alle nicht vollständig zufriedenstellend, weshalb auf diesem Gebiet weitere Forschungsarbeiten erforderlich sind, durch die neue Konzepte entwickelt und untersucht werden können.

Ein Herzkatheter, der Komponenten zum Abtrag koronarer Arteriosklerose, zur gleichzeitigen Beobachtung dieses Vorgangs mit Hilfe von Ultraschall sowie zur Positionierung der Katheterspitze in sich vereint, wird im Rahmen des von der EG geförderten ESPRIT-Projektes IMICS (Integration of Microcomponents in an Interventional Cardiac Catheter System) entwickelt. Wesentliche Neuerung ist dabei, daß neben den genannten Komponenten auch der Antrieb und die Ansteuerung des Abtragswerkzeugs in der Katheterspitze integriert werden sollen. Um die zum Antrieb eines Werkzeuges notwendigen Kräfte, welche in der Größenordnung einiger Millinewton liegen, in einer für den Patienten verträglichen Form zum

Werkzeug an der Katheterspitze zu bringen, sieht eines der Konzepte des IMICS-Projektes die fluidische Energieübertragung unter Verwendung einer biokompatiblen Flüssigkeit wie etwa physiologischer Kochsalzlösung vor. Neben den allgemeinen Anforderungen an die Dimensionierung der Komponenten, die durch die Abmessungen des menschlichen Gefäßsystems gegeben sind, darf in diesem Fall ein maximaler Versorgungsdruck von 20000 hPa sowie ein maximaler Volumenstrom von 1.8 l/h nicht überschritten werden.

Um die Ablagerungen in den Herzkranzgefäßen zu entfernen, ist neben der bisher üblichen rotierenden Bewegung der Abtragswerkzeuge, auch eine oszillierende, translatorische Bewegung, wie sie z.B. ein Hobel ausführt, denkbar. Ein solches linear arbeitendes Werkzeug wird durch einen wechselseitigen fluidischen Impuls angesteuert, der z.B. durch die Verwendung eines miniaturisierten bistabilen Wandstrahlelementes erzeugt werden kann. In einem solchen Element wird ein eintretender Fluidstrahl durch den sogenannten Coanda-Effekt zu einer Seite der symmetrischen Struktur hin abgelenkt und kann durch einen externen fluidischen oder elektrischen Steuerimpuls umgeschaltet werden. Durch die externe Ansteuerung wird die Komplexität eines Herzkatheters jedoch stark vergrößert, außerdem wurde die Funktion dieser Elemente bisher nur für die Verwendung von nichtbiokompatiblen, gasförmigen Medien nachgewiesen [Vol-94]. Eine interessante Weiterentwicklung des bistabilen Wandstrahlelementes stellt ein fluidischer Oszillator dar, der sich durch seinen einfachen und kompakten Aufbau auszeichnet. Ein fluidischer Oszillator ist ein Strömungselement, das aufgrund der speziellen Gestaltung seiner Strömungskanäle nur eine fluidische Versorgung benötigt, um an seinen beiden Ausgängen einen oszillierenden Volumenstrom zu erzeugen. Dieser oszillierende Volumenstrom wird durch ein internes Umschalten des eintretenden, abgelenkten Fluidstrahls erzeugt. Wird an die Ausgänge des fluidischen Oszillators ein geeigneter doppeltwirkender Zylinder mit Kolben angeschlossen, so kann ein System realisiert werden, das in der Lage ist, fluidische Strömungsenergie in mechanische Energie, in Form einer oszillierenden Translationsbewegung des Kolbens umzuwandeln. Dieser Kolben kann dann mit einem zum Abtrag der Ablagerungen geeigneten Werkzeug ausgestattet werden.

Die Entwicklung eines solchen miniaturisierten fluidischen Oszillators ist das Ziel dieser Arbeit. Dabei müssen die Vorgaben des IMICS-Projektes berücksichtigt und die geplante Verwendung des Oszillators als Antriebs- und Ansteuereinheit eines doppeltwirkenden Zylinders mit Kolben in die Entwicklung einbezogen werden. Da fluidische Oszillatoren bisher i.a. nur für rein fluidische Steuerungen oder als Sensoren verwendet wurden, stellt diese Verwendung des Oszillators eine Neuerung dar, die zusätzlich den Entwurf eines geeigneten Linearaktors erfordert. Eine weitere Aufgabe besteht in der Entwicklung einer sinnvollen konstruktiven Gestaltung der Ankopplung der beiden Komponenten.

In dieser Arbeit wird zunächst ein wasserbetriebenes, miniaturisiertes bistabiles Wandstrahlelement experimentell untersucht. Dadurch kann die prinzipielle Verwendbarkeit von Flüssigkeiten zum Betrieb miniaturisierter fluidischer Elemente überprüft und die voraussichtliche Betriebsfähigkeit sowie der Betriebsbereich eines miniaturisierten fluidischen Oszillators abgeschätzt werden. Es wird der zur Ansteuerung durch den fluidischen Oszillator entworfene Linearaktor als Einzelkomponente vorgestellt und ein aus Wandstrahlelement und Linearaktor modular aufgebautes Mikrosystem beschrieben, an dem exemplarisch die Gestaltung der Ankopplung der beiden Komponenten untersucht wurde.

Die numerische Verifikation der Oszillationsfähigkeit eines wasserbetriebenen, miniaturisierten fluidischen Oszillators erfolgt dann über die Durchführung einer Finite Elemente Methoden (FEM) Simulation. Dabei wird auch die mögliche Beeinflussung der

charakteristischen Betriebsgrößen wie Volumenstrom, Ausgangsdruckdifferenz und Frequenz zwecks einer Anpassung des Oszillators an den Linearaktor numerisch untersucht.

Die Designentwicklung des Oszillators erfolgt experimentell, wobei zunächst die optimale Gestaltung der Rückkopplung durch die Untersuchung von feinmechanisch gefertigten Strahlablenkelementen mit einfacher Fluidrückführung ermittelt wird. Die Festlegung des Designs des Steuerraums, in dem der eintretende Fluidstrahl mit dem rückgekoppelten wechselwirkt, erfolgt dann durch die experimentelle Untersuchung verschiedener ebenfalls feinmechanisch gefertigter fluidischer Oszillatoren.

Das so ermittelte Oszillatordesign wird miniaturisiert und der Mikro-Oszillator in LIGA-Technik [Bec-86] als Primärstruktur aus Polymethylmethacrylat (PMMA) hergestellt. Es folgt die experimentelle Untersuchung der Strukturen und die erstmalige Realisierung eines aus fluidischem Oszillator und Linearaktor aufgebauten Mikrosystems.

1. Mikro-Wandstrahlelemente zur Ansteuerung fluidischer Aktoren

Im Hinblick auf die Entwicklung eines modular aufgebauten wasserbetriebenen Mikrosystems, bestehend aus einer fluidischen Antriebseinheit mit interner Ansteuerung (fluidischer Oszillator) sowie einem fluidischen Aktor, wird zunächst ein Mikrosystem realisiert, das zwar einen fluidischen Antrieb besitzt, jedoch über eine externe Ansteuerung verfügt. Dieses Mikrosystem besteht aus einem bistabilen Wandstrahlelement und einem fluidischen Linearaktor. Die beiden Module werden zunächst einzeln hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens bei der Verwendung von Wasser charakterisiert (Kapitel 1.1 und 1.2). Im Anschluß daran wird der Aufbau der Kombination aus Wandstrahlelement und fluidischem Linearaktor dargestellt und das Betriebsverhalten des wasserbetriebenen Mikrosystems beschrieben (Kapitel 1.3).

Durch die Untersuchung dieses Mikrosystems können entscheidende technische Fragen schon vor der Entwicklung des Oszillators geklärt werden. So kann einerseits die Möglichkeit der Verwendung von Flüssigkeiten zum Betrieb miniaturisierter Fluidikelemente überprüft und der voraussichtliche Betriebsbereich eines miniaturisierten fluidischen Oszillators ermittelt werden. Andererseits ist es möglich, die konstruktive Gestaltung der Ankopplung zweier in LIGA-Technik hergestellter fluidischer Bauteile zu untersuchen, da hierzu bisher keine Forschungsergebnisse vorliegen.

1.1 Hydraulische Mikro-Wandstrahlelemente (WSE)

Die fluidische Antriebseinheit mit externer Ansteuerung liegt in Form eines miniaturisierten bistabilen Wandstrahlelementes vor, das ursprünglich für einen Betrieb mit Gasen entwickelt worden war [Vol-94]. Das miniaturisierte Wandstrahlelement wurde mit Methoden des LIGA-Verfahrens als Primärstruktur aus Polymethylmethacrylat (PMMA) hergestellt.

1.1.1 Funktionsprinzip, Herstellung und Design

Bistabile Wandstrahlelemente sind fluidische Halteglied-Steuerelemente ohne bewegte Teile, die mittels Steuersignalen zwischen zwei Ausgangszuständen hin und her geschaltet werden können. Abbildung 1.1 zeigt den schematischen Aufbau eines Wandstrahlelementes. Zur Erläuterung des Funktionsprinzips ist in das Wandstrahlelement ein Fluidstrahl eingezeichnet.

Der Strahl tritt durch die Versorgungsdüse gebündelt in das Element ein und legt sich aufgrund des Coanda-Effektes an eine der beiden Haftwände an. Danach strömt der Strahl durch den nachfolgenden Ausgang aus. Wird über die Steurdüse der angeströmten Haftwandseite ein Steuerimpuls auf den Versorgungsstrahl gegeben, kann sich der Strahl von der Haftwand ablösen und an die gegenüberliegende Haftwand anlegen. Da diese Haftzustände jeweils solange gehalten werden, bis sie durch einen Rückstellimpuls aufgehoben werden, können Wandstrahlelemente auch als fluidische Flip-Flops bezeichnet werden.

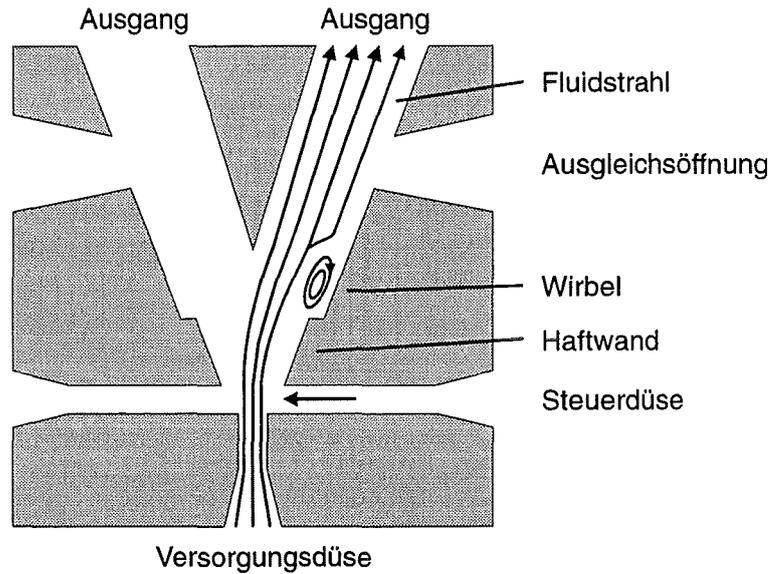


Abbildung 1.1 Funktionsprinzip eines Wandstrahlelements.

Neben der Versorgungsdüse, den beiden Ausgängen und den beiden Steuereingängen enthalten die hier beschriebenen Wandstrahlelemente noch zwei Ausgleichsöffnungen. Durch diese Ausgleichsöffnungen kann das Fluid ausströmen, wenn der angesteuerte Ausgang ganz oder teilweise geschlossen, d.h. belastet ist. Auf diese Weise kann ein mögliches Zusammenbrechen der Strömung verhindert und die Funktionsfähigkeit aufrecht erhalten werden.

Für das Haften des Fluidstrahls an der Haftwand sorgt der Coanda-Effekt. Er beruht auf der Fähigkeit eines Fluidstrahls, der in eine von Fluid gefüllte Umgebung eintritt, Umgebungsfluid aufgrund der Reibung mit sich zu reißen. Dadurch entsteht am Rand des Strahls ein Unterdruck, der durch nachströmendes Fluid aus der weiteren Strahlumgebung ausgeglichen wird. Nähert sich der Strahl durch geringfügige Schwankungen in seiner Lage einer der Haftwände des Wandstrahlelementes, so wird durch die Haftwand das Nachströmen von Fluid auf dieser Strahlseite behindert. Der sich am Strahlrand aufbauende Unterdruck kann nicht so schnell abgebaut werden wie der Unterdruck auf der gegenüberliegenden Strahlseite. Die Folge ist, daß der Strahl aufgrund des Druckgefälles quer zur Strömungsrichtung an die Haftwand gedrückt wird.

Bei dem untersuchten Wandstrahlelement befindet sich in der Haftwand ein Absatz, wodurch zwischen Strahl und Haftwand ein abgeschlossener Raum entsteht. In diesem Raum kann sich ein Wirbel ausbilden, wodurch die Haftlagenstabilität des Strahls an der Haftwand erhöht wird. Dabei verzweigt sich der Fluidstrahl am Auftreffpunkt auf die Haftwand und ein geringer Teil des Mediums strömt zurück, während entlang der Grenzfläche Wirbel/Fluidstrahl dieses zurückgestömte Fluid erneut mitgerissen wird (siehe Abbildung 1.1).

Für die hier beschriebene Untersuchung standen aus vorhergehenden Arbeiten verschiedene Wandstrahlelemente zur Verfügung, die sich bezüglich ihrer Düsengeometrie, der Gestaltung des Steuerraumes, des Haftwandwinkels, der Anzahl der Ausgleichsöffnungen bzw. einer Kombination dieser Variationen unterscheiden. Das Betriebsverhalten dieser Elemente wurde in den Arbeiten von Vollmer [Vol-93] und Fünér et al. [Fün-94] unter Verwendung gasförmiger Fluide numerisch und experimentell untersucht. Da die Zielsetzung dieser Arbeit

die Entwicklung eines zum Einsatz in der minimalinvasiven Medizintechnik geeigneten Mikrosystems ist, wurde das Betriebsverhalten der Elemente bei der Verwendung von deionisiertem Wasser charakterisiert. Deionisiertes Wasser entspricht bezüglich Dichte und Viskosität einer biokompatiblen Flüssigkeit wie etwa isotonischer Kochsalzlösung weitestgehend. Die Ergebnisse einer analytischen und experimentellen Untersuchung sämtlicher Elemente, die aus den oben genannten Arbeiten zur Verfügung standen, findet sich in [Dau-95]. An dieser Stelle sollen nur die Ergebnisse des Elementes dargestellt werden, das auf Grund seines geringen Druckverlustes sowie niedriger Steuerdrücke in dem in Kapitel 1.3 beschriebenen Mikrosystem zum Einsatz kommt.

Das Wandstrahlelement, dessen experimentelle Untersuchungsergebnisse in dieser Arbeit dargestellt sind (Abbildung 1.2), besitzt eine kontinuierliche Düse mit Düsenweite $34\ \mu\text{m}$ sowie einen Steuerraum, in dem die Steuerdüsen ($31\ \mu\text{m}$) senkrecht auf den Versorgungsstrahl treffen¹. Die Haftwände bilden mit der Symmetrieachse einen Winkel von 15° . An die Haftwände schließen sich Ausgleichsöffnungen an, die ein Aufrechterhalten der Strömung auch bei Belastung der Ausgänge gewährleisten sollen. Zwischen den beiden Ausgängen befindet sich eine Auskehlung in der sich bei Durchströmung des Elements ein Wirbel bildet, der die Stabilität des Strahls erhöht [Rec-76]. Der Durchmesser kreisförmige Abschluß der Ausgänge beträgt $800\ \mu\text{m}$.

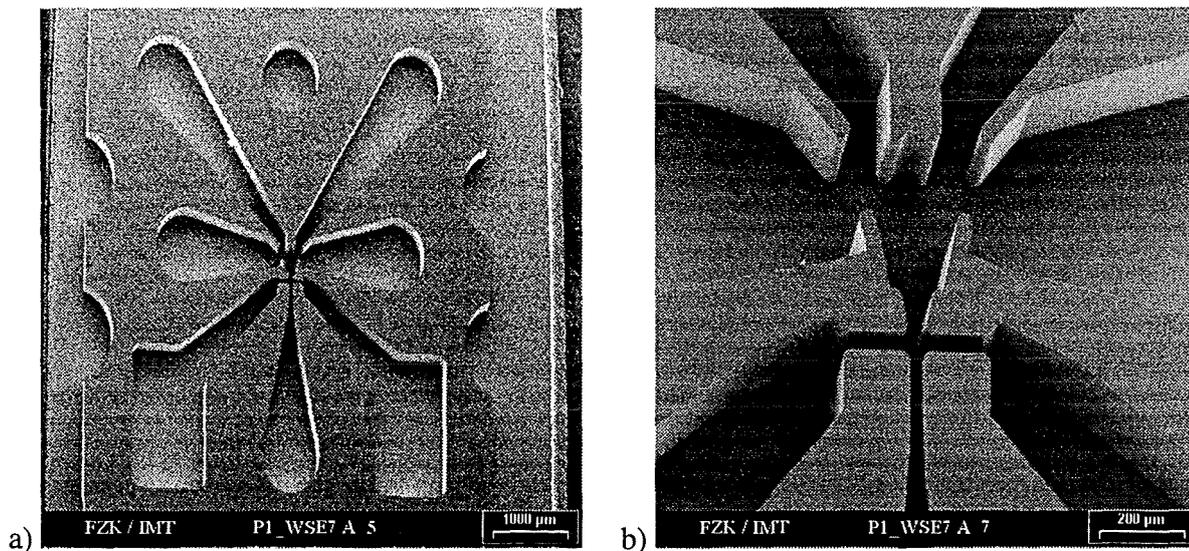


Abbildung 1.2 REM-Aufnahme des untersuchten Wandstrahlelementes.
a) Gesamtansicht des Wandstrahlelementes.
b) Funktionseinheit des Wandstrahlelementes.

Die Aussparungen in der äußeren Kontour des Elementes sind Positionierhilfen. Hier werden mit einem Laser Löcher in das Keramiksubstrat geschnitten, die der Aufnahme von Paßstiften dienen.

Das Element wurde mit einer Strukturhöhe von $250\ \mu\text{m}$ hergestellt, woraus sich für die Versorgungsdüse ein Aspektverhältnis von 8.9 ermitteln läßt. Laut Rechten [Rec-76] sind Fluidikelemente mit Aspektverhältnissen größer 5 herzustellen um eine Beeinflussung des Fluidstrahls durch Reibung an Boden und Decke des Elements vernachlässigen zu können.

¹ Die angegebenen Werte entsprechen am Lichtmikroskop ermittelten Meßwerten.

Die Gesamtabmessungen des Elementes betragen $5.75 \times 6 \text{ mm}^2$. Die exakten Geometriedaten des Elementes sind in Anhang A.1 aufgeführt.

1.1.2 Experimentelle Untersuchungen

Zur Untersuchung des Wandstrahlelementes wird ein Meßaufbau, wie er in Abbildung 1.3 dargestellt ist, verwendet.

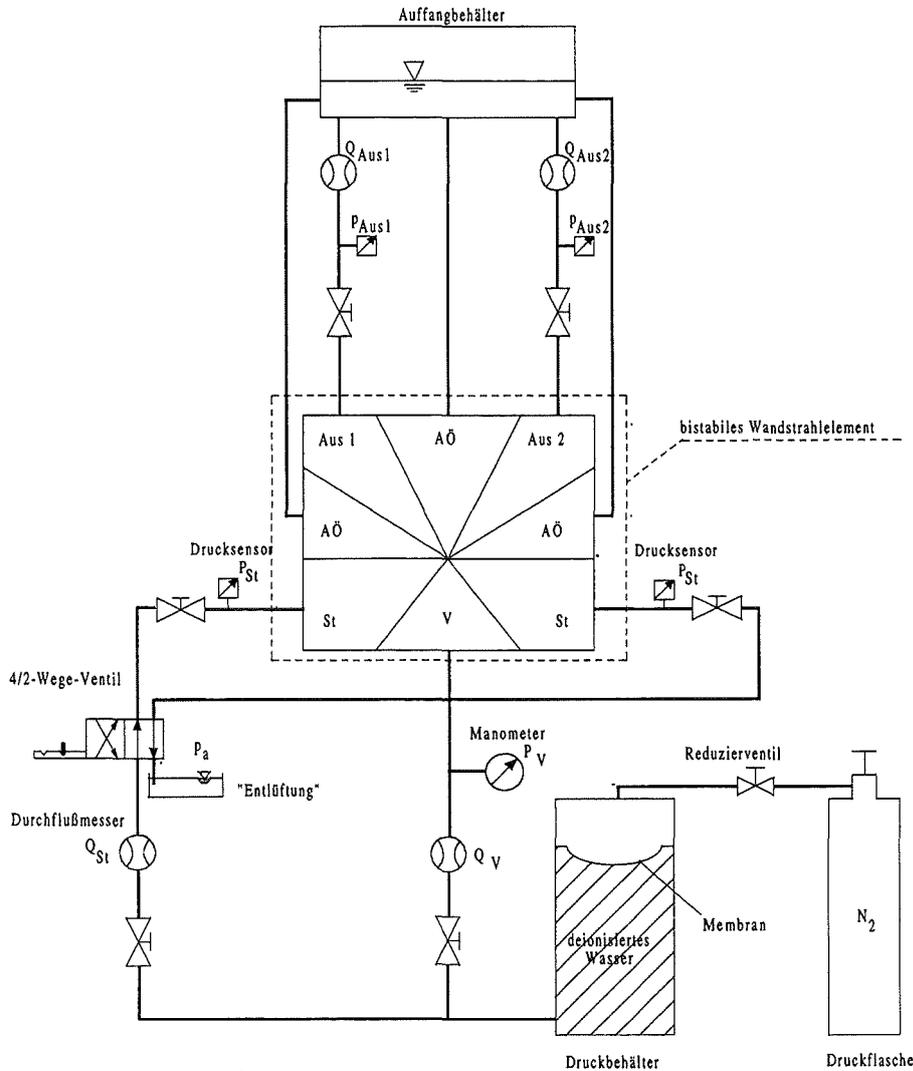


Abbildung 1.3 Meßaufbau zur experimentellen Untersuchung wasserbetriebener Wandstrahlelemente.

Im Druckbehälter trennt eine Membran die Flüssigkeit vom komprimierten Stickstoff aus der Druckflasche, um das Eindiffundieren von Stickstoff in das Wasser zu vermindern. Diese Eindiffusion kann bei der Versuchsdurchführung erhebliche Probleme bereiten, da der im Wasser gelöste Stickstoff bei der Durchströmung des Elementes und dem damit verbundenen Druckabfall ausgast und die entstehenden Blasen zu Querschnittsverengungen oder dem vollständigen Verschließen eines Strömungskanals führen kann.

Dem Druckbehälter ist in der Versorgungsleitung eine Drossel nachgeschaltet, welche eine Bestimmung der Versorgungskennlinie ermöglicht. Der Volumenstrom wird mit Hilfe eines

Schwebekörper-Durchflußmessers² bestimmt. Der Versorgungsdruck p_v wird mit einem Manometer ermittelt.

Mit Hilfe des 4/2-Wegeventils kann jeweils einer der beiden Steuereingänge beschaltet werden. Der andere Steuereingang ist „entlüftet“, das heißt er steht in direktem Kontakt zur Atmosphäre. Um den zum Schalten notwendigen Steuerdruck zu bestimmen, wird die Drossel in der Steuerleitung schrittweise geöffnet, so daß sich nacheinander mehrere dynamische Strömungsgleichgewichte einstellen. Auf diese Weise nähert man sich dem Schaltpunkt des Elementes, bis dieser erreicht ist. Die Beurteilung des Schaltens des Fluidstrahls erfolgt über die Beobachtung der Ausgänge des Wandstrahlelements, da an den Wandstrahlelementausgängen positionierte Sensoren eine Belastung des Elementes darstellen und das Ergebnis verfälschen würden. Der zum Schalten erforderliche Steuerdruck wird mit Hilfe von Drucksensoren³ bestimmt, da hier eine kurze Ansprechzeit der Meßinstrumente von Bedeutung ist. Die Bestimmung des Steuervolumenstroms erfolgt wieder unter Verwendung eines Schwebekörper-Durchflußmessers.

Durch vollständiges Verschließen des angesteuerten Ausgangs kann der maximale statische Ausgangsdruck, der zur Ansteuerung eines Linearaktors zur Verfügung steht, bestimmt werden. Durch Drosseln des beschalteten Ausgangs läßt sich die Ausgangskennlinie des Elementes bei einem vorgegebenen Versorgungsdruck ermitteln. Dabei ist der maximale Ausgangsvolumenstrom größer als der Versorgungsvolumenstrom, da der Fluidstrahl im Element Fluid aus den andern Elementöffnungen ansaugt. Das Verhältnis $Q_{\text{Ausgang}}/Q_{\text{Versorgung}}$ wird als Flußrückgewinn bezeichnet.

Zur Bestimmung des Ausgangsdrucks bzw. Ausgangsvolumenstroms werden wiederum Drucksensoren und Schwebekörper-Durchflußmesser verwendet.

Das aus dem Wandstrahlelement austretende Wasser wird in einem Auffangbehälter gesammelt.

Das Wandstrahlelement wird auf einem Sockel positioniert und erhält von oben über eine Anschlußplatte, in die Anschlußkanülen geklebt sind, die Fluidzuführung bzw. -abführungen. Dadurch können beim Ein- und Ausbau der Elemente durch in den Anschlußkanülen hängende Wassersäulen keine Luftblasen in das Element gelangen.

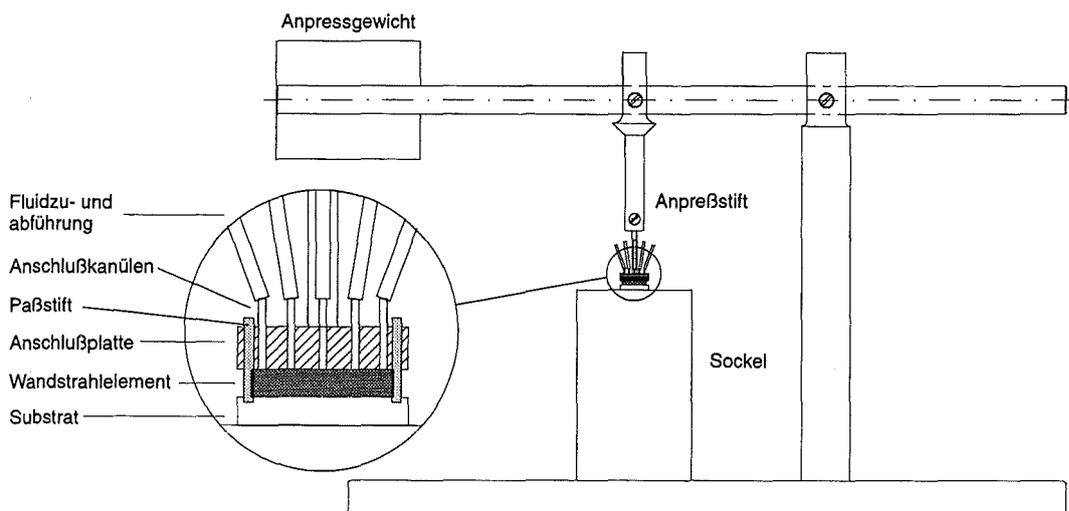


Abbildung 1.4 Anschlußtechnik des Wandstrahlelements mit Niederhalter.

² Fa. Krohne, Duisburg

³ Fa. Sensortechics, München

Neben den 8 Bohrungen zur Fluidführung befinden sich zwei weitere Bohrungen in der Anschlußplatte, die zur Aufnahme von zwei Paßstiften dienen, mit denen das Element justiert wird. Die entsprechenden Löcher im Substrat des Wandstrahlelements werden mit Hilfe eines Lasers erzeugt. Die Anschlußplatte wird mit einem Anpreßstift auf das Wandstrahlelement gepreßt. Abbildung 1.4 zeigt den Aufbau der gesamten Anschlußtechnik.

Wird zwischen Ein- und Ausgang des Wandstrahlelementes eine konstante statische Druckdifferenz angelegt, so stellt sich ein stationärer Strömungszustand ein. Durch Variation dieser Druckdifferenz bei gleichzeitiger Bestimmung des Volumenstroms kann die Versorgungskennlinie ermittelt werden, aus der das Strömungsverhalten des Elementes abgeleitet werden kann. Die experimentell ermittelte Versorgungskennlinie des Wandstrahlelements ist in Abbildung 1.5 dargestellt. Zur Verdeutlichung des Verlaufs wurde eine Fitfunktion eingezeichnet, der ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Versorgungsdruck und dem Volumenstrom in Form eines Polynoms zweiten Grades zugrunde gelegt wurde.

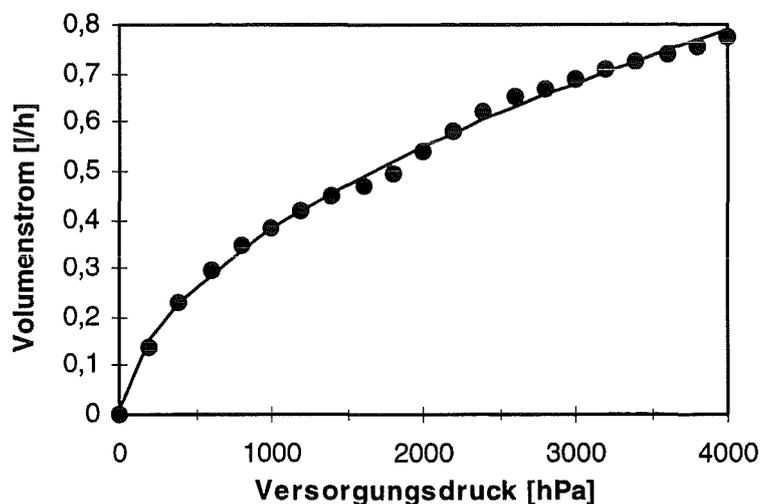


Abbildung 1.5 Versorgungskennlinie des Wandstrahlelements.

Die experimentell ermittelte Stufe in der Versorgungskennlinie ist auf Meßungenauigkeiten durch die bereits erwähnten, durch den Druckabfall im Wandstrahlelement bedingten Ausgasungen zurückzuführen. Durch kleinste an den Strukturwänden anhaftende Gasbläschen wird der Querschnitt der Strömungskanäle verringert, wodurch der Strömungsverlust steigt und der Volumenstrom durch das Wandstrahlelement abnimmt. Lösen sich die Bläschen und werden mit der Strömung abtransportiert, so steigt der Volumenstrom sprunghaft an, was in der Gesamtdarstellung der Messung als Stufe erscheint.

Um den Strömungszustand im Wandstrahlelement zu charakterisieren, wird gemäß Gleichung 1.1 die Reynoldszahl Re am Ausgang der Versorgungsdüse bestimmt.

$$Re = \frac{c \cdot d_h}{\nu} \quad (1.1)$$

Dabei ist c die mittlere Geschwindigkeit am Düsenausgang, die sich entsprechend Gleichung 1.2 bestimmen läßt (Q : Volumenstrom, A : Querschnittsfläche).

$$c = \frac{Q}{A} \quad (1.2)$$

Im untersuchten Versorgungsdruckbereich bis 4000 hPa wurden gemäß Abbildung 1.5 Volumenströme von maximal 0.78 ℓ/h gemessen. Die aus diesem Volumenstrom berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Düsenausgang beträgt 25.3 m/s. Der hydraulische Durchmesser d_h berechnet sich für einen rechteckigen Querschnitt entsprechend Gleichung 1.3 und beträgt im vorliegenden Fall 53.57 μm (U : benetzter Umfang).

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (1.3)$$

Mit der kinematischen Viskosität des Wassers $\nu = 1.004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ erhält man für den maximal gemessenen Volumenstrom Reynoldszahlen von maximal 1507.

Mit wachsender Reynoldszahl geht eine geordnete laminare Schichtenströmung in eine irreguläre turbulente Strömung über. Dieser Umschlag vollzieht sich bei einer voll ausgebildeten Strömung durch ein Rohr mit kreisrundem Querschnitt für Reynoldszahlen $Re \geq 2320$ [Zie-91]. Bei vielen fluidischen Mikrostrukturen ist es jedoch schwierig, diesen Übergang genau festzulegen, da die Länge der Mikrostruktur in Strömungsrichtung kürzer ist, als für eine voll ausgebildete Strömung nötig. In [Gra-93] wird für Mikrostrukturen, deren Länge L einen Wert zwischen der doppelten und der 50fachen Breite des hydraulischen Durchmessers beträgt, die Reynoldszahl, für die der Übergang der laminaren zur turbulenten Strömung erfolgt, mit $Re \geq 30 \cdot L/d_h$ angegeben. Erst für Strukturen, deren Längen mehr als das 100fache der Breite des hydraulischen Durchmessers beträgt, findet der Übergang bei einer Reynoldszahl von 2300 statt. Bei dem untersuchten Wandstrahlelement beträgt die Länge des Bereiches der Versorgungsdüse, bei dem der hydraulische Durchmesser einen Wert von $d_h = 53.57 \mu\text{m}$ annimmt, ca. 100 μm . Dies entspricht etwa dem doppelten hydraulischen Durchmesser, so daß der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung im Bereich von $Re \geq 60$ stattfinden sollte. Dieser Wert wird für Volumenströme größer 0.03 ℓ/h erreicht, so daß für den gesamten untersuchten Versorgungsdruckbereich näherungsweise von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden kann.

Im Hinblick auf die Verwendung des Wandstrahlelementes als Antriebs- und Ansteuereinheit eines fluidischen Aktors ist die kontrollierte Schaltbarkeit des Fluidstrahles auch bei Belastung des Wandstrahlelementes von Interesse. Die Belastung wurde dabei durch einen vollständig verschlossenen Ausgang simuliert, wobei das Fluid durch die Ausgleichsöffnungen entweichen konnte. Der ermittelte Mindestversorgungsdruck betrug 1750 hPa bei einem Volumenstrom durch das Wandstrahlelement von 0.49 ℓ/h. Bei geschlossenen Ausgleichsöffnungen war der Strahl über den gesamten Versorgungsdruckbereich nicht dauerhaft belastbar, was beim Entwurf des Linearaktors (Kapitel 1.2) zu berücksichtigen ist.

In Abbildung 1.6 sind die zum Schalten des Elementes notwendigen Steuerdrücke und Steuervolumenströme in Abhängigkeit vom Versorgungsdruck sowie die entsprechenden Ausgleichsgeraden dargestellt. Die Ungenauigkeiten der Messung sind auf die unzureichende Genauigkeit der Drucksensoren und Volumenstrommesser bei der Messung von Parametern dieser Größenordnung zurückzuführen. Darüber hinaus besteht bei der angewendeten Meßtechnik die Möglichkeit, daß zum Zeitpunkt des Schaltens des Strahles das dynamische Strömungsgleichgewicht noch nicht erreicht ist. Da die Beurteilung des Schaltens des

Fluidstrahles jedoch aus den bereits erwähnten Gründen nur über die Beobachtung der Ausgänge des Wandstrahlelementes erfolgte, war eine genauere Bestimmung der Verläufe nicht möglich. Aufgrund der zu erwartenden Dynamik des Schaltvorganges beim fluidischen Oszillator muß die Meßtechnik demnach entsprechend weiterentwickelt werden.

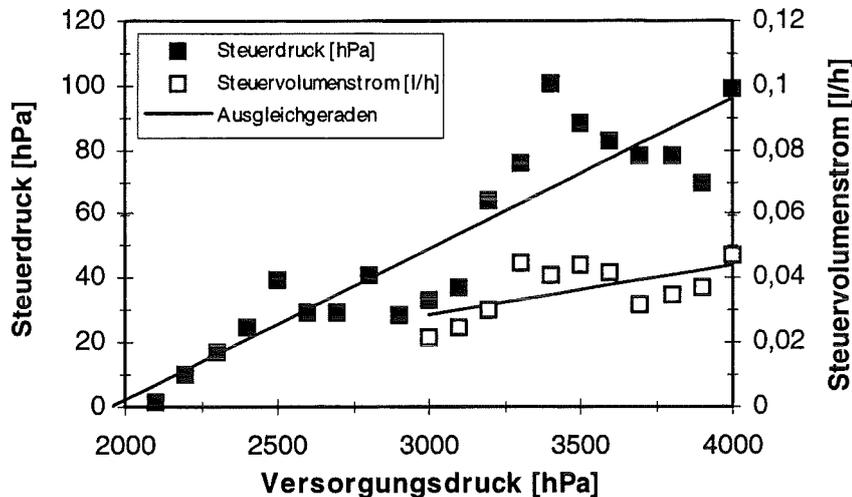


Abbildung 1.6 Steuerdrücke und Steuervolumenströme des Wandstrahlelementes.

Die durch Verschließen des beschalteten Ausgangs ermittelten maximalen statischen Ausgangsdrücke zeigt Abbildung 1.7. Sie stellen bei geeigneter konstruktiver Umsetzung den maximalen Druck dar, der zum Betreiben eines Aktors zur Verfügung steht. Den linearen Zusammenhang verdeutlicht die ebenfalls eingezeichnete, berechnete Ausgleichsgerade.

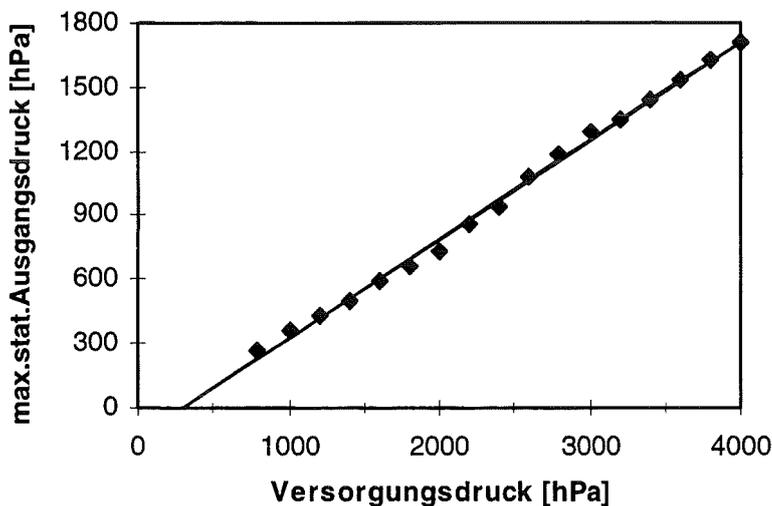


Abbildung 1.7 Maximale statische Ausgangsdrücke des Wandstrahlelementes.

Eine der Anforderungen des IMICS-Projektes sind Stell- bzw. Schneidkräfte des fluidischen Aktors in der Größenordnung einiger Millinewton. Mit Gleichung 1.5 und den maximalen statischen Ausgangsdrücken p des Wandstrahlelementes im Versorgungsdruckbereich, in dem der Fluidstrahl unter Belastung geschaltet werden kann (1750-4000 hPa), kann eine sinnvolle Kolbenquerschnittsfläche A ermittelt werden.

$$F = p \cdot A \quad (1.5)$$

Die maximalen statischen Ausgangsdrücke im relevanten Versorgungsdruckbereich betragen 650 - 1700 hPa. Bei einem in LIGA-Technik gefertigten fluidischen Aktor kann eine Strukturhöhe von 250 μm , wie sie auch beim Wandstrahlelement realisiert wurde, problemlos hergestellt werden. Um Schneidkräfte von 10 mN zu erzielen, muß die Kolbenbreite daher zwischen 235 und 615 μm betragen, woraus sich Kolbenquerschnittsflächen von 0.06 - 0.15 mm^2 ergeben. Dieses Ergebnis stellt eine weitere Eingangsgröße beim Entwurf des fluidischen Aktors (Kapitel 1.2) dar.

Die Ausgangskennlinie des Elementes, die sich durch Drosseln des Ausgangs ergibt, wurde exemplarisch für einen Versorgungsdruck von 3000 hPa ermittelt. Der gemessene Verlauf sowie ein zur Verdeutlichung berechnetes Polynom zweiten Grades sind in Abbildung 1.8 dargestellt.

Wie Abbildung 1.5 zu entnehmen ist, beträgt der in das Wandstrahlelement einströmende Volumenstrom bei einem Versorgungsdruck von 3000 hPa 0.69 ℓ/h . Der aus dieser Kennlinie maximal ermittelte Ausgangsvolumenstrom beträgt jedoch 0.92 ℓ/h , weshalb sich ein Flußrückgewinn von 133 % ermitteln läßt, d.h. der Versorgungsstrahl saugt 33 % seines Eigenvolumens aus den übrigen Elementöffnungen an.

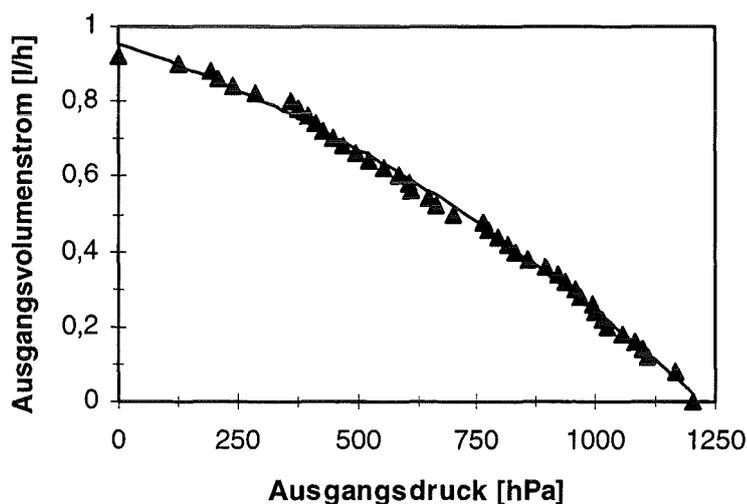


Abbildung 1.8 Ausgangskennlinie des Wandstrahlelementes für einen Versorgungsdruck von 3000 hPa.

Für Steuerdrücke in der Größenordnung von 50 hPa, wie sie zum Schalten des Strahles bei einem Versorgungsdruck von 3000 hPa erforderlich sind, sind Steuervolumenströme im Bereich von 0.03 ℓ/h notwendig (siehe Abbildung 1.6). Der Ausgangsvolumenstrom für einen Ausgangsdruck von 50 hPa beträgt jedoch ca. 0.9 ℓ/h , was dem 30fachen Wert entspricht. Dieser Wert wird auch als „Fan out“ bezeichnet und stellt eine charakteristische Kenngröße fluidischer Elemente dar [Rec-76]. Je größer der „Fan out“ eines fluidischen Elementes ist, desto geringer sind die auftretenden Strömungsverluste. Der Ausgangskennlinie kann also entnommen werden, daß mit diesem Wandstrahlelement weitere Elemente gleichen Typs geschaltet werden können.

Eine Selbststeuerung des Elementes, wie sie beim fluidischen Oszillator vorliegt, ist ebenfalls denkbar. In diesem Fall muß jedoch darauf geachtet werden, daß der Rückführkanal

keinen zu großen Druckverlust erzeugt und möglichst in den Bereich des Druckminimums mündet (siehe Kapitel 2.1).

Anhand der Untersuchungen des Wandstrahlelementes konnte also auf eine grundsätzliche Eignung von Flüssigkeiten zum Betrieb miniaturisierter Fluidikelemente geschlossen werden. Darüber hinaus konnten die mögliche Funktionsfähigkeit eines fluidischen Oszillators sowie die voraussichtlichen Versorgungsdrücke und die erreichbaren Volumenströme einer solchen Struktur abgeschätzt werden.

1.2 Entwicklung eines fluidischen Mikro-Linearaktors (LA)

Bei der Entwicklung des miniaturisierten fluidischen Oszillators zur Ansteuerung fluidischer Aktoren war es zusätzlich notwendig, einen geeigneten fluidischen Aktor zu entwerfen, herzustellen und zu testen. Dieser Aktor wurde an die technischen Anforderungen und die Abmessungen des Wandstrahlelementes angepaßt und kann jedoch auch zur Ansteuerung durch einen fluidischen Oszillator verwendet werden. Unter Berücksichtigung der Anforderungen des IMICS-Projektes, die eine translatorische Bewegung des fluidischen Aktors vorsehen, wurde ein Mikro-Linearaktor entworfen, der zunächst unabhängig vom Wandstrahlelement experimentell beim Betrieb mit Wasser untersucht wurde. Dabei erfolgte die Ansteuerung über ein elektromagnetisches Ventil. In einer späteren Untersuchung (Kapitel 1.3) wird dann das aus Wandstrahlelement und Linearaktor modular aufgebaute Mikrosystem charakterisiert.

1.2.1 Funktionsprinzip, Design und Herstellung

Aus dem Betriebsverhalten des Wandstrahlelementes lassen sich bestimmte Anforderungen an ein Linearaktordesign ableiten, die in der Form auch von einem fluidischen Oszillator zu erwarten sind. So setzt die Funktionsfähigkeit des Mikrosystems eine ständige Durchströmung des Wandstrahlelementes voraus, da sonst, wie in Kapitel 1.1 dargestellt, keine kontrollierte Strahl- bzw. Kolbenposition erreicht werden kann. Das aus Wandstrahlelement und Linearaktor aufgebaute Mikrosystem wurde im Hinblick auf eine möglichst geringe Bauhöhe so konzeptioniert, daß die Grundplatte des Linearaktors die Deckplatte des Wandstrahlelementes darstellt. Bei dieser Anordnung werden jedoch die Ausgleichsöffnungen des Wandstrahlelementes verschlossen. In der Struktur des Linearaktors müssen daher geeignete Ausgleichsöffnungen vorgesehen werden, die eine Durchströmung des Wandstrahlelementes bei jeder Kolbenstellung gewährleisten.

Das Wandstrahlelement benötigt darüber hinaus für einen Betrieb, bei dem es unter Belastung schaltbar ist, einen Mindestversorgungsdruck bzw. Volumenstrom. Die Strömungskanäle des Linearaktors dürfen daher nicht zu eng gewählt werden, damit dieser Mindestversorgungsdruck nicht durch den zusätzlichen Strömungswiderstand weiter erhöht wird.

Um einen modularen Stapelaufbau zu ermöglichen, müssen weiterhin die Dimensionierung und die Anordnung der Fluidzu- und abführungen des Linearaktors an das Design des Wandstrahlelements angepaßt werden.

Die beschriebenen Anforderungen wurden in verschiedene Linearaktordesigns umgesetzt, die sich durch die Geometrie ihrer Ausgleichsöffnungen unterscheiden. Die ausführliche Darstellung dieser Designs, des Herstellungsprozesses, sowie die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Linearaktoren finden sich in [Gün-96] und [Jus-96]. Zur Realisierung des in Kapitel 1.3 dargestellten Mikrosystems wurde aus den 5

Linearaktordesigns das Design ausgewählt, bei dem eine günstige Strömungsführung gewährleistet und ein Verkeilen des Kolbens am unwahrscheinlichsten ist. Die Ergebnisse der Untersuchung dieses Linearaktors sind im Folgenden dargestellt.

Das Funktionsprinzip des Linearaktors soll an Hand des in Abbildung 1.9 dargestellten Designs erläutert werden. Die Umformung der fluidischen Energie in eine translatorische Arbeitsbewegung erfolgt durch einen zentral angeordneten doppeltwirkenden Kolben (Länge 1000 μm , Breite ca. 445 μm , Höhe 250 μm), der sich in einer 450 μm breiten und 2000 μm langen Kolbenkammer frei bewegen kann. Da beide Kolbenflächen den gleichen Querschnitt besitzen, sind die Kolbenkräfte in beiden Bewegungsrichtungen gleich groß. Die Detektion der Kolbenbewegung erfolgt mit Hilfe zweier Lichtschranken, die in die Mikrostruktur integriert sind.

Die Fluidzuführung erfolgt von unten über die Ausgänge des Wandstrahlelementes bzw. bei einer unabhängigen Untersuchung des Linearaktors über eine Anschlußplatte. Dazu werden in das Keramiksubstrat mit einem Laser entsprechende Löcher geschnitten. Die Eingänge des Linearaktors werden abwechselnd mit Druck beaufschlagt und sind ständig geöffnet. Der Durchmesser der Eingänge beträgt 800 μm entsprechend den Ausgängen des Wandstrahlelements. Die Öffnung in Richtung des Kolbens ist 200 μm breit.

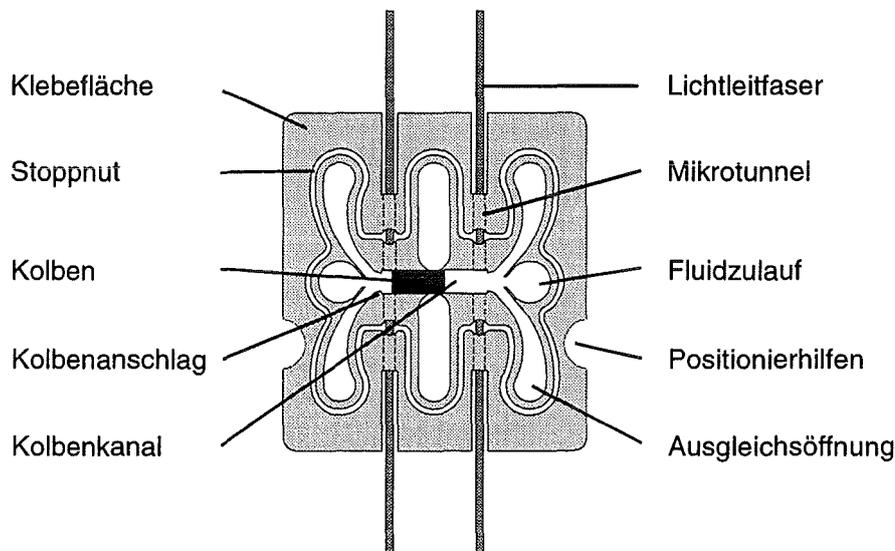


Abbildung 1.9 Design des Linearaktors.

Es wurden insgesamt 6 Ausgleichsöffnungen vorgesehen, wobei die seitlichen Ausgleichsöffnungen (siehe Abbildung 1.9) außerdem die Rückwirkung des Linearaktors auf das Wandstrahlelement verringern sollen, indem sie einen Teil des Fluids, das der sich bewegende Kolben vor sich herschiebt, aufnehmen. Die seitlichen und die mittleren Ausgleichsöffnungen betragen an ihrer engsten Stelle 200 μm und weiten sich auf 600 μm auf.

Um den Linearaktor paßgenau über dem Wandstrahlelement bzw. auf einer Anschlußplatte positionieren zu können, wurden wie schon beim Wandstrahlelement Positionierhilfen in Form von Aussparungen entlang der äußeren Kontur vorgesehen. In diese Aussparungen werden mit Hilfe eines Lasers Löcher in das Keramiksubstrat strukturiert, die der Aufnahme von Paßstiften dienen.

Nach oben wird der Linearaktor mit einer feinmechanisch gefertigten, aufgeklebten Deckplatte aus PMMA, die Bohrungen entsprechend den Ausgleichsöffnungen und Positionierhilfen besitzt, verschlossen. Damit während des Aufklebens des Deckels kein Klebstoff in den Linearaktor gelangen kann, wurde um die gesamte Funktionseinheit eine Stopfnut strukturiert. Die Vorgehensweise beim Aufkleben des Deckels ist ausführlich in [Maa-94] dargestellt.

Der gesamte Linearaktor besitzt laterale Abmessungen von $6500 \mu\text{m} \times 5750 \mu\text{m}$. Die Strukturhöhe beträgt $250 \mu\text{m}$. Die genauen Abmessungen des Linearaktors finden sich in Anhang A.1.

Das Aktorgehäuse wird zusammen mit mehreren Kolben als galvanisierte Kupferstruktur in LIGA-Technik auf einem Keramiksubstrat hergestellt.

Um die Kolben später vom Substrat lösen zu können, wird neben der LIGA-Technik die sogenannte Opferschichttechnik [Moh-91] angewandt. Dabei werden das Aktorgehäuse und der Kolben auf einer teilweise entfernten Opferschicht galvanisiert. Die Opferschicht wird mit optischer Lithographie so vorstrukturiert, daß die Kolben durch Ätzen der Opferschicht abgelöst werden können, während das Gehäuse auf dem Substrat verbleibt. Durch diese Technik sind die Kolben etwa $5 \mu\text{m}$ niedriger als das Gehäuse, wodurch ein ausreichendes Spiel des Kolbens im Linearaktor gewährleistet wird.

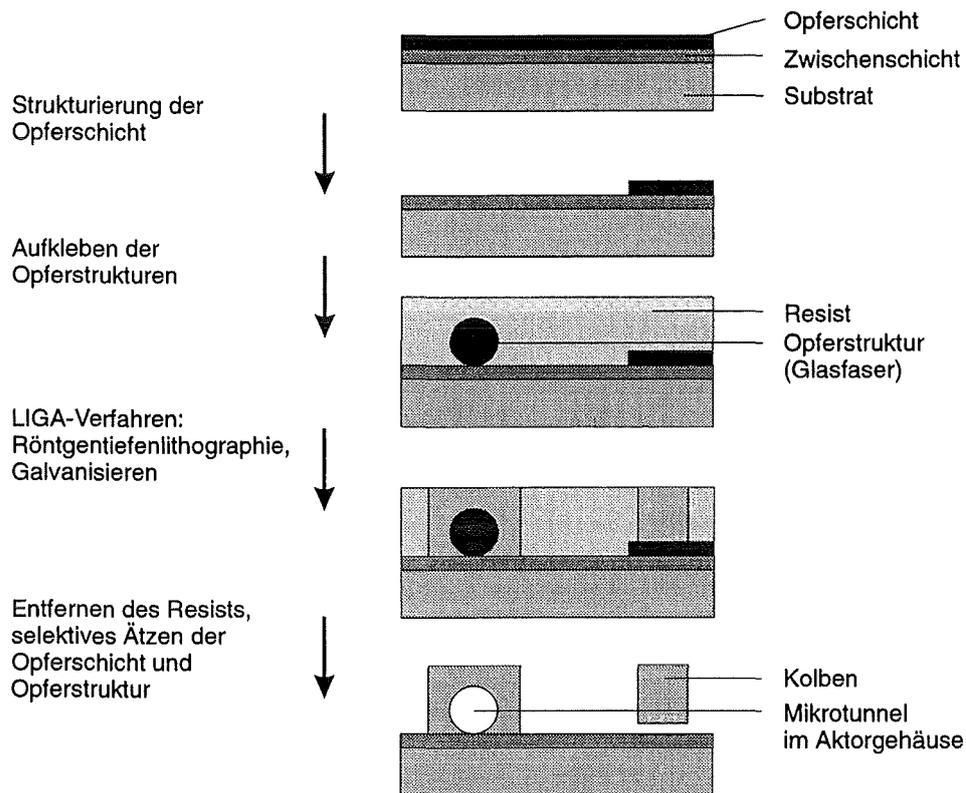


Abbildung 1.10 Übersicht über den Herstellungsprozeß des Linearaktors.

Die Mikrotunnel, die für die Montage der Lichtschranken d.h. der Glasfasern notwendig sind, werden mit der ebenfalls in die LIGA-Technik integrierten Opferstrukturtechnik [Rut-95] erzeugt. Auf die vorstrukturierte Opferschicht werden Glasfasern aufgeklebt, die so positioniert sind, daß sie später in die Galvanikstruktur eingebettet sind. Während des Ätzens

der Opferschicht werden sie ebenfalls entfernt, wodurch vier Mikrotunnel mit Durchmessern entsprechend dem der aufgeklebten Glasfasern ($140\ \mu\text{m}$) entstehen. Für die beiden Lichtschranken werden dann Glasfasern mit einem etwas kleineren Durchmesser ($125\ \mu\text{m}$) verwendet, die in die Mikrotunnel eingeklebt werden, so daß ihre Stirnseiten mit den Kolbenkammerwänden abschließen. Eine Übersicht über den Herstellungsprozeß gibt Abbildung 1.10.

Abbildung 1.11 zeigt eine REM-Aufnahme des Linearaktors mit eingelegtem Kolben und Glasfasern.

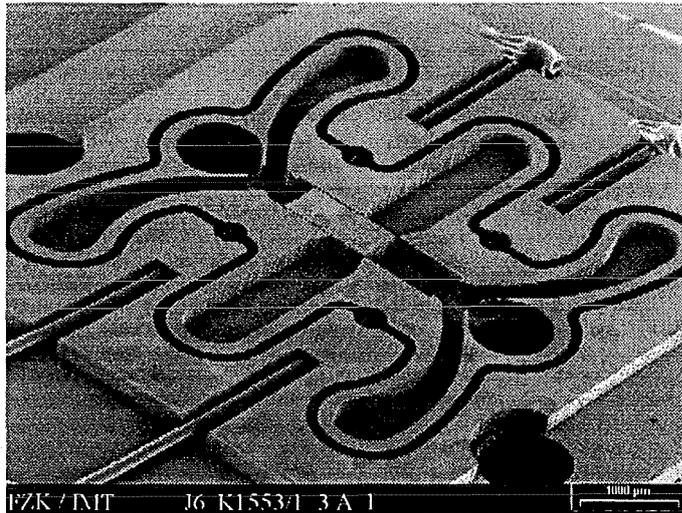


Abbildung 1.11 REM-Aufnahme des Linearaktors mit eingelegtem Kolben und Glasfasern.

1.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Zur experimentellen Untersuchung des Linearaktors erfolgte die Druckerzeugung des Arbeitsfluids wie beim Wandstrahlelement in einem Druckbehälter. Zur Ermittlung der Versorgungskennlinie des Linearaktors wird der Versorgungsdruck und der Volumenstrom in der Fluidzuführung für verschiedene Strömungsgleichgewichte bestimmt. Die Kolbenansteuerung erfolgt mit Hilfe zweier elektromagnetischer 3/2-Wege-Ventile. Durch eine entsprechende Ansteuerung der Ventile, die durch einen Funktionsgenerator erfolgt, wird der Kolben wechselseitig mit Druck beaufschlagt, wobei die jeweils andere Seite entlüftet ist. Für den Betrieb der beiden Lichtschranken werden zwei Lichtquellen und zwei Photodetektoren verwendet. Der Versorgungsdruck, das Ausgangssignal des Funktionsgenerators zur Ansteuerung der Ventile, sowie die beiden Lichtschrankensignale werden mit einem PC mit Meßkarte⁴ und entsprechender Meßsoftware⁵ erfaßt.

Der Anschluß des Linearaktors erfolgt wie beim Wandstrahlelement über eine geeignete Anschlußplatte. Der Linearaktor, der Deckel des Linearaktors sowie die Anschlußplatte werden für die experimentelle Untersuchung mit Hilfe des Niederhalters aus Abbildung 1.4 auf einem Sockel verpreßt.

⁴ Firma Datalog (Mönchengladbach), Typ DAP 1200e

⁵ Firma Datalog (Mönchengladbach), Programm „DasyLab“

Die für den Linearaktor ermittelte Kennlinie zeigt Abbildung 1.12. Für Versorgungsdrücke bis 1000 hPa wurden Volumenströme bis 2 l/h gemessen. Unter Verwendung von Gleichung 1.2 lassen sich daraus in den Verengungen der Fluidzuführungen des Linearaktors (Breite 200 μm , Höhe 250 μm) Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 11 m/s berechnen. Mit Gleichung 1.3 und Gleichung 1.1 kann daraus eine Reynoldszahl von 2459 ermittelt werden. Die Strömung durch den Linearaktor wird in keinem Bereich über eine Strecke, deren Länge ein Vielfaches des hydraulischen Durchmessers beträgt, parallel geführt. Daher kann, außer für sehr kleine Volumenströme, keine voll ausgebildete laminare Strömung erwartet werden.

Das in Kapitel 1.1 beschriebene Wandstrahlelement ist für Versorgungsdrücke zwischen 1750 und 4000 hPa unter Belastung schaltbar. In diesem Bereich wurden für das Wandstrahlelement Volumenströme zwischen 0.49 und 0.77 l/h ermittelt. Um diese Volumenströme für den Linearaktor zu erhalten sind entsprechend Abbildung 1.12 Versorgungsdrücke zwischen 73 und 165 hPa nötig. Da man sich die Kombination aus Wandstrahlelement und Linearaktor als in Serie geschaltete Strömungswiderstände vorstellen kann, folgt daraus, daß zum Betrieb der Kombination nur ein etwa 4 % höherer Versorgungsdruck nötig sein sollte, als für das Wandstrahlelement alleine. Für Volumenströme zwischen 0.49 und 0.77 l/h betragen die Strömungsgeschwindigkeiten in den Verengungen der Fluidzuführungen 2.7 bis 4.3 m/s. Die entsprechenden Reynoldzahlen liegen zwischen 603 und 947.

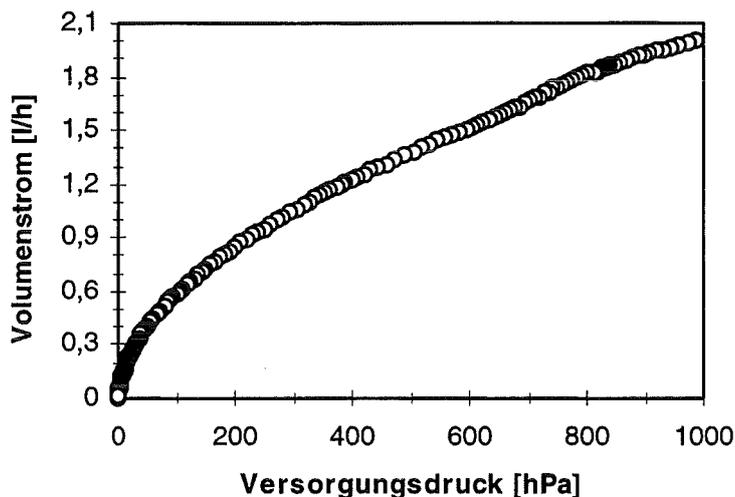


Abbildung 1.12 Versorgungskennlinie des Linearaktors.

Wie in [Jus-96] gezeigt wird, erfolgt das Schalten des Kolbens hauptsächlich durch das Anlegen des Versorgungsdruckes an den Linearaktor, wobei der Mindestversorgungsdruck hierbei zu 10 hPa ermittelt wurde, was einem Mindestvolumenstrom von 0.16 l/h entspricht. In dem oben genannten Betriebsbereich des Wandstrahlelementes bzw. des Linearaktors sollte daher ein Schalten des Kolbens durch das Wandstrahlelement, wie in der Kombination der beiden Module vorgesehen, problemlos möglich sein.

Zur Bestimmung der Kolbengeschwindigkeiten wurde zunächst eine quasistationäre Referenzmessung durchgeführt, die die Abhängigkeit der Lichtschrankensignale von der Kolbenposition lieferte. Bei der dynamischen Messung des Linearaktors, bei der die Ansteuerung durch die bereits erwähnten elektromagnetischen Ventile erfolgte, wurde dann der zeitabhängige Intensitätsverlauf ermittelt. Aus diesen beiden Informationen konnten dann

die mittleren Kolbengeschwindigkeiten, die in Abbildung 1.13 dargestellt sind, berechnet werden. Um den Verlauf der Meßwerte zu verdeutlichen, wurden die Meßwerte mit einem Polynom zweiten Grades gefittet. Die Messungen wurden bei einer Ventildfrequenz von 5 Hz durchgeführt.

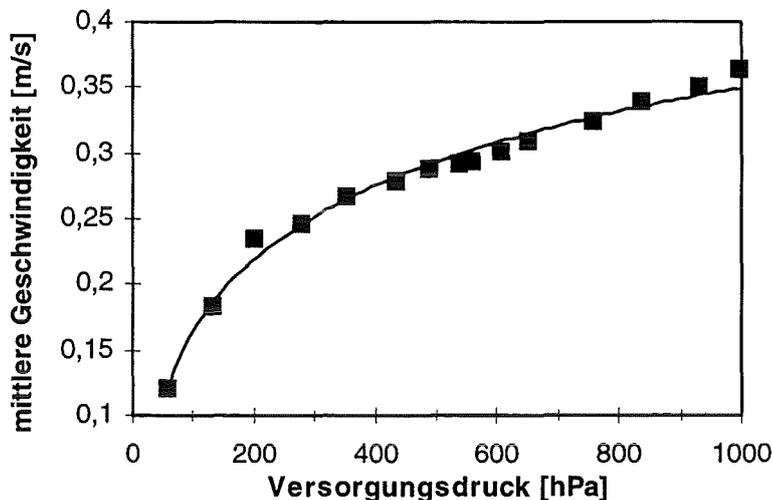


Abbildung 1.13 Mittlere Kolbengeschwindigkeiten des Linearaktors.

Man erkennt, daß für Versorgungsdrücke bis zu 165 hPa Kolbengeschwindigkeiten bis zu 0,2 m/s erreicht werden. Bei einem Kolbenhub von 1000 μm entspricht dies einer Zeit von 5 ms, woraus sich theoretisch mögliche Frequenzen bis zu 100 Hz ergeben. Bei größeren Versorgungsdrücken des Linearaktors, wie sie sich für höhere Volumenströme ergeben, kann diese Frequenz noch vergrößert werden.

Da die Linearaktorfrequenz im Fall eines aus fluidischem Oszillator und Linearaktor aufgebauten Mikrosystems direkt an die Oszillatorfrequenz gekoppelt ist, stellt dieses Ergebnis eine wesentliche Eingangsgröße bei der Entwicklung des fluidischen Oszillators dar.

1.3 Charakterisierung des fluidischen WSE-LA-Mikrosystems

1.3.1 Aufbau des Mikrosystems

Mit den beiden Modulen, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden (Wandstrahlelement WSE und Linearaktor LA), wurde ein Mikrosystem aufgebaut, an dem exemplarisch der Stapelaufbau zweier fluidischer LIGA-Bauteile untersucht werden kann. Dieses Konzept soll später auf das aus fluidischem Oszillator und Linearaktor bestehende Mikrosystem angewandt werden. Der schematische Aufbau der Kombination ist in Abbildung 1.14 dargestellt.

Auf einem Sockel wird eine Anschlußplatte und das Wandstrahlelement montiert. Für die Fluidversorgung und die beiden Steuereingänge werden in das Substrat des Wandstrahlelementes mit dem Laser Löcher geschnitten. Das Wandstrahlelement wird durch den Linearaktor nach oben hin verschlossen. Auch in das Substrat des Linearaktors werden mit einem Laser Löcher geschnitten, um eine fluidische Verbindung mit dem Wandstrahlelement zu ermöglichen. Nachdem in den Linearaktor ein Kolben eingesetzt wurde, wird dieser durch einen feinmechanisch gefertigten PMMA-Deckel, der Öffnungen für

den Fluidabfluß besitzt, verschlossen. Das Mikrosystem wird durch Verpressen mit dem Niederhalter aus Abbildung 1.4 gedichtet.

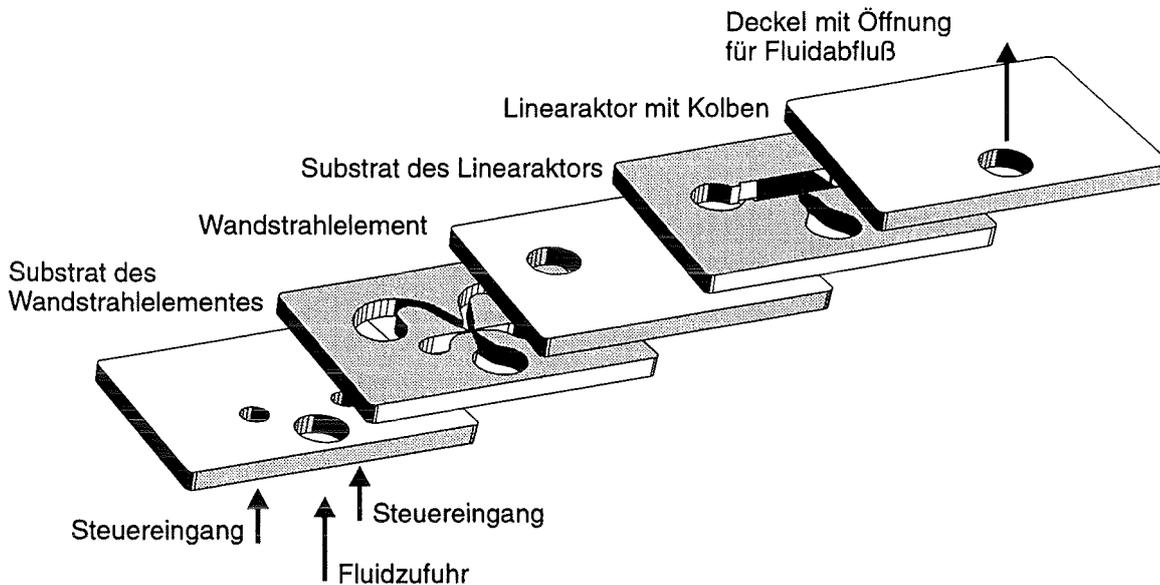


Abbildung 1.14 Schematischer Aufbau des Wandstrahlelement-Linearaktor-Mikrosystems.

Die Positionierung der Anschlußplatte, der Module und des Deckels übereinander erfolgt wieder durch die Verwendung von Paßstiften, die aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 1.14 nicht abgebildet sind. Aus diesem Grund sind auch die Ausgleichsöffnungen des Linearaktors und die entsprechenden Löcher im Deckel des Mikrosystems nicht dargestellt.

Die Stapelhöhe der beiden Module und des Deckels ergibt sich zu 3.5 mm. Die lateralen Abmessungen des Mikrosystems betragen ca. $7.5 \times 10 \text{ mm}^2$.

1.3.2 Betriebsverhalten

Für die experimentelle Untersuchung des Mikrosystems mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid wird der schon in Kapitel 1.1 und 1.2 erwähnte Druckbehälter verwendet.

Die Kennlinie des Mikrosystems wird mit Hilfe eines Drucksensors und eines Schwebekörper-Durchflußmessers erfaßt, indem der Volumenstrom durch die Kombination kontinuierlich gedrosselt wird. Das abströmende Fluid wird in einem Auffangbehälter gesammelt.

Der Kolben des Linearaktors sollte durch den bistabilen Fluidstrahl durch das Wandstrahlelement geschaltet werden können, sobald dieses in einem Betriebsbereich arbeitet, in dem der Fluidstrahl unter Belastung schaltbar ist. Zur Bestimmung des zum Schalten des Fluidstrahles und somit des Kolbens notwendigen Steuerdruckes wird ebenfalls ein Drucksensor verwendet. Wie schon beim Wandstrahlelement wird der Druck in der Steuerleitung schrittweise erhöht, so daß sich nach Öffnen einer Drossel verschiedene Strömungsgleichgewichte einstellen können. Das Schalten des Kolbens kann durch Beobachtung erfaßt werden.

Die Kennlinie des Mikrosystems im Vergleich zu der des Wandstrahlelements zeigt Abbildung 1.15. In dieser Abbildung sind außerdem wieder die berechneten Fitfunktionen eingezeichnet, deren Verlauf durch den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Versorgungsdruck und dem Volumenstrom in Form eines Polynoms zweiten Grades bestimmt wird. Im Fall der Kombination aus Wandstrahlelement und Linearaktor wurden zur Berechnung dieser Fitfunktion nur die bis zu einem Versorgungsdruck von maximal 3000 hPa gemessenen Volumenströme verwendet.

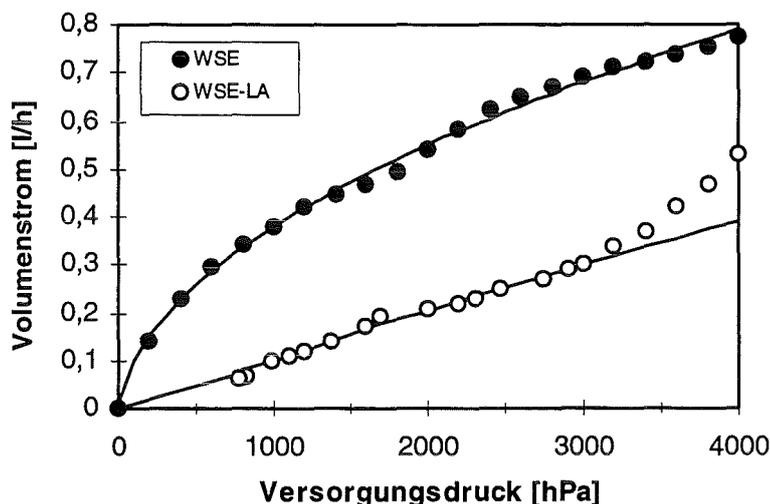


Abbildung 1.15 Versorgungskennlinie des WSE-LA-Mikrosystems im Vergleich zur WSE-Kennlinie.

Entgegen der Erwartung liegt der zum Betrieb des Mikrosystems notwendige Versorgungsdruck bei gleichem Volumenstrom deutlich höher als der Versorgungsdruck, der zum Einzelbetrieb des Wandstrahlelementes notwendig ist. In Kapitel 1.2 wurde gezeigt, daß die Annahme, daß der Strömungswiderstand des Mikrosystems der Summe der Strömungswiderstände der Module entspricht, bei gleichem Volumenstrom auf einen nur ca. 4 % höheren Versorgungsdruck führt, als zum Einzelbetrieb des Wandstrahlelementes nötig. Diese Annahme muß daher entsprechend den Meßergebnissen erweitert werden.

Ein Grund für die starke Abweichung der gemessenen von der erwarteten Versorgungskennlinie ist in der gegenüber Kapitel 1.1 geänderten Anschlußtechnik des Wandstrahlelementes im Mikrosystem zu suchen. Während das Wandstrahlelement bei der in Kapitel 1.1 beschriebenen Untersuchung von oben über eine Anschlußplatte mit Fluid versorgt wurde, mußte für das hier beschriebene Mikrosystem eine Anschlußplatte gefertigt werden, die eine Fluidversorgung des Elementes von unten erlaubt. Das dazu erforderliche Loch wird mit einem Laser in das Substrat des Wandstrahlelementes geschnitten. Wie in Vorversuchen ermittelt wurde, muß der kreisförmige Schnitt mindestens 25 μm von der PMMA-Struktur des Wandstrahlelementes entfernt sein. Andernfalls kann nicht ausgeschlossen werden, daß das PMMA anschmilzt, was neben einer veränderten Geometrie auch zu einer schlechteren Dichtung der Elemente beim Verpressen führen kann. Durch diesen etwas kleineren Durchmesser des Loches entsteht jedoch eine Blende, die einen zusätzlichen Strömungswiderstand darstellt. Darüber hinaus dürfen die Strömungsverluste in der fluidischen Verbindung des Oszillators mit dem Linearaktor nicht vernachlässigt werden. Sie liegen einerseits in Form von 180°-Krümmern vor, andererseits werden durch die in das Substrat des Linearaktors geschnittenen Löcher ebenfalls Blenden erzeugt. Durch eine ungenaue Positionierung der beiden Module übereinander kann weiterhin ein zusätzlicher Strömungswiderstand durch Querschnittsverengungen erzeugt werden.

Um den Strömungswiderstand des Mikrosystems daher vollständig zu beschreiben, muß also zu den Strömungswiderständen der beiden Module ein weiterer Term gezählt werden, der die obengenannten, durch die Anschlußtechnik des Mikrosystems und die Kombination der Module bedingten Strömungswiderstände erfaßt.

Eine weitere Auffälligkeit der Versorgungskennlinie des Mikrosystems besteht in der starken Zunahme des Volumenstroms für Versorgungsdrücke größer 3000 hPa. Ab diesem Versorgungsdruck kann offensichtlich eine ausreichende Dichtung des Mikrosystems durch Verpressen der Einzelkomponenten mit dem Niederhalter nicht mehr gewährleistet werden.

Ein Vergleich der Steuerdrücke, die zum Schalten des Fluidstrahles im Wandstrahlelement bzw. zum Schalten des Fluidstrahles und des Kolbens im Mikrosystem nötig sind zeigt Abbildung 1.16. Man erkennt, daß die ermittelte Meßkurve des Mikrosystems, bestehend aus Wandstrahlelement und Linearaktor, wesentlich geringeren Schwankungen unterworfen ist als die Meßkurve, die bei der Untersuchung des Wandstrahlelementes ermittelt wurde. Ursache für die genauere Bestimmung des Steuerdruckes ist die einfachere Beobachtung des Kolbens gegenüber einer Beobachtung des Strahles.

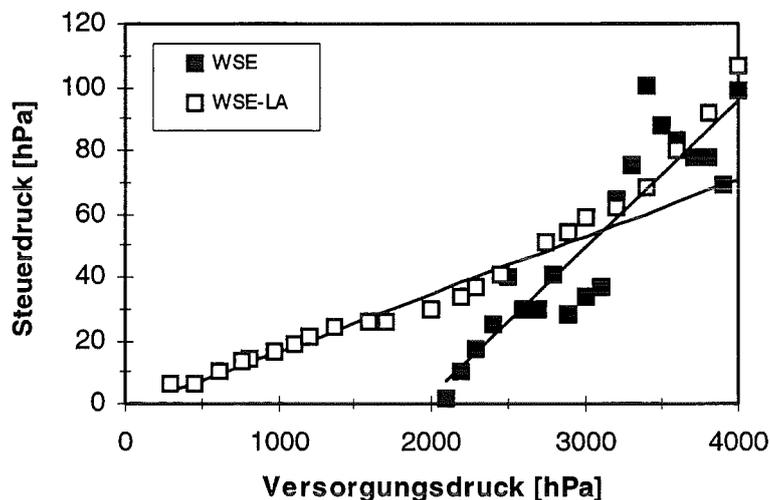


Abbildung 1.16 Steuerdrücke des WSE-LA-Mikrosystems im Vergleich zu den WSE-Steuerdrücken.

Auch hier macht sich der für große Versorgungsdrücke stark anwachsende Leckstrom des Mikrosystems bemerkbar. Ein linearer Zusammenhang zwischen Steuer- und Versorgungsdruck ist für Versorgungsdrücke größer 3000 hPa nicht mehr erkennbar.

Da die Werte beider Meßkurven bezüglich der Größenordnung keinen signifikanten Unterschied aufweisen, kann davon ausgegangen werden, daß kein deutlich erhöhter Steuerdruck zum Schalten der Strahl-Kolben-Kombination nötig ist.

Auffallend ist jedoch, daß der Kolben schon bei Versorgungsdrücken von 300 hPa geschaltet werden konnte, während der Fluidstrahl im Wandstrahlelement erst ab einem Versorgungsdruck von 1750 hPa unter Belastung schaltbar war. Im Bereich sehr kleiner Versorgungsdrücke kann davon ausgegangen werden, daß in dem durch den Linearaktor belasteten Wandstrahlelement kein Coanda-Effekt, d.h. keine eindeutige Ablenkung des Fluidstrahles auftritt. Bei einer symmetrischen Verteilung des Volumenstroms auf beide Wandstrahlelementausgänge bzw. Linearaktoreingänge wird sich jedoch keine Druckdifferenz über dem Kolben, d.h. keine Kolbenkraft und somit auch keine Kolbenbewegung einstellen.

Durch einen Steuerimpuls wird der Fluidstrahl etwas aus dieser symmetrischen Lage abgelenkt, wodurch eine Druckdifferenz und eine Kolbenbewegung verursacht wird. Nach dem Wegfallen des Steuerimpulses kehrt der Strahl wieder in seine symmetrische Lage zurück, so daß erneut kein Druckgradient über dem Kolben anliegt. Der Kolben wird in seiner Position verharren, bis er durch eine Auslenkung des Fluidstrahles zur anderen Seite zurückgeschaltet wird.

Ob in dem hier untersuchten Mikrosystem auch im Bereich von Versorgungsdrücken größer 1750 hPa kein Coanda-Effekt auftritt, konnte mit der verwendeten Meßtechnik nicht erfaßt werden. Um diese Frage zu klären, müßten an die Ausgänge und Ausgleichöffnungen des Linearaktors geeignete Sensoren angeschlossen werden, da eine Asymmetrie des Strahles durch die reine Beobachtung nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte.

Für eine Kombination aus fluidschem Oszillator und Linearaktor, bei dem der Strahl nicht extern über einen Steuerimpuls, sondern intern über eine Strahlrückführung im Oszillator abgelenkt wird (siehe Kapitel 2), ergibt sich aus diesem Ergebnis die Möglichkeit, auch bei einem unvollständigen Umschalten des Fluidstrahles in eine stabile Position eine oszillierende Kolbenbewegung zu verursachen. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein Vorzeichenwechsel der über dem Kolben anliegenden Druckdifferenz, welcher aufgrund der Trägheit des Kolbens eine ausreichende Dauer besitzen muß, um einen entsprechenden Kolbenhub zu verursachen.

2. Numerische Simulation fluidischer Oszillatoren

Die experimentellen Ergebnisse der in Kapitel 1.1 beschriebenen Untersuchungen lassen auf eine Realisierbarkeit eines fluidischen Mikro-Oszillators schließen. Es wurde daher ein Oszillatordesign entworfen und unter Verwendung eines Finite Elemente Methoden (FEM) Programms numerisch untersucht. Dadurch konnte schon vor einer Herstellung des Elementes als LIGA-Struktur der mögliche Betriebsbereich des Oszillators abgeschätzt werden.

2.1 Funktionsprinzip und Entwurf des fluidischen Oszillators

Das Prinzip eines fluidischen Oszillators soll an Hand des in Abbildung 2.1 dargestellten Entwurfs erklärt werden.

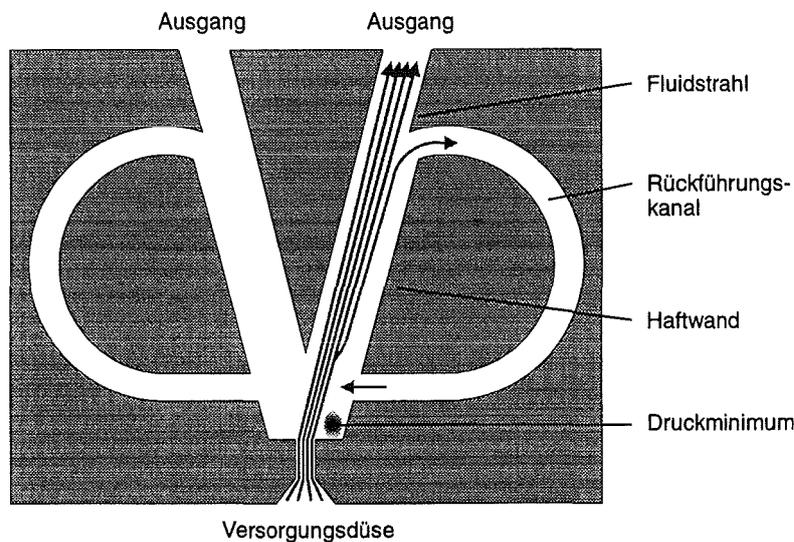


Abbildung 2.1 Prinzip eines fluidischen Oszillators.

Wird zwischen dem Eingang und den Ausgängen des Oszillators eine Druckdifferenz angelegt, so wird er vom Arbeitsfluid vollständig geflutet und es bildet sich eine Strömung aus. Wie schon beim Wandstrahlelement tritt auch beim Oszillator der Fluidstrahl gebündelt durch die Versorgungsdüse in das Element ein und legt sich auf Grund des in Kapitel 1.1.1 beschriebenen Coanda-Effekts an eine Haftwand an. Ein Teil des Fluidstrahls strömt durch den Rückführungskanal zurück und trifft auf den Hauptstrahl, wodurch dieser zur anderen Haftwand geschaltet wird. Der Vorgang der Rückströmung und des Schaltens wiederholt sich auf dieser Seite, so daß der Strahl eine Oszillation mit einer charakteristischen Eigenfrequenz ausführt.

Durch eine Literaturrecherche konnte kein konkretes, für die FEM-Simulation miniaturisierbares Design eines wasserbetriebenen Oszillators mit in der Fluidikebene liegenden Rückführungskanälen ermittelt werden. Zwar wurden verschiedene Arbeiten über Oszillatoren, die beim Betrieb mit Gas und mit Wasser untersucht wurden, gefunden [Tip-71; Kar-87], bei diesen Entwürfen bestand die Rückkopplung jedoch in einer Verbindung der beiden Steurdüsen in einer Ebene senkrecht zur Fluidikebene, was der angestrebten Herstellung eines Mikro-Oszillators in LIGA-Technik nicht entsprach. In den meisten Arbeiten sind darüber hinaus nur Prinzipskizzen dargestellt oder nur die genauen Abmessungen einzelner Teilbereiche gegeben [Pro-66; Cam-70]. Der in Abbildung 2.1

dargestellte Oszillator wurde in Anlehnung an die Arbeit von Le Roy [LeR-68] entworfen, wobei die Verhältnisse, die die charakteristischen Abmessungen mit der Versorgungsdüsenweite bilden, aus einer Abbildung des gesamten Oszillators übernommen wurden. Das Betriebsverhalten dieses Oszillators ist in der erwähnten Arbeit für verschiedene Gasgemische ermittelt worden. Über die Düsenweite dieses Oszillators wird keine Aussage gemacht.

Die Verhältnisse, die die charakteristischen Größen mit der Versorgungsdüsenweite d_v bilden, sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Charakteristische Größe	Verhältnis zur Versorgungsdüsenweite d_v
Abstand Versorgungsdüse-Keil	$a = 3.7 d_v$
Breite des Rückführungskanals	$b_{Rf} = 1.2 d_v$
Breite der Steurdüse	$d_{St} = 0.3 d_v$
Radius des Rückführungskanals	$r = 5.25 d_v$
Haftwandwinkel	$\alpha = 15^\circ$
Haftwandlänge	$w = 10 d_v$
Breite eines Schenkels	$b_{Sch} = 2.5 d_v$
Breite eines Ausgangs	$b_{Aus} = 2 d_v$

Tabelle 2.1 Designregeln für einen fluidischen Oszillator.

Zur Verdeutlichung sind die charakteristischen Größen in Abbildung 2.2 dargestellt.

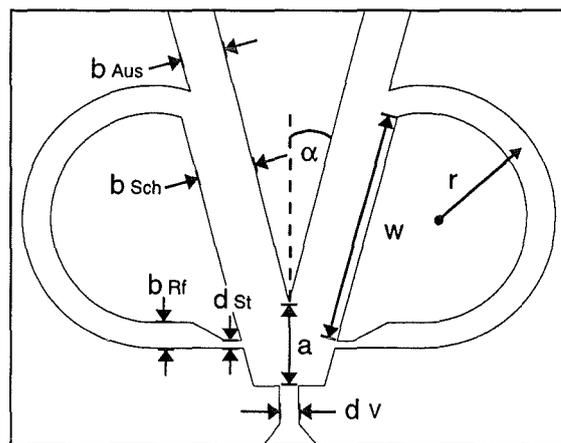


Abbildung 2.2 Charakteristische Größen beim fluidischen Oszillator.

Entsprechend dem in Kapitel 1.1 beschriebenen Wandstrahlelement wurde für den fluidischen Oszillator eine Versorgungsdüsenweite von $30 \mu\text{m}$ als Bezugsgröße gewählt und die Höhe der Struktur auf $250 \mu\text{m}$ festgelegt.

Die genauen Konstruktionsdaten des Oszillators können Anhang A.2 entnommen werden.

2.2 Durchführung der Finite Elemente Simulationen

Die numerische Simulation des dynamischen Betriebsverhaltens des fluidischen Oszillators wurde mit den FEM-Programmen ANSYS vers.5.0 und FLOTRAN vers.2.1 auf einem IBM-kompatiblen Personal Computer mit Prozessortyp 486 und 16 MByte Arbeitsspeicher durchgeführt. Die Berechnung der Struktur erfolgte zweidimensional, da wie bereits erwähnt bei entsprechend großem Tiefen-Breiten-Verhältnis der Einfluß von Boden und Decke auf die Strömung vernachlässigt werden kann.

Das Programm ANSYS ist in drei Prozessorbereiche unterteilt. Im ersten Prozessorbereich, dem sogenannten Preprocessor, wird die Modellierung der zu untersuchenden Geometrie durchgeführt. Im zweiten, dem Solutionprocessor, wird die numerische Lösung des Problems berechnet, und im dritten Prozessorbereich, dem Postprocessor, erfolgt die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse. Da sich der ANSYS-Solutionprocessor für die Untersuchung von Strömungsproblemen nicht eignet, wurde das Programm FLOTRAN, das nur in Verbindung mit verschiedenen anderen FEM-Programmen benutzt werden kann, zur Berechnung des Oszillators verwendet.

ANSYS-Preprocessor:

Das Prinzip der Finiten Elemente Methode basiert auf der Zerlegung einer Geometrie in endlich viele kleine Elemente, für welche dann entsprechend der Problemstellung die charakteristischen Gleichungen numerisch gelöst werden. Diese charakteristischen Gleichungen sind im vorliegenden Fall die Kontinuitätsgleichung und Navier-Stokes-Gleichungen, welche im Folgenden kurz erklärt werden sollen.

Die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2.1) beschreibt die Kontinuität des Massenstroms \vec{m} , was in strömungsmechanischer Hinsicht bedeutet, daß zu jedem Zeitpunkt genau soviel Fluid in ein Volumen einströmt, wie aus ihm abfließen kann.

$$\operatorname{div} \vec{m} = 0 \quad (2.1)$$

Mit den Navier-Stokes-Gleichungen (Gleichungen 2.2) wird ein allgemeiner Strömungszustand beschrieben.

$$\frac{\partial \vec{c}}{\partial t} + (\vec{c} \vec{\nabla}) \vec{c} = \vec{F}_m - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \Delta \vec{c} \quad (2.2)$$

In diesem Satz nichtlinearer Differentialgleichungen zweiter Ordnung beschreibt der erste Term $\frac{\partial \vec{c}}{\partial t}$ die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit \vec{c} (bei stationären Problemen ist dieser Term gleich null). Der zweite Term $(\vec{c} \vec{\nabla}) \vec{c}$ berücksichtigt die Änderungen aller Geschwindigkeitskomponenten bei turbulenten Strömungen. Die Größe \vec{F}_m steht für die von außen angreifenden massebezogenen Kräfte. Durch den Term $-\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p$ werden Druckänderungen erfaßt. Der letzte Ausdruck $\nu \Delta \vec{c}$ beschreibt schließlich durch Reibung verursachte Schubspannungen im Medium. Entsprechend der Problemstellung können einzelne Terme der Navier-Stokes-Gleichungen gleich null sein oder vernachlässigt werden.

Im Preprocessor des Programms werden die finiten Elemente nach der Eingabe der Freiheitsgrade (Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz) und der Geometrie des Oszillators mit Hilfe des sogenannten Netzgenerators erzeugt. Dabei kann auf die Gestalt des Netzes Einfluß genommen werden, in dem die Anzahl der Unterteilungen einer beliebig festlegbaren Linie vorgegeben wird. In Bereichen, in denen voraussichtlich große Änderungen der charakteristischen Größen des Problems zu erwarten sind, muß das Netz enger gewählt werden, um eine genauere Lösung zu erhalten. Da die benötigte Rechenzeit jedoch direkt von der Anzahl der Elemente abhängt, ist es zweckmäßig das Netz nicht zu dicht zu gestalten. Das aus 1857 Elementen bestehende Netz, dessen Dichte im Hinblick auf die Konvergenz und eine zufriedenstellende Genauigkeit der Lösung mit Hilfe von numerischen Voruntersuchungen bestimmt wurde, ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Eine leichte Asymmetrie in der Vernetzung, die für ein erstes Umklappen des Strahls und den damit verbundenen Beginn der Oszillation notwendig ist [Geb-95], ist erkennbar. Um die Abbildung deutlicher zu gestalten ist die Versorgungsdüse verkürzt dargestellt.

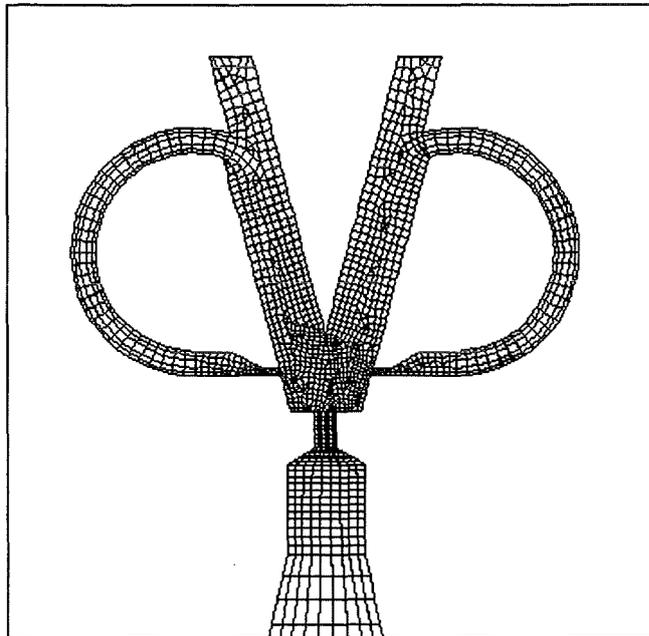


Abbildung 2.3 Mit 1857 Elementen vernetzter fluidischer Oszillator.

Als Randbedingungen wird ein konstanter Versorgungsdruck am Eingang der Versorgungsdüse gewählt. Der Druck an den Ausgängen wird dem Umgebungsdruck gleich gesetzt. Die Berandung der Geometrie wird über die Vorgabe der Geschwindigkeit null in x- und y-Richtung definiert. Nachdem die Randbedingungen des Problems bestimmt worden sind, werden die zur Berechnung des Problems mit dem Programm FLOTRAN notwendigen Dateien erzeugt und der Preprocessor beendet.

FLOTRAN-Solutionprocessor:

Im Programm FLOTRAN werden zunächst die mit dem ANSYS-Preprocessor erzeugten Dateien, die die Geometrie und die Randbedingungen des zu berechnenden Problems enthalten, eingelesen.

Anschließend wird das Problem allgemein spezifiziert, d.h. es wird die Berechnung der Strömung eines nicht kompressiblen Mediums unter Berücksichtigung von Turbulenz und Vernachlässigung thermischer Effekte vorgegeben, wobei auch die Anzahl der durchzuführenden Iterationen angegeben wird. Es folgt die Angabe des Referenzdrucks und der Umgebungstemperatur, sowie der Dichte und der Viskosität des Arbeitsfluids (hier: Wasser).

Für die Berechnung der Turbulenz wird das κ - ϵ -Modell von Launder und Spalding [Zie-91] verwendet. Dem Modell liegt das Wirbelviskositätsprinzip zugrunde, das auf der Annahme beruht, daß auch in turbulenten Strömungen die Spannungen proportional zu den Deformationsgeschwindigkeiten gesetzt werden können. Die Wirbelviskosität wird durch zwei zusätzliche Transportdifferentialgleichungen für die Turbulenzenergie κ und deren Dissipationsrate ϵ berechnet. Das κ - ϵ -Modell benötigt 5 empirische Konstanten. Im vorliegenden Fall wurden die im Programm voreingestellten Parameter verwendet.

Die Relaxationsparameter, über die die Rechnung im Fall einer Divergenz der Lösung beeinflusst werden kann, sowie die zur Lösung der charakteristischen Gleichungen verwendeten Algorithmen werden ebenfalls in ihrer Grundeinstellung beibehalten [Flo-94]. Abschließend wird die Anzahl der zu berechnenden Zeitschritte und die Größe eines Zeitschritts festgelegt.

Um die Rechenzeiten so kurz wie möglich zu halten, wird zunächst eine stationäre Rechnung durchgeführt, die die Ablenkung des Strahls zu einer beliebigen Seite liefert. Ausgehend von dieser berechneten Strömungssituation wird dann die zeitabhängige Rechnung gestartet, wodurch sich die Zeitschritte, die zur reinen Ausbildung der Strömung notwendig sind, erübrigen. Da die Anzahl der durchgeführten Iterationen ebenfalls direkt die Rechenzeit erhöht, wurde die für eine zufriedenstellende Genauigkeit der Lösung mindestens notwendige Iterationsanzahl in Voruntersuchungen ermittelt. Für die stationäre Rechnung waren demnach 1500 Iterationen notwendig, während für die zeitabhängige Rechnung, die mit dem Ergebnis des vorhergehenden Zeitschritts fortgeführt wird, 500 Iterationen pro Zeitschritt ausreichend waren. Neben der Anzahl der Iterationen wird im Fall der transienten Rechnung auch die Anzahl der zu berechnenden Zeitschritte sowie die Größe eines Zeitschritts vorgegeben. Es wurden i.a. 30 Zeitschritte berechnet, wobei die Schrittweite entsprechend der erwarteten Frequenz der Schwingung angepaßt werden mußte, so daß mindestens 4 Strömungszustände pro Periode berechnet werden konnten. Da die Frequenzen vor der Durchführung der Simulationen nicht bekannt waren, mußten gegebenenfalls mehrere Berechnungen durchgeführt werden um die Zeitschrittgröße zu bestimmen. Mit einer mittleren Dauer von 6.5 h für die stationäre Rechnung und 1.9 h für die transiente Rechnung ergibt sich die Gesamtrechenzeit für ein Problem zu 63.5 h.

ANSYS-Postprocessor:

Nach Beendigung der FEM-Simulation können im ANSYS-Postprocessor die berechneten Ergebnisse grafisch oder in Form einer Tabelle dargestellt werden. Die für die einzelnen Zeitschritte berechneten Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen im Oszillator geben dabei direkt Aufschluß über eine vorliegende Oszillation. Aus den Massenströmen durch die beiden Ausgänge des Oszillators kann die Frequenz der Schwingung des Fluidstrahls bestimmt

werden. Weitere Informationen, die dem Ergebnis entnommen werden können, sind die Lokalisierung des Druckminimums, die Ableitung der Reynoldszahl aus der Strömungsgeschwindigkeit (siehe Gleichung 1.1), sowie die dynamischen Drücke in den beiden Oszillatorausgängen, die mit Gleichung 2.3 und 2.4 berechnet werden können (\dot{m} ist der Massenstrom, ρ die Dichte des Arbeitsfluids und A_{aus} die Querschnittsfläche des rechten bzw. linken Fluidausgangs).

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (2.3)$$

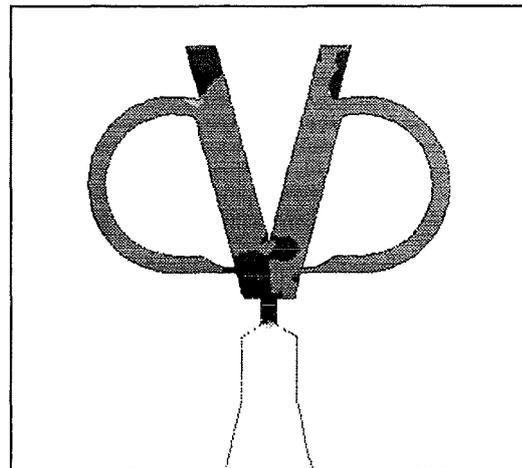
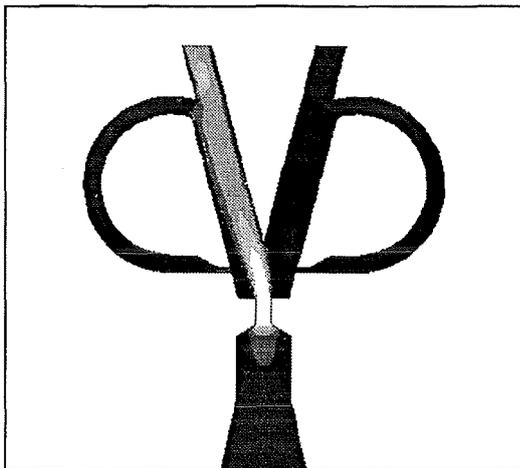
$$p_{\text{dyn,aus}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A_{\text{aus}}^2} \quad (2.4)$$

Die Differenz der dynamischen Drücke im rechten und im linken Oszillatorausgang stellt die Obergrenze, des zur Ansteuerung eines Linearaktors zur Verfügung stehenden Drucks dar.

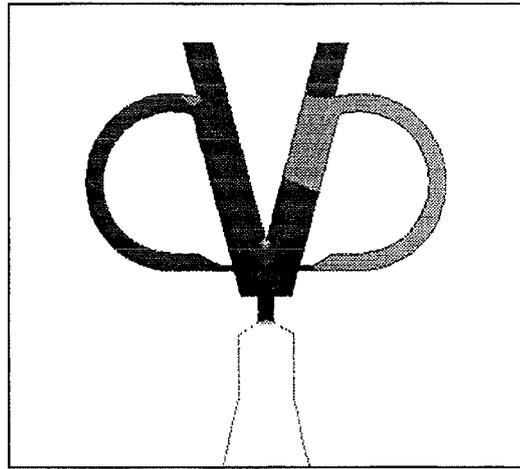
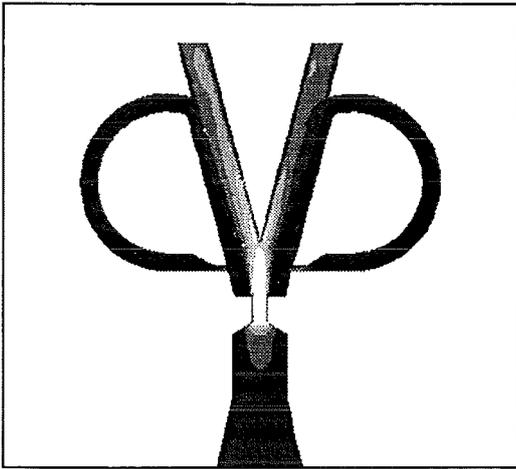
2.3 Ermittlung des Betriebsbereichs des Oszillators

Wie bereits erwähnt, wurden die Abmessungen des Oszillators entsprechend dem Design des Wandstrahlelementes gewählt (Versorgungsdüsenweite $30 \mu\text{m}$, Strukturhöhe $250 \mu\text{m}$). Die Schwingungsfähigkeit des fluidischen Oszillators wurde daher in einem Versorgungsdruckbereich untersucht, in dem sich Volumenströme in einer Größenordnung einstellen, wie sie auch für das Wandstrahlelement (Kapitel 1.1) experimentell ermittelt werden konnten.

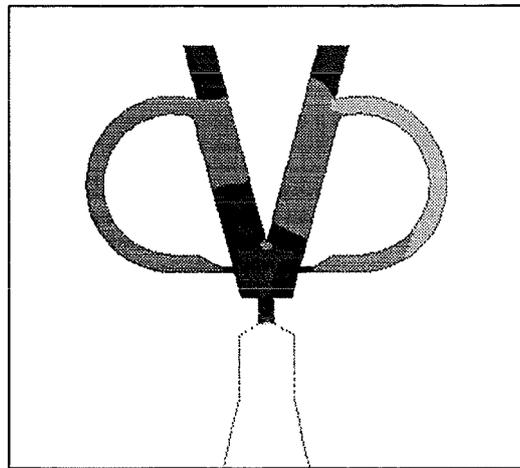
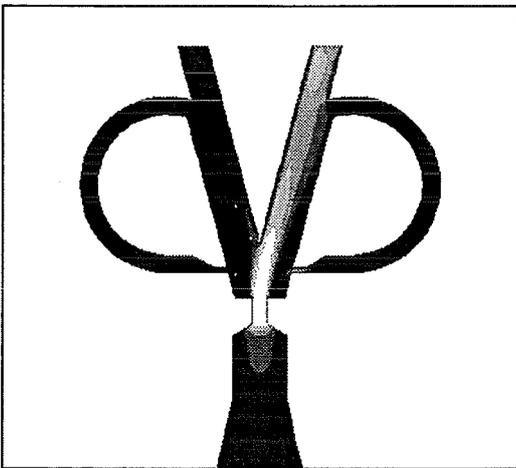
Die Geschwindigkeits- und die Druckverteilungen, die sich für einen Versorgungsdruck von 2000 hPa für drei aufeinanderfolgende Zeiten einstellen, sind in den Abbildungen 2.4 a-c (linke bzw. rechte Spalte) dargestellt.



a) $t = t_1$



b) $t = t_2$



c) $t = t_3$

Abbildung 2.4a-c FEM-simulierte Geschwindigkeits- und Druckverteilung (linke bzw. rechte Spalte) im fluidischen Oszillator für drei aufeinanderfolgende Zeiten und Versorgungsdrücke von 2000 hPa.

Aus Gründen der Übersicht ist auch hier die Zuführungsdüse des Oszillators verkürzt abgebildet. In den Abbildungen nehmen die berechneten Werte mit zunehmender Helligkeit ebenfalls zu.

An der berechneten Geschwindigkeitsverteilung (linke Spalte) ist deutlich zu sehen, wie der Fluidstrahl von links über die Mitte nach rechts wandert. Ebenso ist der Seitenwechsel des Steuerstrahls zu erkennen. In der rechten Spalte ist die berechnete Druckverteilung im Oszillator zu sehen. Auch hier erkennt man den Seitenwechsel des Druckminimums, das sich unmittelbar nach der Versorgungsdüse ausbildet, von links nach rechts.

In Abbildung 2.5 sind die dynamischen Drücke im rechten bzw. linken Oszillatorausgang, die entsprechend Gleichung 2.3 und 2.4 aus den Massenströmen berechnet wurden, für die einzelnen Zeitschritte dargestellt.

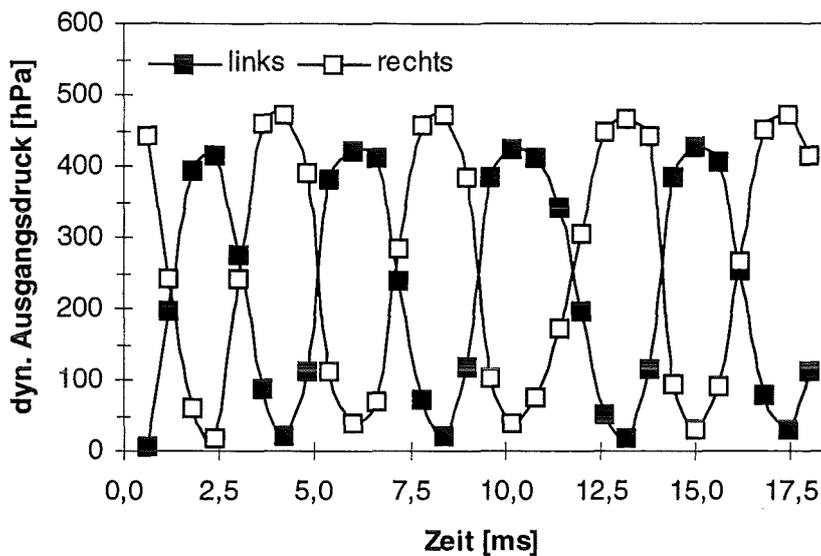


Abbildung 2.5 Zeitliche Variation der dynamischen Drücke in den beiden Oszillatorausgängen.

Man sieht, daß die berechnete Kurve nicht exakt der theoretisch erwarteten regelmäßigen Sinusfunktion entspricht. Durch eine Verfeinerung des Netzes und eine Erhöhung der Anzahl der Iterationen wäre diesbezüglich eine Verbesserung zu erreichen, was wegen der eingeschränkten Prozessorleistung im vorliegenden Fall jedoch nicht sinnvoll war.

Die leichte Asymmetrie in der Vernetzung, die für ein erstes Auftreten der Strahlablenkung und damit den Beginn der Oszillation notwendig ist, macht sich im Ergebnis der FEM-Simulation ebenfalls bemerkbar, da der Mittelwert der maximalen Druckdifferenz zwischen den Ausgängen bei Strahlaustritt an Ausgang 1 bzw. an Ausgang 2 etwas unterschiedlich ist. Für die gesamte Schwingung ergibt sich für die maximale Druckdifferenz ein Mittelwert von 419 hPa. Der Mittelwert für einen Strahlaustritt an Ausgang 1 beträgt jedoch 448 hPa und für einen Strahlaustritt an Ausgang 2 390 hPa., was einer Abweichung von $\pm 7\%$ entspricht.

Die Frequenz der Schwingung, die sich aus dieser Auftragung ermittelten läßt, beträgt 228 Hz. Der Volumenstrom durch den Oszillator beträgt im Fall einer vollständigen Ablenkung des Fluidstrahls 0.49 l/h. Die daraus gemäß Gleichung 1.2 bestimmte Strömungsgeschwindigkeit in der Versorgungsdüse beträgt 18.1 m/s. Mit Gleichung 1.1 läßt sich daraus die Reynoldszahl zu 968 bestimmen. Auch bei der hier untersuchten Oszillatorgeometrie kann davon ausgegangen werden, daß sich die Strömung, aufgrund des Verhältnisses der Länge der Struktur zum hydraulischen Durchmesser, nur bei sehr kleinen Volumenströmen voll ausbilden kann. Die Strömung ist also auch hier, wie schon beim wasserbetriebenen Wandstrahlelement, turbulent.

Um näheres über den Verlauf der charakteristischen Größen des Oszillators zu erfahren, wurde der Versorgungsdruck zwischen 500 und 8000 hPa variiert. Die in [Glä-65] erwähnte Untergrenze des Betriebsbereiches wurde dabei nicht erreicht. Auch eine Obergrenze des Betriebsbereiches wurde nicht ermittelt. Die ermittelte Versorgungskennlinie zeigt Abbildung 2.6.

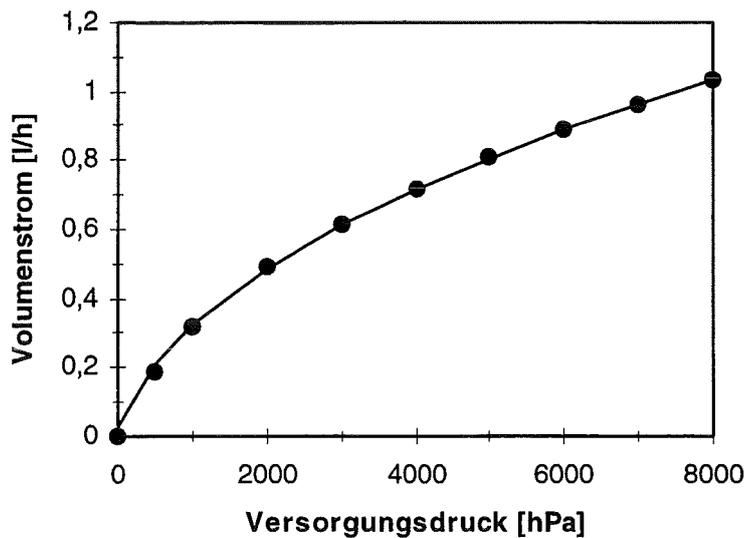


Abbildung 2.6 Abhängigkeit des Volumenstroms durch den fluidischen Oszillator vom Versorgungsdruck.

Zur Verdeutlichung dieses Verlaufs wurde wieder eine geeignete Fitfunktion eingezeichnet. Aus den berechneten Volumenströmen lassen sich Strömungsgeschwindigkeiten in der Versorgungsdüse von maximal 38.2 m/s ableiten. Die daraus ermittelten Reynoldszahlen betragen 2040.

Aufgrund des Strömungswiderstandes der Meßumgebung muß davon ausgegangen werden, daß für die in der Simulation berechneten Volumenströme im Experiment entsprechend größere Versorgungsdrücke notwendig sind. Die für den Oszillator ermittelten Ausgangsdruckdifferenzen und Frequenzen sind daher in Abbildung 2.7 bzw. Abbildung 2.8 in Abhängigkeit vom Volumenstrom dargestellt, der eine invariante Größe ist.

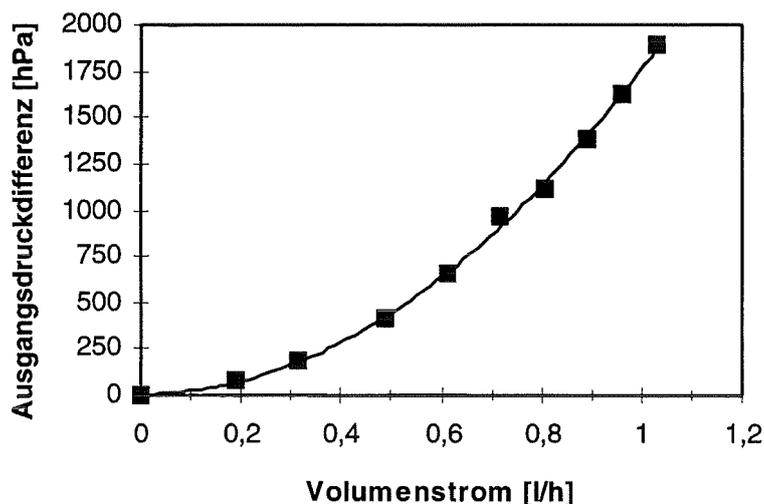


Abbildung 2.7 Abhängigkeit der Ausgangsdruckdifferenz des fluidischen Oszillators vom Volumenstrom.

Es wurden Ausgangsdruckdifferenzen bis zu 1895 hPa berechnet, die wiederum in zum Betreiben eines Aktors zur Verfügung stehende Kräfte umgerechnet werden können (siehe Kap.1.1.2). Mit einer zu Grunde gelegten Aktorfläche von 0.125 mm^2 , beträgt die nach Gleichung 1.5 ermittelte maximale Kraft 23.7 mN.

Der Verlauf der berechneten Ausgangsdruckdifferenzen entspricht der theoretisch erwarteten Proportionalität $\Delta p_{\text{dyn,aus}} \sim Q^2$, für welche die eingezeichnete Fitfunktion berechnet wurde.

Die berechneten Frequenzen steigen linear mit dem Volumenstrom an und erreichen Werte bis zu 626 Hz. Da die Frequenzen aufgrund der großen Rechenzeiten aus maximal 7 Perioden bestimmt wurden, streuen die Werte um die berechnete lineare Trendlinie. Die Steigung dieser Ausgleichsgerade beträgt $594 \text{ Hz} / \ell/h$.

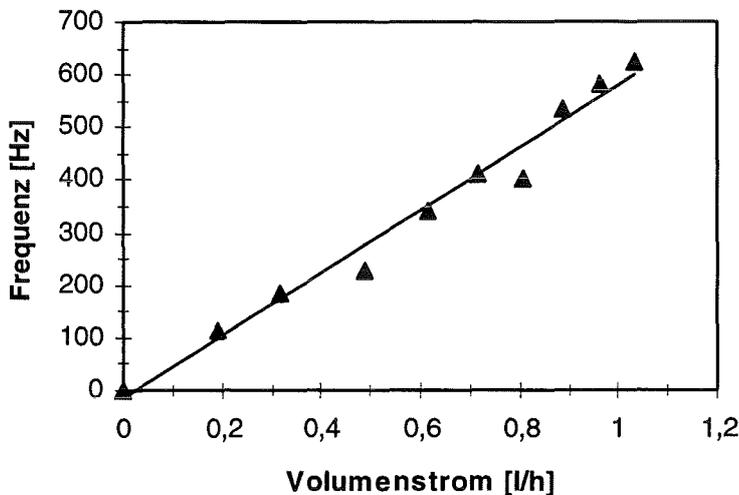


Abbildung 2.8 Abhängigkeit der Frequenz des fluidischen Oszillators vom Volumenstrom.

Wie in [Geb-96] gezeigt, läßt sich die Zunahme der Frequenz mit zunehmendem Volumenstrom auch theoretisch nachvollziehen.

Die Schwingungsdauer der Oszillation wird gemäß Gleichung 2.5 durch die Schaltzeit τ_s von einer Haftwand zur anderen und die Transmissionszeit τ_T des Schaltsignales durch den Rückführkanal der Länge ℓ bestimmt (c_s : Schallgeschwindigkeit im Fluid).

$$\tau = 2 \cdot (\tau_s + \tau_T) = 2 \cdot \left(\tau_s + \frac{\ell}{c_s} \right) \quad (2.5)$$

Die berechneten Frequenzen entsprechen Schwingungsdauern τ zwischen 1.6 und 8.7 ms. Die Transmissionszeit τ_T , die sich für die untersuchte Geometrie ergibt (Rückführkanallänge $\ell = 665 \mu\text{m}$, Schallgeschwindigkeit in Wasser $c_s = 1480 \text{ m/s}$), beträgt jedoch $0.45 \mu\text{s}$. Die Transmissionszeit ist daher bei der Bestimmung der Frequenz vernachlässigbar und die Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom kann entsprechend Abbildung 2.8 wie folgt dargestellt werden (c_1 und c_2 sind Konstanten):

$$f = \frac{1}{2 \cdot \tau_s} = c_1 + c_2 \cdot Q \quad (2.6)$$

Der Einfluß der Schaltzeit auf die Frequenz des Oszillators erklärt sich über das Verständnis des Schaltmechanismus. So kann der Strahl erst dann von der Haftwand abgelöst und schließlich umgeschaltet werden, wenn die Ursache für das Haften des Strahles, d.h. das Unterdruckgebiet beseitigt ist. Dieses Unterdruckgebiet wird durch das verzögerte Nachströmen von Fluid begründet, so daß eine Kompensation dieses Gebietes direkt an den Volumenstrom gekoppelt ist. Mit größer werdender Flußrate nimmt die Schaltzeit ab, wodurch die Frequenz der Oszillation zunimmt.

Unter dem Gesichtspunkt der Verwendung des fluidischen Oszillators als Ansteuereinheit eines Linearaktors nehmen die Frequenzen sehr große Werte an. So besteht unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Kapitel 1.2.2 (Abbildung 1.12 und 1.13) die Möglichkeit, daß der Kolben aufgrund des schnellen Steuersignals den vollen Kolbenhub nicht ausführen kann, was sich nachteilig auf die Verwendung des Linearaktors als Werkzeug auswirken würde.

Der Sachverhalt soll mit Tabelle 2.2 verdeutlicht werden. Dargestellt sind die Versorgungsdrücke des Oszillators $p_{V,Oszi}$, die entsprechenden für den Oszillator berechneten Frequenzen f , die Volumenströme durch den Oszillator bzw. den Linearaktor Q , sowie die für den Linearaktor gemessenen Versorgungsdrücke $p_{V,LA}$ und mittleren Geschwindigkeiten $v_{mittl.}$, aus welchen sich die maximalen Kolbenfrequenzen $f_{max.}$ bei einem vollständig durchfahrenem Kolbenhub von 1000 μm ableiten lassen.

Oszillator			Linearaktor		
$p_{V,Oszi}$ [hPa]	f [Hz]	Q [ℓ/h]	$p_{V,LA}$ [hPa]	$v_{mittl.}$ [m/s]	$f_{max.}$ [Hz]
500	115	0,19	13,0	0,026	13,0
1000	186	0,32	31,7	0,065	32,5
2000	228	0,49	72,5	0,130	65,0
3000	339	0,61	111,0	0,170	85,0
4000	413	0,72	147,0	0,195	97,5
5000	404	0,81	182,3	0,220	110,0
6000	533	0,89	219,0	0,238	119,0
7000	584	0,96	255,0	0,243	121,5
8000	626	1,03	289,4	0,250	125,0

Tabelle 2.2 Berechnete Oszillatorfrequenzen im Vergleich zu den möglichen Kolbenfrequenzen des Linearaktors.

Man sieht, daß die in der FEM-Simulation berechnete Oszillatorfrequenz stets größer ist als die abgeleitete maximal mögliche Kolbenfrequenz und sich die Differenz der beiden Frequenzen mit zunehmendem Volumenstrom vergrößert. Geht man davon aus, daß die Kolbenbewegung hauptsächlich von dem am Linearaktor angelegten Versorgungsdruck verursacht wird (siehe Kapitel 1.2.2), so entspricht der Versorgungsdruck im Fall der kleinsten Differenz außerdem gerade dem für eine Kolbenbewegung mindestens notwendigen. Für den Aufbau des Mikrosystems sollten die beiden Module daher entsprechend angepaßt werden.

Eine bessere Abstimmung der beiden Module aufeinander könnte durch eine Vergrößerung des Oszillators erreicht werden. Der Volumenstrom durch den Oszillator würde auf diese Weise erhöht, was zu einer Vergrößerung des Versorgungsdruckes am Linearaktor führt. Diese Vergrößerung hat wiederum höhere Kolbengeschwindigkeiten zur Folge, wodurch auch die möglichen Kolbenfrequenzen ansteigen.

Da bei einer solchen Skalierung des fluidischen Oszillators nicht bekannt ist, wie sich die Frequenz der Schwingung des Fluidstrahles verändert, wurde die im folgenden Kapitel beschriebene Untersuchung durchgeführt.

2.4 Skalierungsuntersuchungen unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze

Der fluidische Oszillator wurde in insgesamt 4 vergrößerten Variationen numerisch untersucht.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist bei der Berechnung physikalische Ähnlichkeit der Durchströmungsprobleme Voraussetzung. Dazu muß einerseits die geometrische Ähnlichkeit der Oszillatoren gewährleistet sein, d.h. es müssen die Verhältnisse, die die charakteristischen Abmessungen des Oszillators mit der Düsenweite bilden (siehe Tabelle 2.1) konstant gehalten werden, so daß die einzelnen Modelle aus form- und winkeltreuen Abbildungen auseinander hervorgehen. Andererseits müssen die Strömungen ähnlich sein, was bei inkompressiblen, viskosen Fluiden über die Gleichheit der Verhältnisse von Trägheits- und Reibungskraft, die Reynoldszahlen (siehe Gleichung 1.1), erreicht wird.

Da die Reynoldszahl neben einer charakteristischen Länge von der Viskosität des Fluids und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt, kann diese Gleichheit in der Simulation über die Variation der Eigenschaften des Fluids und/oder der Randbedingungen, d.h. dem Versorgungsdruck erfolgen. Im vorliegenden Fall wurden alle Probleme mit Wasser als Medium untersucht. Die physikalische Ähnlichkeit wurde über den Versorgungsdruck, der entsprechend dem Skalierungsfaktor gewählt wurde, realisiert. Einen Überblick über die Transformation strömungstechnisch wesentlicher Größen, die sich daraus ergibt, liefert Tabelle 2.3. Der Tabelle wurde die Gleichheit der Reynoldszahl Re eines Modells, das als Bezugsgröße dient und der Reynoldszahl eines skalierten Modells Re' zugrunde gelegt.

Skalierungsfaktor	k
Charakteristische Abmessung	$d' = d \cdot k$
Fluidgeschwindigkeit	$c' = \frac{c}{k}$
Fläche	$A' = A \cdot k^2$
Volumen	$V' = V \cdot k^3$
Volumenstrom	$Q' = Q \cdot k$
Druck	$p' = \frac{p}{k^2}$

Tabelle 2.3 Transformation ähnlicher Parameter.

Als Bezug für die numerischen Untersuchungen wurde die FEM-Simulation des Oszillatormodells mit einer Versorgungsdüsenweite von 30 μm und einem Versorgungsdruck von 2000 hPa verwendet, für die mit Strömungsgeschwindigkeiten von 18.1 m/s eine Reynoldszahl von 968 ermittelt wurde. Die gewählten Skalierungsfaktoren k , die entsprechenden Düsenweiten d und Strukturhöhen h , sowie die Versorgungsdrücke p_v , die sich daraus für die einzelnen FEM-Simulationen ergeben, sind in Tabelle 2.4 aufgelistet.

Skalierungsfaktor k	Düsenweite d [μm]	Höhe h [μm]	Versorgungsdruck p_v [hPa]
1	30	250	2000
1,667	50	416,667	720
3,333	100	833,333	180
10	300	2500	20
16,667	500	4166,667	7,2

Tabelle 2.4 Transformation der Geometrie und des Versorgungsdruckes mit dem Skalierungsfaktor.

Die Zunahme des Volumenstroms durch den Oszillator mit der Düsenweite zeigt Abbildung 2.9. Dargestellt sind die für die skalierten Oszillatoren mit Hilfe der FEM-Simulation berechneten Volumenströme, sowie der theoretische Verlauf der Zunahme, wobei der für den Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 30 μm berechnete Volumenstrom als Bezugsgröße verwendet wurde. Man erkennt, daß die Linearität des Verlaufes auch durch die FEM-Simulation berechnet wird, wenngleich die Abweichung der berechneten Volumenströme mit wachsender Düsenweite zunimmt. Dies läßt auf einen in Bezug auf den berechneten Wert konstanten Fehler der FEM-Simulation schließen, dessen Ursprung in einer nicht ausreichenden Netzdicke zu suchen ist.

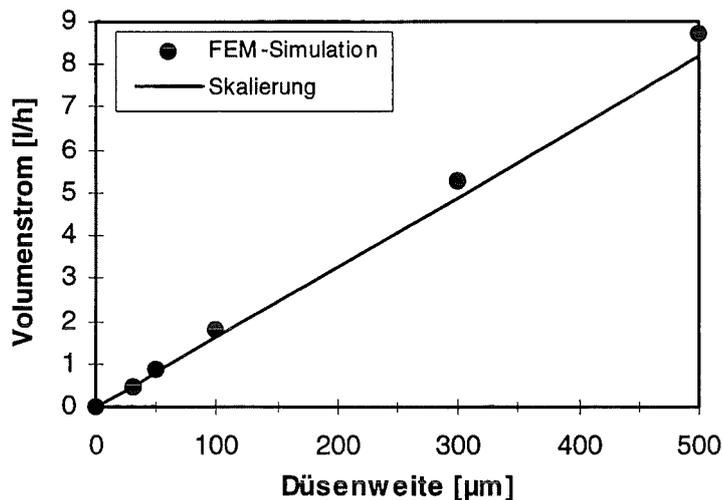


Abbildung 2.9 Variation des Volumenstromes skalierteter Oszillatoren mit der Düsenweite.

Auch die ermittelten Ausgangsdruckdifferenzen (Abbildung 2.10) verhalten sich entsprechend den theoretischen Erwartungen. Sie sind entsprechend der Theorie dem Kehrwert der quadratischen Düsenweite proportional.

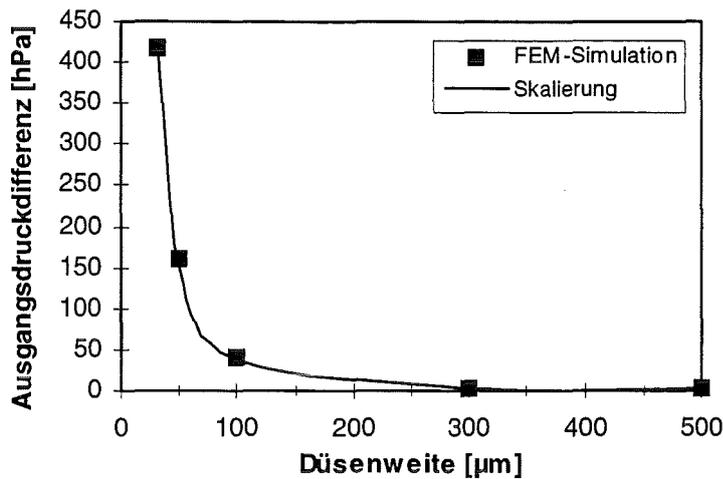


Abbildung 2.10:
Variation der
Ausgangsdruckdifferenz
skalierter Oszillatoren mit
der Düsenweite.

Den Verlauf der Frequenzen, die für die vergrößerten Oszillatoren ermittelt wurden, in Abhängigkeit von der Düsenweite zeigt Abbildung 2.11. Für das Skalierungsverhalten der Frequenz wurde eine Proportionalität zum Kehrwert des quadratischen Skalierungsfaktors angenommen.

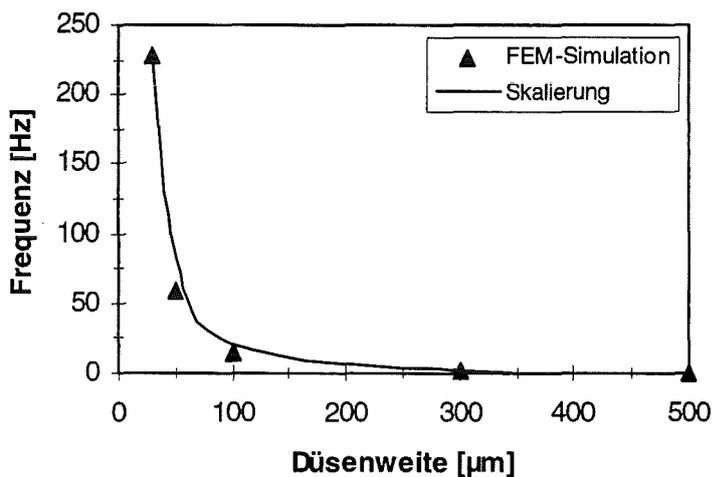


Abbildung 2.11:
Variation der Frequenz
skalierter Oszillatoren mit
der Düsenweite.

Man erkennt, daß die angenommene Proportionalität durch die FEM-Simulation der vergrößerten Oszillatoren gut nachvollzogen wird. Die berechneten Werte streuen etwas um die Kurve, die entsprechend des angenommenen Skalierungsverhaltens berechnet wurde. Als Bezug für die Skalierung wurde auch hier das Ergebnis der FEM-Simulation des Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 30 µm verwendet. Die Ursache für die Abweichungen ist in der schon diskutierten Ungenauigkeit der FEM-Simulation zu suchen. Der Verlauf der Frequenz könnte unter Verwendung einer leistungsfähigeren Hardware durch die Berechnung einer größeren Anzahl von Schwingungen genauer bestimmt werden.

Die Ergebnisse der FEM-Simulation der skalierten Oszillatoren sind in Tabelle 2.5 zusammengefaßt.

Düsenweite d [μm]	Volumenstrom Q [ℓ/h]	Ausgangsdruckdifferenz $\Delta p_{\text{dyn,aus}}$ [hPa]	Frequenz f [Hz]
30	0,49	419,00	228
50	0,89	161,25	58
100	1,79	39,86	15
300	5,31	4,26	2
500	8,70	1,59	0,88

Tabelle 2.5 Ergebnisse der FEM-Simulation skaliertem fluidischer Oszillatoren.

Mit der Vergrößerung nimmt also der Volumenstrom durch die Struktur zu und die Frequenz der Schwingung des Fluidstrahls ab.

Der Volumenstrom kann als zeitliche Änderung des Volumens angesehen werden.

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (2.7)$$

Wie in Tabelle 2.3 dargestellt, skalieren sich der Volumenstrom und das Volumen entsprechend Gleichung 2.8a und b,

$$Q' = k \cdot Q \quad (2.8a)$$

$$V' = k^3 \cdot V \quad (2.8b)$$

so daß sich für die Zeit eine quadratische Proportionalität (Gleichung 2.9) ergibt, was für die Frequenz ein Transformationsverhalten proportional dem Kehrwert des quadratischen Skalierungsfaktors bzw. der Düsenweite (Gleichung 2.10) liefert.

$$t' = k^2 \cdot t \quad (2.9)$$

$$f' = \frac{1}{k^2} \cdot f \quad (2.10)$$

Das Skalierungsverhalten der Frequenz kann also direkt aus den Ähnlichkeitsgesetzen abgeleitet werden. Aber auch die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Überlegungen zum Schaltmechanismus beim Oszillator (siehe Gleichung 2.5) stimmen mit den Simulationsergebnissen überein.

In Kapitel 2.3 konnte gezeigt werden, daß die Schaltzeit, die benötigt wird, um den Strahl von einer Haftwand zur anderen zu schalten, die frequenzbestimmende Größe ist. Während dieser Schaltzeit muß jedoch die Ursache für das Haften des Strahles beseitigt, d.h. das Unterdruckgebiet aufgefüllt werden. Dieses Unterdruckgebiet besitzt eine dreidimensionale Ausdehnung, so daß ein Abnehmen der Frequenz trotz linear zunehmendem Volumenstrom folgt. Die Ergebnisse dieses Unterkapitels bestätigen daher die Aussagen des vorhergehenden.

Diese Skalierungsuntersuchung wurde durchgeführt, um die Möglichkeit einer Anpassung des fluidischen Oszillators an den Linearaktor zu ermitteln.

In Kapitel 2.3 war gezeigt worden, daß für einen Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 30 µm im gesamten untersuchten Versorgungsdruckbereich die ermittelten Oszillatorfrequenzen größer sind als die aus den mittleren Geschwindigkeiten des Kolbens abgeleiteten möglichen Linearaktorfrequenzen. Wie Tabelle 2.6 zu entnehmen ist, kann über eine Skalierung des Oszillators eine bessere Abstimmung der beiden Komponenten aufeinander erreicht werden. Die Möglichkeit einer Kombination ist demnach schon bei einer Vergrößerung der Düsenweite von 30 µm auf 50 µm gegeben.

Oszillator			Linearaktor			
d [µm]	p _{V,Oszi} [hPa]	f [Hz]	Q [ℓ/h]	p _{V,LA} [hPa]	v _{mittl.} [m/s]	f _{max.} [Hz]
30	2000	228	0,49	72,5	0,130	65
50	720	58	0,89	219,0	0,238	119
100	180	15	1,79	783,1	0,330	165

Tabelle 2.6 Berechnete Oszillatorfrequenzen skalierter Oszillatoren im Vergleich zu den möglichen Kolbenfrequenzen des Linearaktors.

Bei einer Düsenweite von 30 µm liegt die Oszillatorfrequenz mit 228 Hz noch deutlich über der möglichen Linearaktorfrequenz von 65 Hz. Durch eine Vergrößerung der Düsenweite auf 50 µm wird jedoch erreicht, daß mit 119 Hz doppelt so große Linearaktorfrequenzen möglich sind, wie vom Oszillator mit 58 Hz vorgegeben. Darüber hinaus vergrößert sich mit dem Volumenstrom auch der Versorgungsdruck des Linearaktors von 72.5 hPa auf 219 hPa, so daß die zum Schalten des Kolbens zur Verfügung stehenden Kräfte sich nahezu verdreifachen (siehe Gleichung 1.5). Bei einer weiteren Vergrößerung des Oszillators auf eine Düsenweite von 100 µm setzen sich die diskutierten Trends fort, wobei jedoch zu beachten ist, daß die Oszillatorfrequenzen im Hinblick auf die angestrebte Anwendung der Oszillator-Aktor-Kombination als Werkzeug nicht zu klein werden dürfen.

Über die in diesem Kapitel beschriebenen numerischen Simulationen konnte der Nachweis der Oszillationsfähigkeit der entworfenen Oszillatorgeometrie erbracht werden. Es konnten der voraussichtliche Betriebsbereich miniaturisierter wasserbetriebener Oszillatoren ermittelt werden, und es wurden die Möglichkeiten der Variation der Frequenz sowie anderer charakteristischer Oszillatorbetriebsgrößen untersucht. Wegen der sehr großen Rechenzeiten bei der FEM-Simulation dieser dynamischen fluidischen Systeme ist eine weiterführende numerische Designuntersuchung bzw. -optimierung nicht sinnvoll. Aus diesem Grund wurde die weitere Entwicklung des Oszillatordesigns experimentell durchgeführt, wobei auch numerisch schwer erfaßbare Randbedingungen, wie der Einfluß der Meßtechnik oder unterschiedliche Ausgangsbelastungen des Oszillators, schnell und einfach untersucht werden konnten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind im nächsten Kapitel dargestellt.

3. Experimentelle Oszillator-Designentwicklung

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, finden sich in der Literatur zum Teil sehr unterschiedliche Prinzipzeichnungen von fluidischen Oszillatoren. Es ist daher nicht gewährleistet, daß das Oszillatordesign, das der FEM-Simulation zugrunde gelegt wurde, im Hinblick auf den Betriebsbereich und ein stabiles Betriebsverhalten das günstigste ist. Darüber hinaus wurde bei der Untersuchung geometrievariierter Wandstrahlelemente festgestellt, daß kleinste Geometrieänderungen großen Einfluß auf die Betriebscharakteristik haben. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß auch beim fluidischen Oszillator über die Geometrie großer Einfluß auf die Betriebsgrößen genommen werden kann. Daraus ergibt sich neben der Variation des Volumenstroms und der Skalierung der Struktur eine weitere Möglichkeit, das Betriebsverhalten der Oszillatoren im Hinblick auf eine Abstimmung auf den Linearaktor zu beeinflussen.

Es wurden zunächst feinmechanisch gefertigte Strukturen mit Versorgungsdüsenweiten von 500 µm untersucht, da die Prozeßtechnik des LIGA-Verfahrens, mit dem die Mikro-Oszillatoren hergestellt werden sollen, bis zur Bereitstellung der ersten Musterteile relativ zeitintensiv ist. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, daß bei einem nicht zufriedenstellenden Betriebsverhalten der vergrößerten Strukturen, das im Fall eines eingeschränkten Betriebsbereiches gegeben ist, auch die Mikro-Oszillatoren keine günstigere Charakteristik aufweisen [Glä-65]. Die Strukturen mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 µm wurden mit einer Höhe von 2500 µm in PMMA gefräst, so daß das mindestens notwendige Aspektverhältnis von 5 (siehe Kapitel 1.1.1) auch in diesem Fall gegeben ist. Die fluidischen Elemente wurden so konstruiert, daß die Drucksensoren, die für den Nachweis der Oszillation verwendet werden, in die Strukturen integriert werden können und einen minimalen Abstand zur Funktionseinheit haben. Verschlössen werden die Elemente über einen ebenfalls feinmechanisch aus PMMA gefertigten Deckel. Um eine vollständige und damit vergleichende Untersuchung der entworfenen fluidischen Elemente gewährleisten zu können, wurde zunächst als Arbeitsmedium Stickstoff verwendet. In diesem Fall ist sichergestellt, daß Störungen des Betriebs der Oszillatoren durch die bereits diskutierten Ausgasungen (siehe Kapitel 1.1.2) nicht auftreten. Die so charakterisierten Elemente mit der günstigsten Betriebscharakteristik wurden dann mit Wasser als Arbeitsfluid untersucht. Die zur Untersuchung der Elemente verwendete Meßtechnik ist in Kapitel 3.1 dargestellt.

Für die Designentwicklung wurde die Geometrie des Oszillators in zwei Bereiche aufgeteilt. Dies sind die Rückführungskanäle, über die das Steuersignal bereit gestellt wird und der Steuerraum in dem der Coanda-Effekt auftritt. Um den Einfluß der Fluidrückführungen unabhängig vom Steuerraum des Oszillators untersuchen zu können, wurden zunächst fluidische Strahlelemente mit nur einer Rückführung entworfen. Ihre Funktionsweise, die erstellten Designs sowie die entsprechenden Untersuchungsergebnisse sind in Kapitel 3.2 dargestellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Oszillatoren mit verschiedenen Steuerräumen entworfen. Die verschiedenen Oszillatordesigns und das experimentell ermittelte Betriebsverhalten der verschiedenen Elemente sind in Kapitel 3.3 beschrieben.

3.1 Meßtechnik

Durch die bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen des Wandstrahlelementes und des Linearaktors konnten keine Erfahrungen mit der Messung von reinen Strömungsänderungen in Frequenzbereichen größer 100 Hz gesammelt werden.

So wurden beim Wandstrahlelement zwar die für ein Schalten, d.h. den Richtungswechsel des Fluidstrahles notwendigen Steuerdrücke und -volumenströme ermittelt (Kapitel 1.1), diese Messung erfolgte jedoch quasistatisch, da lediglich das Stattfinden des Schaltens durch die reine Beobachtung der Ausgänge des Wandstrahlelementes erfaßt wurde. Für die genannte Untersuchung war diese Meßmethode ausreichend, da die zwischen den einzelnen Schaltvorgängen vergehende Zeit bei Wandstrahlelementen ohne jeden Einfluß auf das Betriebsverhalten der Elemente ist, solange eine Untergrenze nicht unterschritten wird. Bei fluidischen Oszillatoren ist diese Zeit jedoch über die Frequenz vorgegeben, so daß eine zeitliche Auflösbarkeit der Messung mit mindestens der doppelten Oszillatorfrequenz gewährleistet sein muß.

Beim Linearaktor hingegen wird die Strömungsenergie in mechanische Energie umgewandelt, so daß die Beobachtung der Bewegung des Kolbens zur Ermittlung der Frequenz herangezogen werden kann. Auch diese Methode scheidet für eine experimentelle Untersuchung des fluidischen Oszillators aus, da sie nicht ohne Beeinflussung seines Strömungsverhaltens anwendbar ist.

Zur Messung der Oszillatorfrequenz bieten sich jedoch die folgenden drei Meßverfahren an:

- die optische Messung der Änderung der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit durch dem Arbeitsfluid beigefügte Partikel
- die elektrisch-thermische Messung der Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe von Heizwiderständen
- die Messung der Drücke in den Ausgängen der fluidischen Elemente.

Bei dem ersten Meßverfahren müssen dem Arbeitsfluid Partikel beigefügt werden, die jedoch aufgrund ihrer Abmessungen die Strömungskanäle nicht merklich verengen dürfen. Solche Partikel sind kommerziell mit einem Durchmesser von $\leq 1 \mu\text{m}$ erhältlich. Ihre Bewegung kann mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erfaßt werden. Mit einer Beeinflussung der Kennlinie des Strömungselementes muß aufgrund der Masse der Partikel jedoch gerechnet werden, so daß eine genaue Bestimmung der Korrelation zwischen dem Volumenstrom und der Frequenz nicht möglich ist und die Beurteilung qualitativer Art bleibt.

Die zweite Meßmethode scheidet aus, da geeignete Heizwiderstände in entsprechenden Abmessungen kommerziell nicht erhältlich sind. Die Anwendung dieses Meßverfahrens würde somit einen zusätzlichen Entwicklungsaufwand bedeuten, wobei nicht sichergestellt ist, daß Sensoren mit ausreichend kleinen Ansprechzeiten entwickelt werden können. Aufgrund der Meßmethode, bei der über die Widerstandsänderung stromdurchflossener Heizdrähte auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen wird, ist dieses Verfahren außerdem nur bei der Verwendung von gasförmigen und elektrisch nichtleitenden flüssigen Medien anwendbar.

Die Messung der Drücke in den Ausgängen der dynamischen Strömungselemente, die sich als dritte Meßmethode anbietet, kann sowohl in gasförmigen als auch in flüssigen Medien durchgeführt werden. Dabei kann entweder eine Meßsonde (Pitotrohr, Prandtl'sches Staurohr)

in der Strömung positioniert werden, oder es wird der statische Druck mit Hilfe eines Drucksensors senkrecht zur Strömung im Fluidausgang gemessen.

Bei der Positionierung von Meßsonden in der Strömung stellt sich erneut das Problem der Miniaturisierbarkeit, da die Abmessungen der Sensoren in Relation zum Strömungsquerschnitt vernachlässigbar klein sein sollten. Um ausreichend große Strömungsgeschwindigkeiten und damit meßbare dynamische Drücke zu erreichen, müssen die Querschnitte entsprechend der Kontinuitätsgleichung jedoch möglichst eng gewählt werden, weshalb von einem Einsatz dieser Meßmethode abgesehen wurde.

Bei der Messung des statischen Druckes hängt die Größe des Meßsignals vom Druckverlust ab, der sich entsprechend einer angeschlossenen Ausgangsbelastung, die z.B. in Form einer Drossel oder eines Krümmers vorliegen kann, einstellen wird. Da diese Ausgangsbelastung auch bei der Verwendung des Oszillators zur Ansteuerung von fluidischen Aktoren vorhanden sein wird, wurde diese Meßmethode zur Bestimmung der Oszillatorfrequenz ausgewählt. Eine für die fluidischen Elemente geeignete Ausgangsbelastung wurde in Vorversuchen bestimmt. Die vergleichende Charakterisierung der einzelnen Strömungselemente muß bei gleicher Ausgangsbelastung erfolgen.

Von entscheidender Bedeutung bei der Anwendung dieses Meßverfahrens ist außerdem die Güte und die Positionierung der Drucksensoren. Einerseits sollten die Sensoren sehr hohe Eigenfrequenzen besitzen, um in der Lage zu sein, sehr schnelle Druckänderungen zu erfassen. Andererseits müssen sie möglichst nahe an die Funktionseinheit des Strömungselementes positionierbar sein, um im Falle der Verwendung von Gasen keine Totvolumina und eine damit verbundene Dämpfung des Signals in Kauf nehmen zu müssen. Diese technischen Anforderungen konnten von Drucksensoren der Firma Kulite⁶, die nach einem piezoresistiven Prinzip arbeiten, erfüllt werden. Für die Erfassung der Ausgangsdrücke der in diesem Kapitel beschriebenen fluidischen Elemente wurden Sensoren vom Typ XTC 190 M verwendet. Diese Sensoren eignen sich zur Messung von Drücken relativ zum Atmosphärendruck zwischen 0 und 3500 hPa und besitzen eine Genauigkeit von $\pm 0.1\%$ der Obergrenze ihres Meßbereiches. Die Eigenfrequenzen von 130 kHz ermöglichen die Erfassung von Druckänderungen mit Frequenzen bis zu 13 kHz [Kul-96]. Mit einem Durchmesser der Sensorfläche von 3.9 mm entsprechen diese Sensoren auch den diskutierten Positionierungsanforderungen.

Die Sensoren werden in die fluidischen Elemente so eingeschraubt, daß die Sensorflächen bündig mit der strömungsbegrenzenden Wand abschließen. In Abbildung 3.1 ist der prinzipielle Aufbau eines zur Untersuchung montierten fluidischen Elementes am Beispiel eines fluidischen Oszillators dargestellt. Erkennbar ist die Bodenplatte mit eingeschraubten Drucksensoren und gefräster Struktur, die aus Gründen der Übersichtlichkeit zweiteilig dargestellt ist. Verschlossen wird die Struktur durch einen Deckel, über den der Fluidzu- und abfluß erfolgt. Die Abströmung des Fluids erfolgt durch Drosseln, welche die für eine Messung notwendigen Ausgangsbelastungen repräsentieren. Diese Drosseln werden über kurze Schläuche mit Anschlußstücken verbunden, die in den Deckel eingeschraubt werden (in Abbildung 3.1 nicht dargestellt). Über vier Bohrungen in den Ecken des Elementes und des Deckels werden die beiden Komponenten übereinander positioniert und die Struktur durch Verschrauben abgedichtet.

⁶Hofheim/Taunus

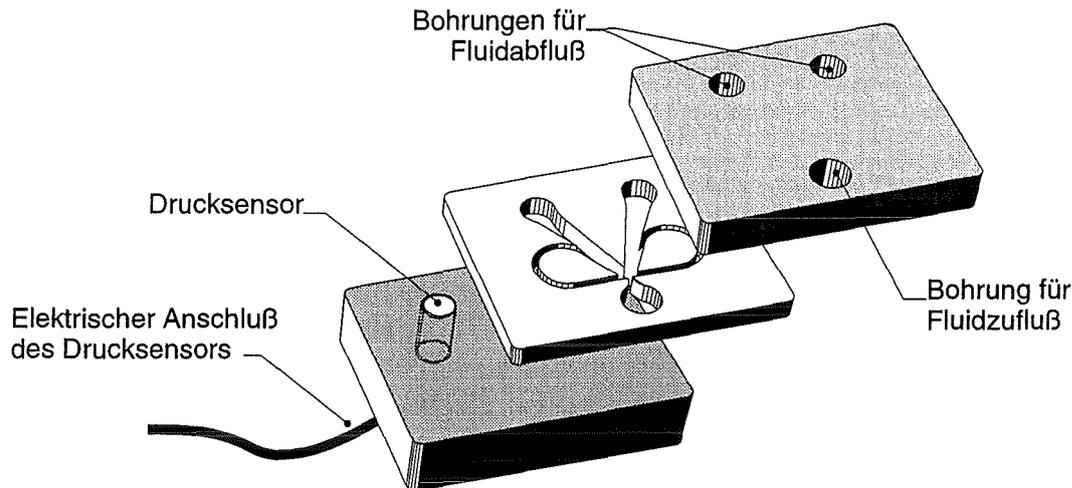


Abbildung 3.1 Prinzipskizze zur Frequenzbestimmung eines fluidischen Elementes mit eingeschraubten Drucksensoren zur Frequenzbestimmung und Deckel mit Bohrungen für den Fluidzu- und abfluß.

Für die experimentelle Untersuchung der fluidischen Elemente wurde der in Abbildung 3.1 dargestellte Aufbau um 180° gedreht, so daß sich der Deckel unter dem fluidischen Element befindet. Dieser umgekehrte Aufbau wurde gewählt, um im Falle der Verwendung von deionisiertem Wasser keinen hydrostatischen Druck in den Ausgängen aufzubauen.

Abbildung 3.2 zeigt den zur experimentellen Untersuchung der fluidischen Elemente mit Stickstoff verwendeten Meßaufbau.

Hochreiner Stickstoff⁷ wird einer Druckflasche entnommen und der Volumenstrom mittels eines Reduzierventils eingestellt. Die Kontrolle des Volumenstroms erfolgt mit einem Volumenstrommesser, der nach einem thermischen Meßprinzip arbeitet und Messungen von Stickstoffvolumenströmen bei Raumtemperatur im Bereich von 0-170 cm³/s mit einer Genauigkeit von ± 1 % des Skalenendwerts erlaubt⁸.

Unmittelbar vor dem fluidischen Element wird der statische Versorgungsdruck mit einem Drucksensor⁹ mit einem Meßbereich von 0-7000 hPa gemessen. Die Genauigkeit des Sensors beträgt ± 0.1 % vom Skalenendwert. Die Frequenz des Oszillators wird wie bereits dargestellt über eine Messung der statischen Ausgangsdrücke erfaßt.

Die Signale der Drucksensoren werden 50fach verstärkt und von einem Computer mit Meßkarte (siehe Kapitel 1.2) erfaßt. In Vorversuchen wurde der für ein fluidisches Element zu erwartende Frequenzbereich bestimmt. Als Abtastrate wurde mindestens der 10 fache Wert der maximalen Frequenz gewählt, so daß gewährleistet werden konnte, daß mindestens 10 Meßwerte pro Periode aufgenommen wurden. Über mindestens 100 Schwingungen wurde dann der minimal und der maximal gemessene Druck bestimmt und die Differenz dieser beiden Drücke ermittelt. Zur Ermittlung der Frequenz der Schwingung wurde eine Fourier-Transformation von mindestens 100 Schwingungen durchgeführt. Zur Darstellung und

⁷ Reinheitsklasse 4.6, d.h. 99.996%

⁸ Firma Hastings (Hampton, USA), Modell M-10K EALL 10KPG;
Maximalwert: 10000 cm³/min Luft bei T = 0°C \Leftrightarrow 170,34 cm³/s Stickstoff bei T = 20°C

⁹ Firma Kulite (Hofheim), Typ XTM190 M

Auswertung der Meßsignale wurde wie schon bei der in Kapitel 1.2 dargestellten Untersuchung des Linearaktors das Programm DasyLab verwendet.

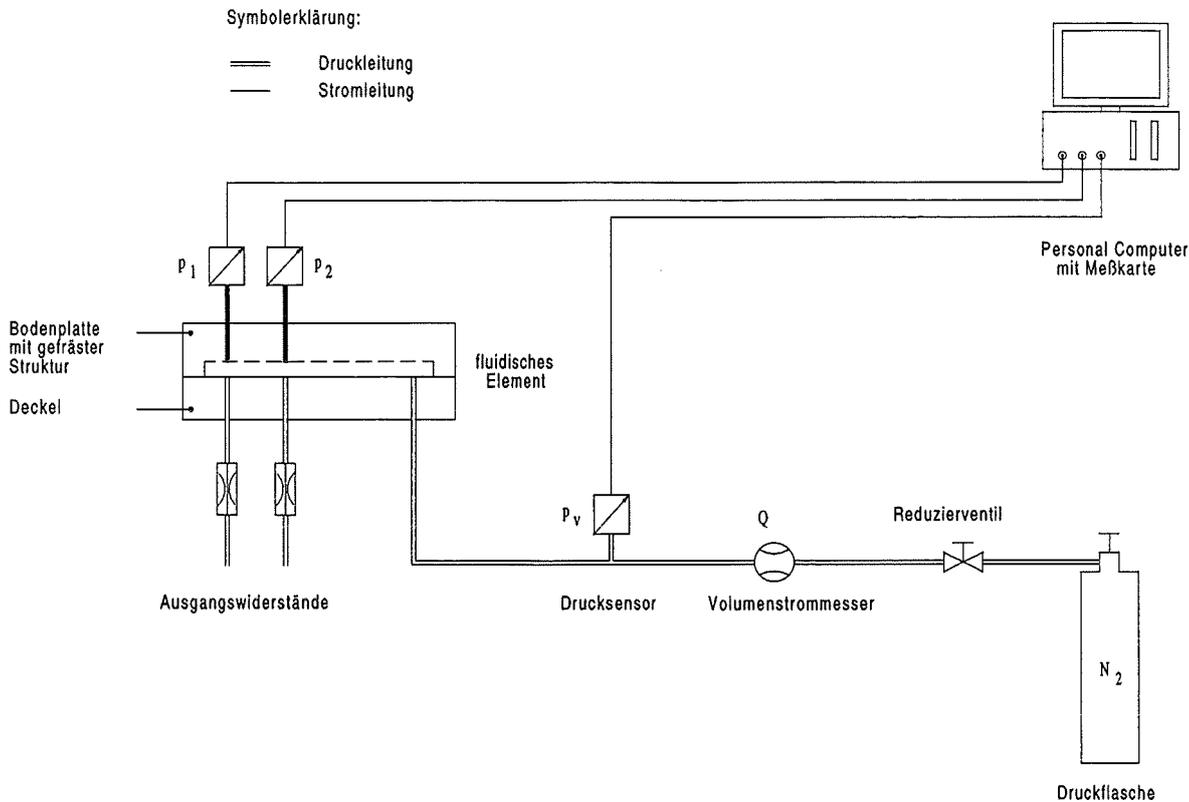


Abbildung 3.2 Aufbau zur Messung dynamischer fluidischer Elemente beim Betrieb mit Stickstoff.

Um auszuschließen, daß mit der beschriebenen Meßtechnik Schwingungen erfaßt werden, die nicht in der speziellen Strömungsführung in den fluidischen Elementen begründet sind, sondern z.B. in Resonanzen der Anschlußtechnik, wurde eine einfache Untersuchung durchgeführt. Zunächst wurde für eines der Elemente die Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom erfaßt. Anschließend wurde das Element demontiert und die Fluidrückführungen, die Schwingung der Fluidhauptstrahls verursachen, mit einem plastisch verformbaren Kunststoff unterbrochen. In der nun folgenden Untersuchung konnten keine oszillierenden Ausgangssignale mehr beobachtet werden. Nach der Entfernung des Kunststoffs und der Reinigung des fluidischen Elementes im Ultraschallbad war die zu Beginn aufgenommene Meßkurve reproduzierbar.

Zur experimentellen Untersuchung der fluidischen Elemente mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid, die im Anschluß an die Untersuchung mit Stickstoff durchgeführt wurde, mußte der in Abbildung 3.2 dargestellte Meßaufbau nur geringfügig geändert werden. Die Fluidversorgung erfolgte unter Verwendung des bereits in Kapitel 1.1 bei der Beschreibung des Meßaufbaus zur Untersuchung von Wandstrahlelementen erwähnten Druckbehälters. Der Stickstoffvolumenstrommesser wurde durch einen ebenfalls in Kapitel 1.1 beschriebenen Schwebekörperdurchflußmesser mit geeignetem Meßbereich ersetzt und das abströmende Fluid in einem Auffangbehälter gesammelt.

3.2 Untersuchungen zur Gestaltung der Rückkopplung

3.2.1 Strahlelemente mit einfacher Rückkopplung

Wie bereits einleitend erwähnt, wurden zunächst fluidische Strahlablenkelemente mit nur einer Rückführung entworfen, um eine Untersuchung des Einflusses der Rückführung unabhängig vom Steuerraum des Oszillators zu ermöglichen. Diese Strukturen repräsentieren die einfachste Möglichkeit eines dynamischen fluidischen Elements [Glä-73].

Die prinzipielle Geometrie eines Strahlablenkelements mit nur einer Rückführung ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

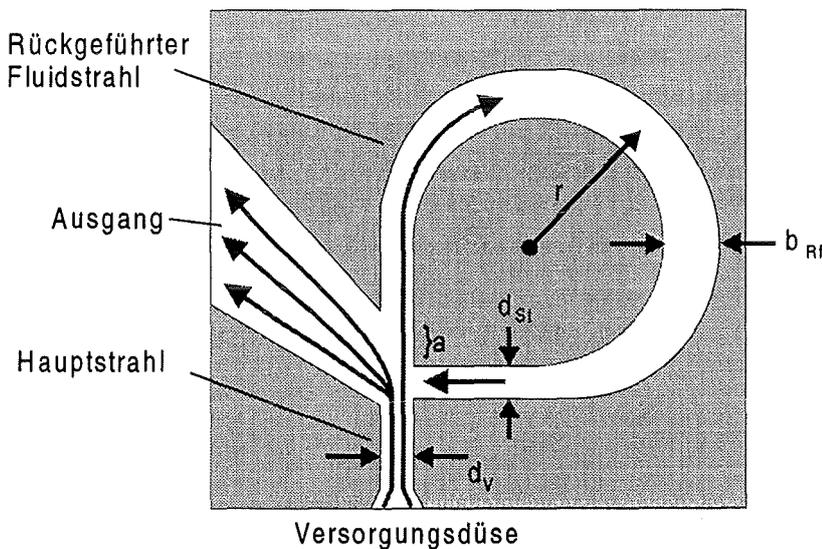


Abbildung 3.3 Strahlablenkelement mit einer internen Rückführung.

Ein in das fluidische Element eintretender Gas- oder Flüssigkeitsstrahl tritt zum Teil direkt wieder aus dem Element aus, zum Teil folgt er der Rückführung, und trifft nach Verlassen des Rückführungskanals durch die Steuerdüse wieder auf sich selbst. Durch das Auftreffen des rückgeführten Strahls auf den eintretenden Hauptstrahl wird der Hauptstrahl abgelenkt und verläßt, ohne die Rückführung zu durchströmen, das Element. Dadurch wird die Wechselwirkung des rückgeführten Strahls mit dem Hauptstrahl unterbrochen, so daß der Hauptstrahl nun wieder in die Rückführung strömt. Im Betriebsbereich des fluidischen Elementes tritt der in Kapitel 2.1 beschriebene Coanda-Effekt, der ein Haften des Strahles in der abgelenkten Position bewirken könnte, nicht auf.

Nach der verlustbehafteten Bernoulli-Gleichung wird ein an einem System angelegter Druck p teils in statischen und dynamischen Druck (p_{stat} bzw. p_{dyn}), zum Teil jedoch in Druckverluste umgewandelt (Gleichung 3.1).

$$p = p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}} + p_{\text{Verlust}} \quad (3.1)$$

Diese Druckverluste lassen sich entsprechend Gleichung 3.2 darstellen, wobei ρ die Dichte des Fluids, Q der Volumenstrom durch das Strömungselement, A ein Strömungsquerschnitt und ζ ein geometrieabhängiger Druckverlustbeiwert ist.

$$P_{\text{Verlust}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A^2} \cdot \zeta \quad (3.2)$$

Der Druckverlustbeiwert ist im Fall des in Abbildung 3.3 dargestellten Strahlablenklements eine zeitlich veränderliche Größe, da zu verschiedenen Zeiten verschiedene Bereiche des Elements durchströmt werden. Entsprechend wird sich jedoch mit der Variation des Verlustbeiwerts ζ auch der Volumenstrom Q durch das Strahlablenklement ändern, so daß ein vor der Ausgangsbelastung positionierter Drucksensor ein oszillierendes Signal erfassen wird. Das oszillierende Signal sollte eine durch die Betriebsbedingungen eindeutige und reproduzierbare Frequenz besitzen. Darüber hinaus ist die Differenz der Ausgangsdrücke von Interesse, da sie Aufschluß über den Grad der Ablenkung des eintretenden Fluidstrahls gibt.

Da mit der Untersuchung der Strahlablenklemente mit einfacher Rückführung der Einfluß der Geometrie der Rückführung auf das Betriebsverhalten dynamischer fluidischer Elemente untersucht werden sollte, wurden insgesamt vier verschiedene Designs entworfen. Bei diesen Designs wurde jeweils die Breite und der Radius, d.h. die Länge des Rückführungskanals verändert, wodurch die Strömungsverluste in der Rückführung beeinflußt werden. Bei der Wahl des Verhältnisses aus dem Radius und der Breite der Rückführung wurde darauf geachtet, daß eine Untergrenze nicht unterschritten wird, da der durch die Krümmung verursachte Strömungswiderstand sonst zu stark anwachsen würde. Die Versorgungsdüsengeometrie, der Ausgangsdiffusor und die äußeren Abmessungen der Elemente wurden für alle Elemente gleich gewählt.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die charakteristischen Abmessungen der verschiedenen Strahlablenklemente. Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen den in Abbildung 3.3 verwendeten. Sämtliche Strahlablenklemente haben eine Versorgungsdüsenweite d_V von 500 μm . Die genauen Designs wurden dieser Arbeit als Anhang A.3 beigefügt.

Strahlablenklement / Maße in [mm]	1A	1B	2A	2B
Abstand Versorgungsdüse-Keil a	2.100	2.100	2.000	2.000
maximale Breite des Rückführungskanals b_{Rf}	0.500	1.000	0.750	1.500
Breite der Steurdüse d_{St}	0.500	0.500	0.750	0.750
Radius des Rückführungskanals ¹⁰ r	2.625	2.750	3.750	4.125

Tabelle 3.1 Geometrievariationen der Strahlablenklemente.

In Design 1A ist die Breite des Rückführungskanals und die Breite der Steurdüse gleich der Versorgungsdüsenbreite, während der Radius der Rückführung etwa der fünffachen Versorgungsdüsenbreite entspricht. In Design 1B wurde die Breite des Rückführungskanals gegenüber Design 1A verdoppelt, während alle anderen Abmessungen konstant gehalten wurden.

In Design 2A wurde für die Breite des Rückführungskanals und die Breite der Steurdüse der eineinhalbfachen Wert der Versorgungsdüsenbreite gewählt. Der Radius des

¹⁰ Es wurde der Mittelwert aus dem Radius der äußeren und der inneren Berandung des Rückführungskanals gebildet.

Rückführungskanals entspricht etwa der achtfachen Versorgungsdüsenbreite. Auch hier wurde bei Version 2B die Breite des Rückführungskanals verdoppelt, während alle anderen Abmessungen beibehalten wurden.

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch ein Strahlablenkelement vom Typ 2B. Erkennbar ist die Bodenplatte des Elements mit der gefrästen Struktur und dem eingeschraubten Drucksensor. Unter der Bodenplatte befindet sich ein Deckel, der die Struktur verschließt und in den die Anschlußstücke für die Fluidversorgung und die Ausgangsbelastung¹¹ eingeschraubt werden. Diese Ausgangsbelastung wurde in Vorversuchen im Hinblick auf einen möglichst großen Betriebsbereich aller vier Strahlablenkelemente ermittelt.

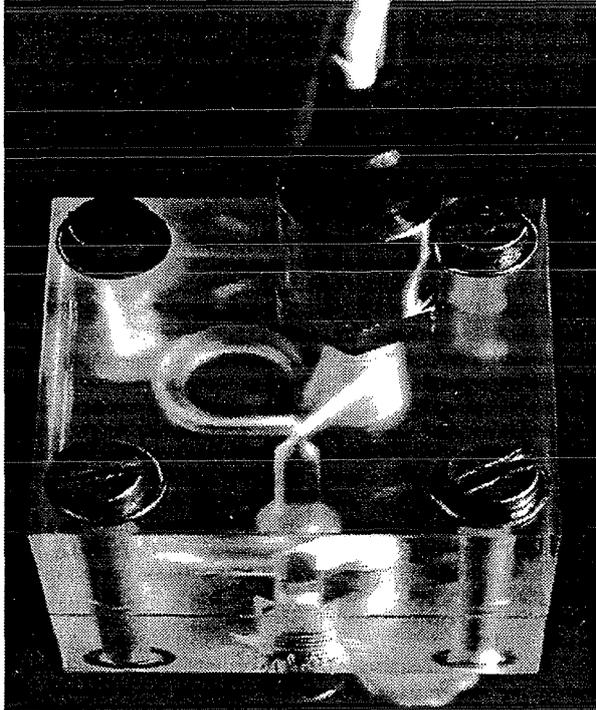


Abbildung 3.4
*Feinmechanisch gefertigtes
Strahlablenkelement vom Typ 2B mit
eingeschraubtem Drucksensor.*

3.2.2 Experimentelle Ergebnisse

Da die Strahlablenkelemente nur einen Ausgangsdiffusor besitzen, vereinfacht sich der in Abbildung 3.2 dargestellte Meßaufbau. Der Drucksensor p_2 sowie ein Ausgangswiderstand entfallen. Wie bereits erwähnt wurden die im folgenden beschriebenen Untersuchungen mit Stickstoff als Arbeitsfluid durchgeführt.

Der Volumenstrom durch das Strahlablenkelement wurde vom Maximalwert des Volumenstrommessers, der bei der Messung von Stickstoff $170 \text{ cm}^3/\text{s}$ beträgt, in Schritten von $17 \text{ cm}^3/\text{s}$ erniedrigt, bis bei keinem Element eine Schwingung mehr nachweisbar war. Aufgrund der relativ großen Trägheit des Volumenstrommessers stellt der eingestellte Volumenstrom immer einen dem Versorgungsdruck entsprechenden zeitlichen Mittelwert dar. Die Untergrenze des eingestellten Volumenstroms betrug $85 \text{ cm}^3/\text{s}$. Es wurde der dem Volumenstrom entsprechende Versorgungsdruck, die mit Hilfe einer Fouriertransformation

¹¹ Standarddosiernadel der Firma EFD mit Innendurchmesser $1600 \mu\text{m}$ (Länge 15 mm).

berechnete Frequenz der Schwingung, sowie der während 0.1 s auftretende minimale und der maximale Ausgangsdruck erfaßt.

Um einen qualitativen Vergleich der einzelnen Geometrien zu ermöglichen, wurden zunächst alle Elemente mit einem Volumenstrom von $170 \text{ cm}^3/\text{s}$ betrieben und die Amplituden der Fouriertransformationen verglichen. Dabei zeigte sich, daß für das Strahlablenkelement 1A, das den engsten und kürzesten Rückführungskanal hat, zwar eine Differenz im Ausgangsdruck meßbar, aber keine regelmäßige Schwingung erkennbar war. Die Amplituden der Fouriertransformationen der Elemente 1B und 2A besaßen etwa die gleiche Größe, so daß das bessere Element nicht eindeutig bestimmbar ist. Das deutlichste und reproduzierbarste Signal wurde für das Strahlablenkelement vom Typ 2B ermittelt, welches den breitesten und längsten Rückführungskanal besitzt. Dieses Signal und die entsprechende Fouriertransformation sind Abbildung 3.5a und b dargestellt.

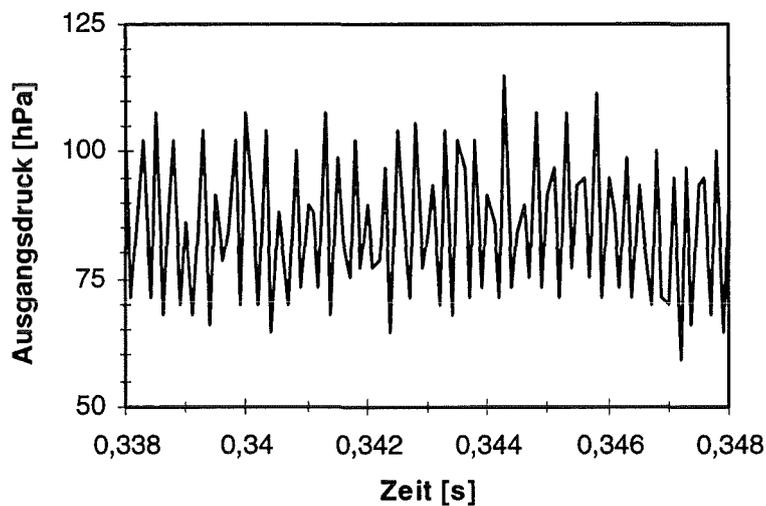


Abbildung 3.5a Ausgangsdrucksignal des Strahlablenkelementes 2B für einen Volumenstrom von $170 \text{ cm}^3/\text{s}$.

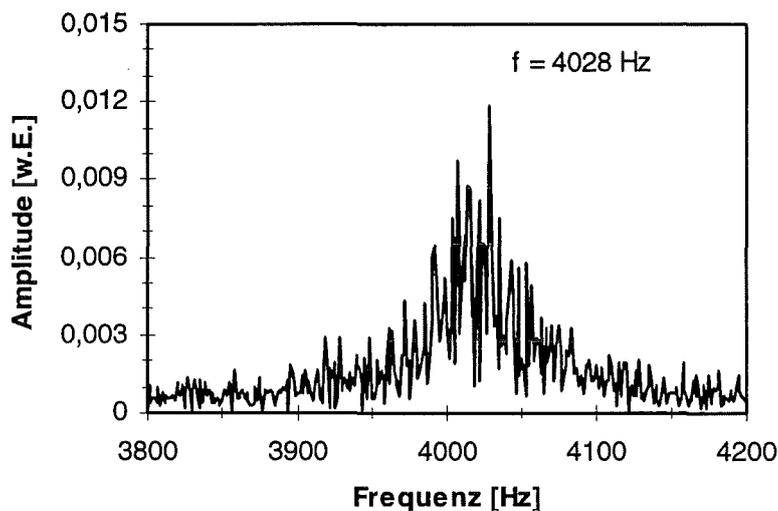


Abbildung 3.5b Fourier-Transformation des in Abbildung 3.5a dargestellten Ausgangsdrucksignals.

Für alle untersuchten Elemente wurden jeweils drei Messungen bei gleichem Volumenstrom durchgeführt und der Mittelwert der Meßergebnisse gebildet. Die für die Elemente ermittelten Kennlinien sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Die Kennlinie des Strahlablenkelements 1A endet bei einem Volumenstrom von $119 \text{ cm}^3/\text{s}$, da ab diesem Wert weder eine Frequenz noch eine Ausgangsdruckdifferenz meßbar war. Der Leckstrom war bei allen untersuchten Strahlablenkelementen kleiner als $1,7 \text{ cm}^3/\text{s}$.

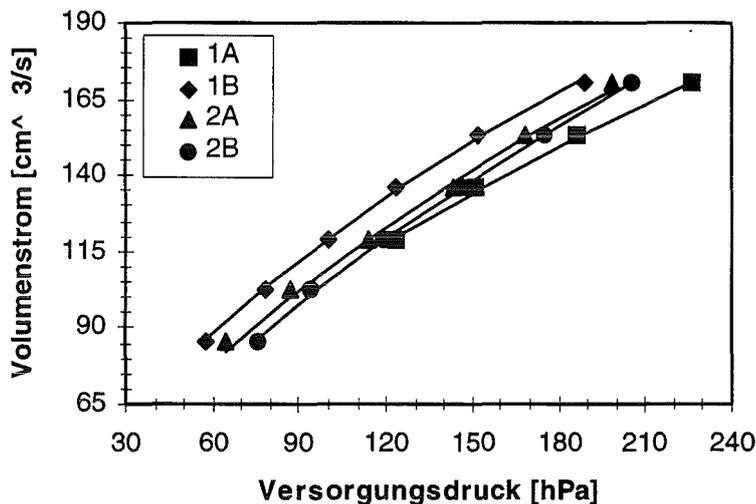


Abbildung 3.6 Kennlinien der stickstoffbetriebenen Strahlablenkelemente bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser $1600 \mu\text{m}$.

Da bei den hier beschriebenen Messungen als Arbeitsfluid Stickstoff verwendet wurde, konnte bezüglich der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten und somit der Reynoldszahlen in der Versorgungsdüse, Gleichung 1.2 nicht direkt angewendet werden. Die Dichte eines Gases ist prinzipiell eine Funktion des Druckes und der Temperatur, so daß bei einem nicht isothermen Verhalten bei der Durchströmung der Versorgungsdüse mit einer Veränderung des Volumenstromes zu rechnen ist. Es wurden daher die Strömungsgeschwindigkeiten in der Zuführung der Versorgungsdüse bestimmt. Sie betragen im betrachteten Versorgungsdruckbereich zwischen 14 m/s und 27 m/s . Mit einem hydraulischen Durchmesser von $d_h = 2500 \mu\text{m}$ (siehe Gleichung 1.3) und der kinematischen Viskosität von Stickstoff $\nu = 14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ lassen sich daraus Reynoldszahlen zwischen 2434 und 4867 berechnen (Gleichung 1.1). Es kann daher davon ausgegangen werden, daß die Strömung in der gesamten Struktur des fluidischen Elements turbulent ist.

Ein Vergleich der Kennlinien der vier untersuchten Strahlablenkelemente zeigt, daß das Strahlablenkelement 1A (schmale, kurze Fluidrückführung) den kleinsten Volumenstrom erlaubt, während das Strahlablenkelement 1B (breite, kurze Fluidrückführung) bei gleichen Versorgungsdrücken den größten Volumenstrom zuläßt. Die Strahlablenkelemente 2A und 2B (schmale bzw. breite, lange Rückführung) weisen dagegen unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit keinen signifikanten Unterschied auf.

Die Kennlinie eines Strömungselementes wird durch den Strömungswiderstand der Geometrie und bei einer transienten Strömung, wie sie im vorliegenden Fall gegeben ist, durch die räumliche und zeitliche Verteilung des Volumenstroms bestimmt. Der Strömungswiderstand der Rückführung nimmt mit zunehmender Breite ab, was sich in der Kennlinie der Strahlablenkelemente 1A und 1B deutlich bemerkbar macht. Bei den Elementen 2A und 2B scheint dieser Sachverhalt eine geringere Bedeutung zu haben. Die räumliche und zeitliche

Verteilung des Volumenstroms konnte mit der angewandten Meßtechnik jedoch nicht erfaßt werden. Um über diese Verteilung genaueres zu erfahren, wäre die Durchführung einer transienten FEM-Simulation entsprechend Kapitel 2 sinnvoll.

In Abbildung 3.7 ist die Variation der Ausgangsdruckdifferenzen als Funktion des Volumenstroms dargestellt. Diese Ausgangsdruckdifferenzen wurden aus den über mindestens 100 Schwingungen ermittelten minimalen und maximalen Ausgangsdrücken bestimmt.

Die tendenzielle Zunahme der Ausgangsdrücke mit dem Volumenstrom ist erkennbar. Eine genaue Bestimmung der Abhängigkeit ist im Bereich kleiner Ausgangsdrücke aufgrund der Sensorgenauigkeit von $\pm 3,5$ hPa jedoch nicht möglich.

Da beim Strahlablelement 1A kein periodisches Ausgangsdrucksignal erkennbar war, kann die Ausgangscharakteristik dieses Elements nicht mit den Strahlablelementen 1B, 2A und 2B verglichen werden. Von den verbleibenden drei Strahlablelementen weist das Element 2B die größte Ausgangsdruckdifferenz auf, wobei auffällt, daß der Verlauf zugleich die geringste Abweichung von einer Abhängigkeit dieser Größe vom Quadrat des Volumenstroms zeigt. Die kleinsten Ausgangsdruckdifferenzen wurden für das Element 1B gemessen, während die für das Element 2A ermittelten Werte zwischen diesen beiden Elementen liegen.

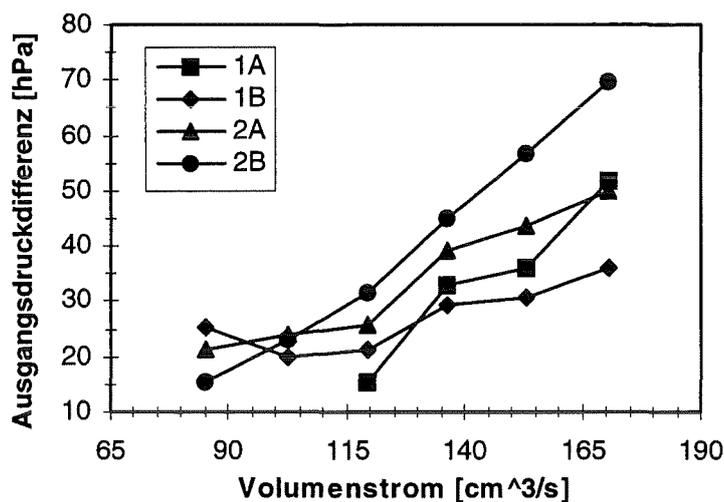


Abbildung 3.7 Variation der Ausgangsdruckdifferenzen der stickstoffbetriebene Strahlablelemente mit dem Volumenstrom bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser 1600 μ m.

Die Ausgangsdruckdifferenz wächst also mit der Breite des Rückführkanals und der Steurdüse, weshalb aus den Untersuchungsergebnissen geschlossen werden kann, daß über diese Geometrieänderung die Ablenkung des Fluidstrahls vergrößert wird.

Die Frequenz der Strahlablelemente nimmt mit zunehmender Ablenkung des Fluidstrahls ab. Die Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom zeigt Abbildung 3.8. Die eingezeichneten Ausgleichsgeraden verdeutlichen einen linearen Zusammenhang, wie er mit Hilfe der FEM-Simulation aus Kapitel 2 bereits für die wasserbetriebenen fluidischen Oszillatoren hergeleitet worden war. Die Steigung der berechneten Ausgleichsgeraden beträgt 77 Hz / 10cm³/s (Strahlablelement 1B), 47Hz / 10cm³/s (Typ 2A) bzw. 103Hz / 10cm³/s (Typ 2B).

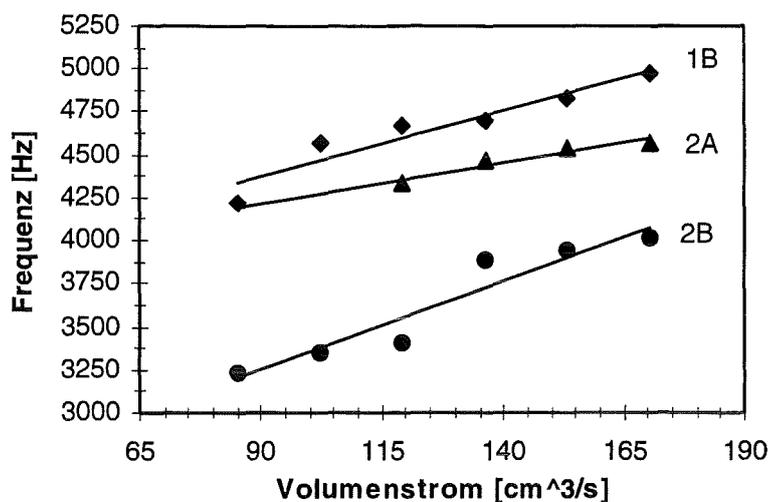


Abbildung 3.8 Abhängigkeit der Frequenzen der stickstoffbetriebenen Strahlablelemente vom Volumenstrom bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser 1600 μm .

Für die angestrebte Verwendung des fluidischen Oszillators als Ansteuereinheit eines Linearaktors ist eine große Ausgangsdruckdifferenz bei einer nicht zu großen Frequenz des Fluidstrahls sinnvoll. Diese beiden Anforderungen werden durch eine Gestaltung der Fluidrückführung wie beim Strahlablelement 2B am Besten erfüllt.

Da eine weitere Anforderung an den Oszillator die mögliche Verwendung einer biokompatiblen Flüssigkeit wie isotonischer Kochsalzlösung ist, wurde zunächst die im folgenden dargestellte Untersuchung des Strahlablelementes 2B mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid durchgeführt.

Untersuchung des Strahlablelementes 2B beim Betrieb mit Wasser:

Der zur Verwendung von Flüssigkeiten erforderliche Umbau der Meßapparatur wurde bereits am Ende von Kapitel 3.1 dargestellt. Anhand der Ergebnisse der FEM-Simulation des skalierten Oszillatormodells mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm , wurde die Größenordnung des zu erwartenden Volumenstroms abgeschätzt. Es wurde daher ein für die Messung von Volumenströmen von 0 - 12 ℓ/h geeigneter Schwebekörperdurchflußmesser gewählt. Der Volumenstrom wurde in Schritten von 1 ℓ/h erniedrigt, bis kein periodisches Ausgangsdrucksignal mehr zu erfassen war. In Vorversuchen zeigte sich, daß die für den Betrieb der Strahlablelemente mit Stickstoff gut geeignete Ausgangsbelastung im Fall der Verwendung von Wasser keine stabile Schwingung mehr zuließ. Die geeignetere Ausgangsbelastung bestand in einem ca. 30 mm langen Schlauchstück mit einem Innendurchmesser von 3 mm.

Wie schon bei der Untersuchung des wasserbetriebenen Wandstrahlelementes und des Linearaktors bereiteten Ausgasungen auch bei der Untersuchung des wasserbetriebenen Strahlablelementes Probleme. In Voruntersuchungen wurde beobachtet, daß sich der Rückführungskanal des Elementes während eines mehrminütigen Betriebes kontinuierlich mit Gasbläschen zusetzte, bis keine Oszillation des Ausgangsdrucksignales mehr erkennbar war. Durch Spülen des Elementes mit Isopropanol vor der Durchführung der Messungen konnte

eine erhebliche Verbesserung erreicht werden. Es befanden sich zwar weiterhin, bedingt durch den Druckabfall im Strahlablelement, Bläschen in der Strömung, aufgrund der verminderten Oberflächenspannung konnten diese jedoch nicht mehr an den Elementwänden haften und den Querschnitt der Strömungskanäle verengen. Auf das aus PMMA gefertigte Strahlablelement wirkte sich diese Vorgehensweise jedoch nachteilig aus. Die Oberfläche der Elemente wurde angegriffen, und an Stellen großer Materialspannungen, wie den Gewinden, in die die Fluidanschlußstücke eingeschraubt wurden, bildeten sich Risse.

Die Betriebscharakteristik des Strahlablelementes wurde durch drei unabhängig voneinander durchgeführte Meßreihen erfaßt, deren Mittelung in den folgenden Abbildungen dargestellt ist. Die Kennlinie des wasserbetriebenen Strahlablelementes 2B zeigt Abbildung 3.9. Zur Verdeutlichung des Verlaufs wurde wieder eine geeignete Fitfunktion eingezeichnet.

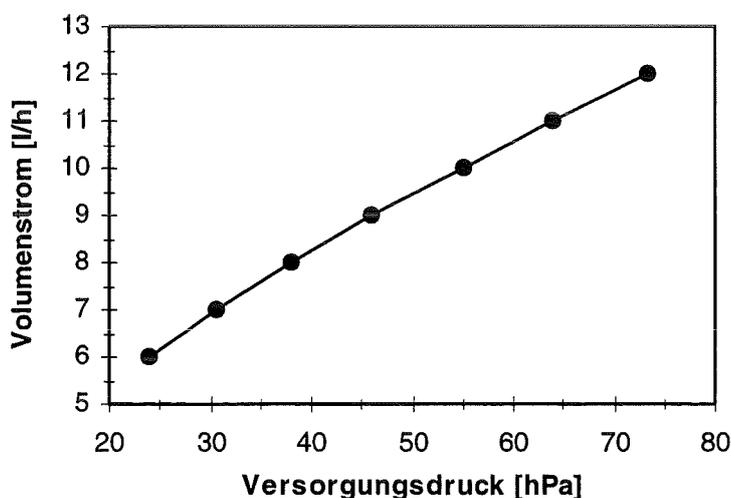


Abbildung 3.9 Kennlinie des wasserbetriebenen Strahlablelementes 2B bei einer Ausgangsbelastung durch ein Schlauchstück.

Die aus dem Volumenstrom abgeleiteten Strömungsgeschwindigkeiten in der Versorgungsdüse (Gleichung 1.2) betragen 1.3 bis 2.7 m/s. Mit dem hydraulischen Durchmesser von 833 μm und der kinematischen Viskosität von Wasser $\nu = 1.004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ergeben sich Reynoldszahlen im Bereich von 1104 bis 2215 (Gleichung 1.1). Da die Versorgungsdüse wie schon beim Wandstrahlelement nur etwa die doppelte Länge des hydraulischen Durchmessers besitzt, gilt das in Kapitel 1.1 Gesagte, wonach im gesamten untersuchten Versorgungsdruckbereich von einer turbulenten Strömung ausgegangen werden muß.

Die Ausgangsdruckdifferenzen, die für das wasserbetriebene Strahlablelement ermittelt wurden, zeigt Abbildung 3.10. Die Streuung der Meßwerte ist auf das bereits diskutierte Problem der Blasenbildung in der Struktur zurückzuführen. Es kann jedoch auch hier die systematische Zunahme der Ausgangsdruckdifferenz mit dem Volumenstrom festgestellt werden.

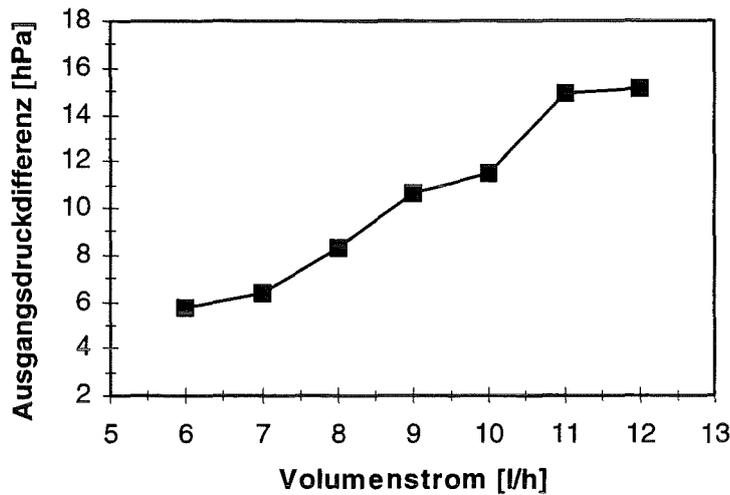


Abbildung 3.10 Ausgangsdruckdifferenzen des wasserbetriebenen Strahlablenklements 2B bei einer Ausgangsbelastung durch ein Schlauchstück.

Die möglichen Betriebsfrequenzen des Strahlablenklements bei der Verwendung von Wasser, sowie eine berechnete Ausgleichgerade zeigt Abbildung 3.11. Auch hier ist, wie schon bei der Untersuchung der Strukturen mit Gas, der lineare Zusammenhang zwischen Frequenz und Volumenstrom deutlich zu erkennen. Die Steigung der Ausgleichsgerade beträgt $9\text{Hz} / 1\text{l/h}$.

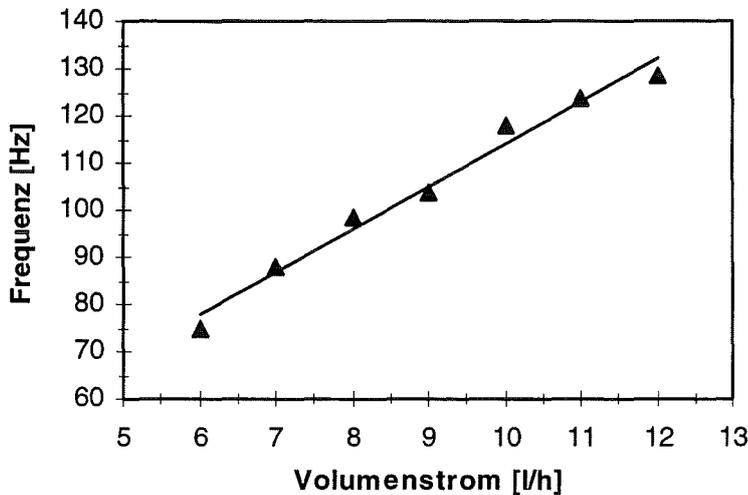


Abbildung 3.11 Frequenzen des wasserbetriebenen Strahlablenklements 2B bei einer Ausgangsbelastung durch ein Schlauchstück.

Die ermittelten Frequenzen liegen unter Berücksichtigung der Ergebnisse der in Kapitel 2 beschriebenen FEM-Untersuchung von fluidischen Oszillatoren mit gleicher Düsenweite überraschend hoch. Die Strahlablenklemente besitzen jedoch nur eine Fluidrückführung, die Oszillatoren dagegen zwei. Bei einem Vergleich der Frequenzen der Elemente muß für die Frequenz des Strahlablenklementes daher mindestens die doppelte Oszillatorfrequenz ermittelt werden. Darüber hinaus wird im Fall der Strahlablenklemente der Strahl in seiner abgelenkten Position nicht durch den Coanda-Effekt gehalten, weshalb er unmittelbar nach

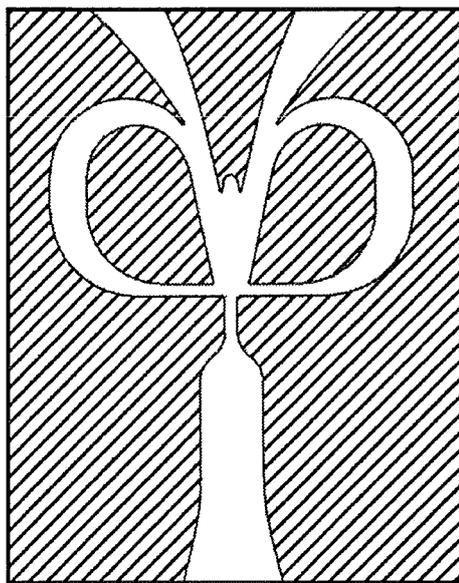
dem Wegfall des Steuerimpulses in seine Ausgangslage zurückkehren kann. Die Zeiten, die beim fluidischen Oszillator zum Ausgleich des Unterdruckgebietes, welches das Haften des Fluidstrahles an der Haftwand bewirkt, benötigt werden, entfallen also, wodurch die Schwingungsdauer verkürzt und die Frequenz der Oszillation vergrößert wird.

3.3 Untersuchungen zur Gestaltung des Steuerraumes

3.3.1 Fluidische Oszillatoren

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen aus Kapitel 3.2 wurden drei fluidische Oszillatoren mit unterschiedlichen Steuerräumen entworfen. Die Rückführkanäle der Oszillatoren wurden in Anlehnung an den Rückführkanal des Strahlablenelementes 2B gestaltet. Bei der Gestaltung des Abzweiges der Fluidrückführung wurde außerdem darauf geachtet, daß die Fluidrückströmung nicht nur aufgrund der Druckdifferenz im Rückführkanal, die durch den Coanda-Effekt erzeugt wird, erfolgt, sondern ein Teil des Fluidstrahles gezielt in den Rückführkanal gelenkt wird.

Die drei fluidischen Oszillatoren sind in Abbildung 3.12a-c als Prinzipskizzen dargestellt.



*Abbildung 3.12a
Fluidischer Oszillator Typ 1:
Mit Rückführkanälen
ausgestattetes Haftstrahl-
element nach [Rec-76].*

Bei dem in Abbildung 3.12a gezeigten Oszillator wurden bezüglich des Steuerraumes die in [Rec-76] genannten Designregeln zum Entwurf eines Haftstrahlelementes umgesetzt. Der Abstand der Anfangspunkte der Haftwände ist geringfügig größer als die Breite der Versorgungsdüse. Um ein korrektes Haften des Fluidstrahles an der Haftwand zu erreichen, sollten die Haftwände eine Mindestlänge entsprechend zehn Versorgungsdüsenweiten besitzen. Der Winkel, den die Haftwände mit der Symmetrieachse bilden sollte zwischen 12° und 15° betragen. Die Breite der Fluidausgänge sollte mindestens der eineinhalbfachen Versorgungsdüsenweite entsprechen, um keinen zu großen Strömungsverlust zu erzeugen. Der Abstand der Versorgungsdüse zum Keil sollte ca. zehn Versorgungsdüsenweiten betragen, um im Falle einer Belastung des angesteuerten Ausgangs ein unkontrolliertes Umklappen des Strahles zu vermeiden. Durch eine Ausnehmung im Keil kann die Lage des Fluidstrahles zusätzlich stabilisiert werden, was auch bei der Änderung des FEM-simulierten Designs (Oszillator Typ 2) berücksichtigt wurde. Da für die einzelnen charakteristischen

Abmessungen jeweils Bereiche angegeben wurden, erfolgte die Erstellung des Designs entsprechend einer in [Rec-76] abgebildeten Zeichnung. Das Haftstrahlelement wurde zusätzlich mit Rückführungen ausgestattet, welche in Anlehnung an die Rückführung des Strahlablelementes 2B aus Kapitel 2 gestaltet wurden. Auch in [Rec-76] wird darauf hingewiesen, daß die Steurdüsenweite keinesfalls kleiner als die Versorgungsdüsenweite sein sollte.

Das in Abbildung 3.12b dargestellte Oszillatordesign entspricht weitestgehend dem in Kapitel 2 beschriebenen und FEM-simulierten Design. Unmittelbar nach der Versorgungsdüse erweitert sich der Steuerraum, in den die Rückführungs Kanäle münden. Da in Kapitel 3.2 gezeigt wurde, daß die Ablenkung des Fluidstrahles mit der Weite dieser Rückführungs Kanäle zunimmt, wurde die Breite der Rückführung und die Steurdüsenweite gegenüber dem in Kapitel 2 dargestellten Design vergrößert. Außerdem erfolgte eine Vergrößerung des Abstandes der Versorgungsdüse zum strahlteilenden Keil, wodurch im Falle einer Ausgangsbelastung des Oszillators die Stabilität des Elementes vergrößert wird. Mit dieser Absicht wurde auch die Ausnehmung im Keil strukturiert.

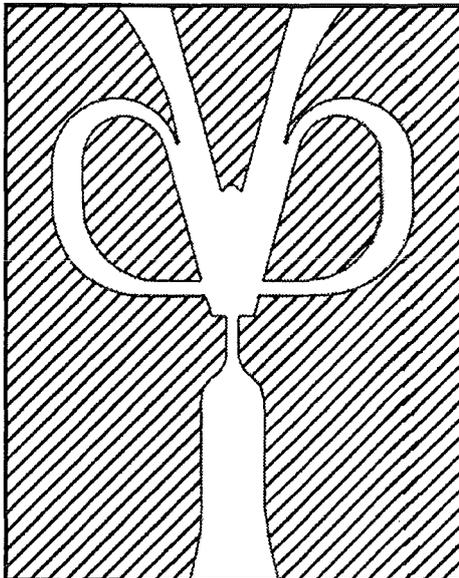


Abbildung 3.12b
Fluidischer Oszillator Typ 2:
Entwurf in Anlehnung an das
FEM-simulierte Design.

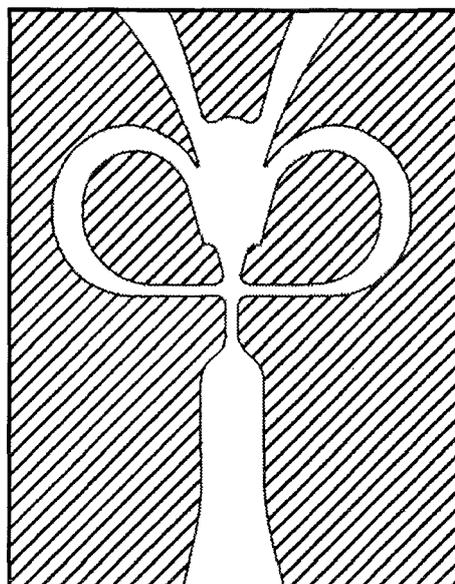


Abbildung 3.12c
Fluidischer Oszillator Typ 3:
Wandstrahlelement (Kap. 1.1)
mit Rückführungs Kanälen.

Der Steuerraum des dritten, in Abbildung 3.12c gezeigten Oszillators entspricht dem Steuerraum des in Kapitel 1.1 besprochenen Wandstrahlelementes. Wie beim Wandstrahlelement besitzt die Haftwand eine Stufe, wodurch die Strahlablenkung stabilisiert werden soll. Die Rückführungen wurden auch hier entsprechend den Ergebnissen der Untersuchung der Strahlablenkelemente aus Kapitel 3.2 gestaltet.

Die genauen Konstruktionszeichnungen der fluidischen Oszillatoren Typ 1-3 sind dieser Arbeit als Anhang A.4 beigelegt. Die im Anhang gezeigten Ausgleichsöffnungen sind in den Prinzipzeichnungen (Abbildung 3.12a-c) nicht dargestellt, da sich in Voruntersuchungen der Oszillatoren zeigte, daß erst mit verschlossenen Ausgleichsöffnungen die Schwingung des Fluidstrahles detektierbar war. Durch eine Untersuchung eines nachgefertigten Oszillators vom Typ 3 ohne Ausgleichsöffnungen konnte verifiziert werden, daß dieses Verschließen ohne jeden Einfluß auf das Betriebsverhalten der Oszillatoren ist.

Ein Vergleich der charakteristischen Designparameter der fluidischen Oszillatoren liefert Tabelle 3.2. Die Parameter sind als Vielfache der Versorgungsdüsenweite d_V angegeben, die wie schon bei den Strahlablenkelementen aus Kapitel 3.2 eine Weite von 500 μm besitzt. Die verwendeten Bezeichnungen entsprechen den in Abbildung 2.2 eingeführten.

Oszillator	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Breite der Steurdüse d_{St}	d_V	$1.2 d_V$	d_V
maximale Breite des Rückführungschanals b_{RF}	$3 d_V$	$2.4 d_V$	$2.4 d_V$
Haftwandwinkel α	12°	15°	15°
Haftwandlänge w	$10 d_V$	$10 d_V$	$8.6 d_V$
Abstand Versorgungsdüse-Keil a	$8.5 d_V$	$10 d_V$	$14 d_V$
Breite eines Schenkels b_{Sch}	$2 d_V$	$3.4 d_V$	-
Breite eines Ausgangs b_{Aus}	$1.5 d_V$	$2.2 d_V$	$1.5 d_V$
Radius des Rückführungschanals ¹² r	$5 d_V$	$4.2 d_V$	$5.2 d_V$

Tabelle 3.2 Geometrievariationen der fluidischen Oszillatoren.

Neben den bereits genannten Unterschieden der drei Oszillatordesigns ergab sich aus den Designvorgaben auch eine unterschiedliche Positionierung des Beginns der Rückführungschanäle. Während bei Typ 1 und 2 der Strahl erst nach Passieren des Keils in den Rückführungschanal eintreten kann, erreicht er bei Typ 3 den Rückführungschanal schon vor dem Keil.

¹²Es wurde der Mittelwert aus dem Radius der äußeren und der inneren Berandung des Rückführungschanals gebildet.

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, wurden sämtliche fluidischen Elemente aus PMMA gefräst. Abbildung 3.13 zeigt einen fluidischen Oszillator vom Typ 3 mit eingeschraubten Drucksensoren. Der Oszillator wird von einem ebenfalls feinmechanisch aus PMMA gefertigten Deckel mit Fluidzuführung und drosselförmigen Ausgangsbelastungen verschlossen, der sich im Bild unter dem Element befindet. Als Ausgangsbelastungen erwiesen sich wie schon beim Strahlablenkelement mit einfacher Rückführung Kanülen mit einem Innendurchmesser von $1600\ \mu\text{m}$ als geeignet. Neben diesen Kanülen wurden auch Kanülen mit Innendurchmessern von $840\ \mu\text{m}$ und $510\ \mu\text{m}$ eingesetzt, um den Einfluß der Ausgangsbelastung auf das Betriebsverhalten der Oszillatoren zu ermitteln.

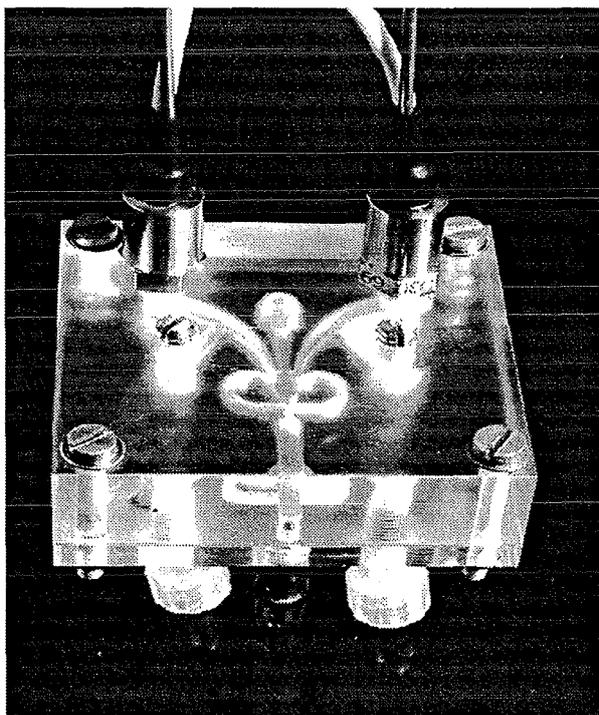


Abbildung 3.13
Feinmechanisch gefertigter fluidischer Oszillator vom Typ 3 mit eingeschraubten Drucksensoren und Deckel mit Fluidzufuhr und Ausgangsbelastung.

3.3.2 Experimentelle Ergebnisse

Zur Untersuchung der fluidischen Oszillatoren mit Stickstoff als Arbeitsfluid wurde der in Abbildung 3.2 dargestellte Meßaufbau verwendet.

Wie schon beim Strahlablenkelement mit einfacher Rückführung wurde der Volumenstrom vom Maximalwert des verwendeten Volumenstrommessers von $170\ \text{cm}^3/\text{s}$ in Schritten von $17\ \text{cm}^3/\text{s}$ erniedrigt. Der kleinste Volumenstrom, bei dem eine Schwingung des Fluidstrahles nachweisbar war, war unter Berücksichtigung der Ausgangsbelastung für die einzelnen Geometrien unterschiedlich. Die schon für das Strahlablenkelement mit einfacher Rückführung gefundene Untergrenze von $85\ \text{cm}^3/\text{s}$ konnte jedoch auch bei den fluidischen Oszillatoren nicht unterschritten werden.

Es wurden wieder der Volumenstrom, der Versorgungsdruck, die vom Meßprogramm mittels Fouriertransformation ermittelte Frequenz sowie die maximale Ausgangsdruckdifferenz erfaßt. Die maximale Ausgangsdruckdifferenz wurde während mindestens 100 Schwingungen aus den gemessenen minimalen und maximalen Ausgangsdrücken bestimmt. Diese wurden für beide Oszillatorausgänge getrennt ermittelt und der Mittelwert der beiden gebildet.

Im Fall der fluidischen Oszillatoren wurde mit zwei Ausgangsdrucksensoren gearbeitet (siehe Abbildung 3.2). Es wurden daher zwei Ausgangsdrucksignale erfaßt, die für alle untersuchten Oszillatoren und alle Volumenströme exakt gegenphasig waren. Exemplarisch sind in Abbildung 3.14a diese Ausgangsdrucksignale für den Oszillator vom Typ 1 bei einem Volumenstrom von $170 \text{ cm}^3/\text{s}$ dargestellt. Als Ausgangsbelastungen wurden hier Kanülen mit einem Innendurchmesser von $840 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet.

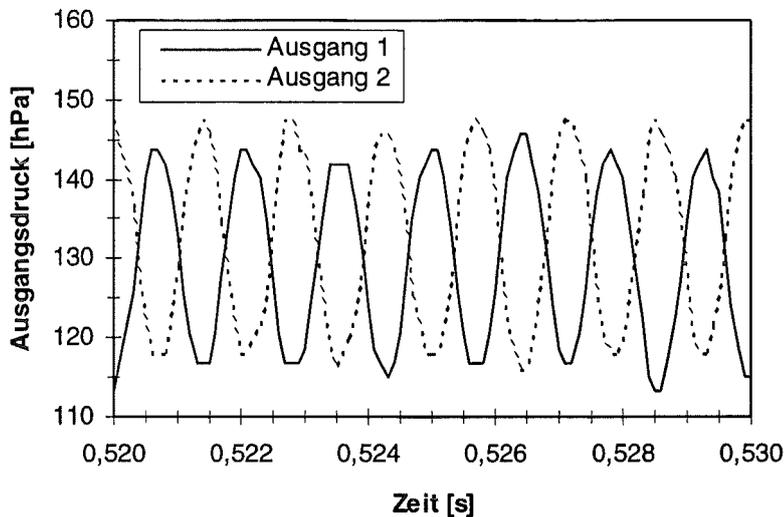


Abbildung 3.14a
Ausgangsdrucksignale des stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillators vom Typ 1 bei einem Volumenstrom von $170 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Auch die in Abbildung 3.14b und c dargestellten Fouriertransformationen liefern eine identische Frequenz. Sie beträgt im vorliegenden Fall 701 Hz .

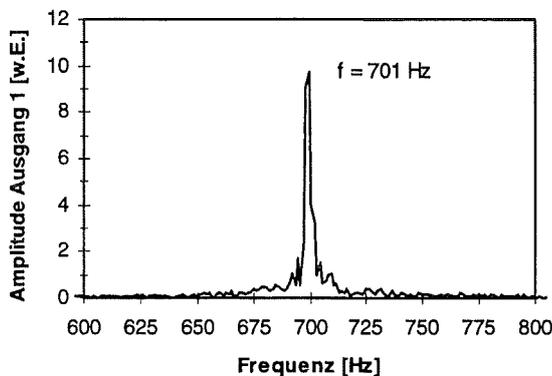


Abbildung 3.14b Fouriertransformation des Ausgangsdrucksignals an Ausgang 1.

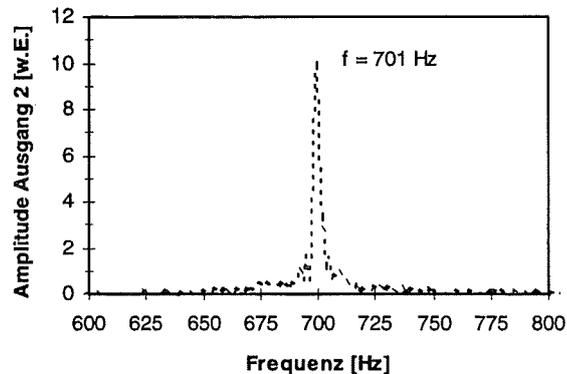


Abbildung 3.14c Fouriertransformation des Ausgangsdrucksignals an Ausgang 2.

Neben dem bereits in Kapitel 3.1 erwähnten Test mit verschlossenen Rückführungen ist das in Abbildung 3.14a-c gezeigte Ergebnis ein eindeutiger Nachweis eines schwingenden Fluidstrahls. Im Fall von Resonanzen der angeschlossenen Meßtechnik, gäbe es keine Veranlassung für eine exakte Gegenphasigkeit und identische Frequenzen der Ausgangssignale.

Im Folgenden sind die experimentellen Ergebnisse der einzelnen Oszillatoren bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser $1600 \text{ }\mu\text{m}$ dargestellt. Es wurden für jedes Element und jeden Volumenstrom jeweils drei Messungen durchgeführt und aus den drei Meßwerten der Mittelwert gebildet. Die Kennlinien der einzelnen Oszillatoren zeigt

Abbildung 3.15. Zur Verdeutlichung der Verläufe wurden wieder geeignete Fitfunktionen berechnet, die ebenfalls eingezeichnet sind.

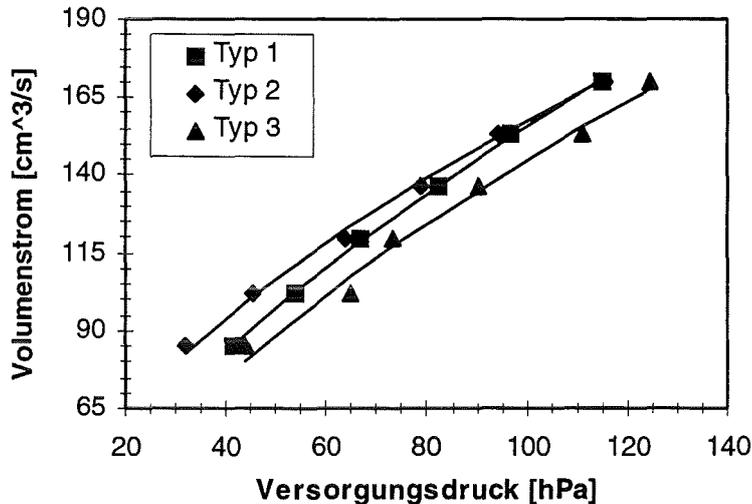


Abbildung 3.15 Kennlinien der stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillatoren bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser 1600 μm .

Wie schon bei den Strahlablenkerelementen mit einfacher Rückführung ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Kennlinien der drei Oszillatoren erkennbar.

Den größten Volumenstrom erlaubt der Oszillator, der in Anlehnung an das FEM-simulierte Design entstand (Typ 2), den kleinsten der Oszillator, dessen Steuerraum entsprechend dem Wandstrahlelement aus Kapitel 1.1 entworfen wurde (Typ 3). Der entsprechend den Designvorgaben in [Rec-76] gestaltete Oszillator (Typ 1) weist bei gleichem Versorgungsdruck einen zwischen diesen beiden Kennlinien liegenden Volumenstrom auf, der jedoch annähernd dem des Typ 2 entspricht.

Die Versorgungsdrücke der Oszillatoren liegen im Vergleich zu denen der Strahlablenkerelemente mit einfacher Rückführung etwas niedriger. Für den gleichen Volumenstrom waren wie in Kapitel 3.2.2 dargestellt Versorgungsdrücke zwischen 58 und 226 hPa nötig, während im vorliegenden Fall 42 bis 125 hPa ausreichen. Da die Düsenweiten und Höhen der Oszillatoren denen der Strahlablenkerelemente mit einfacher Rückführung entsprechen, ergeben sich aus den Volumenströmen die gleichen Strömungsgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen wie in Kapitel 3.2.2. Die Charakteristik der Durchströmung der Oszillatoren entspricht also der der Strahlablenkerelemente mit einfacher Rückführung.

Aufgrund der Beeinflussung des Versorgungsdruckes durch den Druckverlust der Anschlußtechnik sind die erreichten Ausgangsdruckdifferenzen (Abbildung 3.16) und die möglichen Oszillatorfrequenzen (Abbildung 3.17) wieder in Abhängigkeit vom Volumenstrom dargestellt.

Die größten Ausgangsdruckdifferenzen wurden für den Oszillator vom Typ 2 gemessen, während für Typ 3 die niedrigsten und für Typ 1 dazwischenliegende ermittelt wurden, die jedoch Typ 1 stärker entsprachen als Typ 3. Da für die geplante Verwendung des Oszillators als Ansteuereinheit eines fluidischen Aktors große Ausgangsdruckdifferenzen von Vorteil sind, wäre demnach ein Design entsprechend dem des Typ 2 zu favorisieren. Wie in Abbildung 3.17 gezeigt, trifft dies jedoch unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom nicht mehr zu.

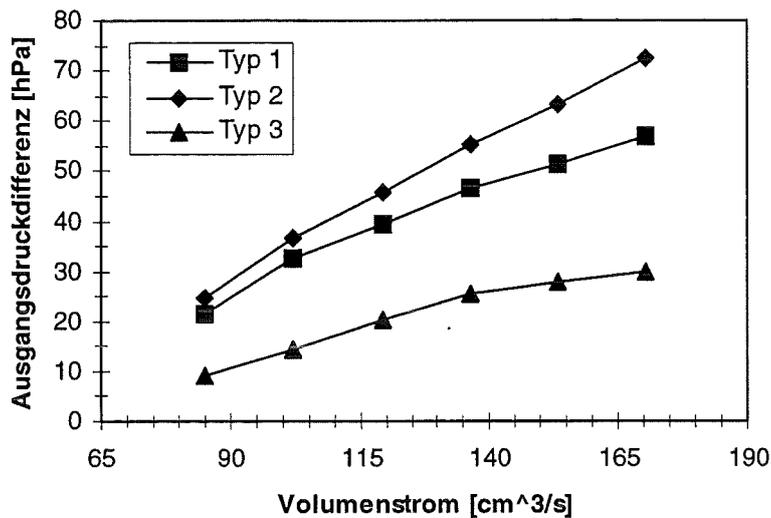


Abbildung 3.16 Abhängigkeit der Ausgangsdruckdifferenzen der stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillatoren vom Volumenstrom bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser 1600 μm .

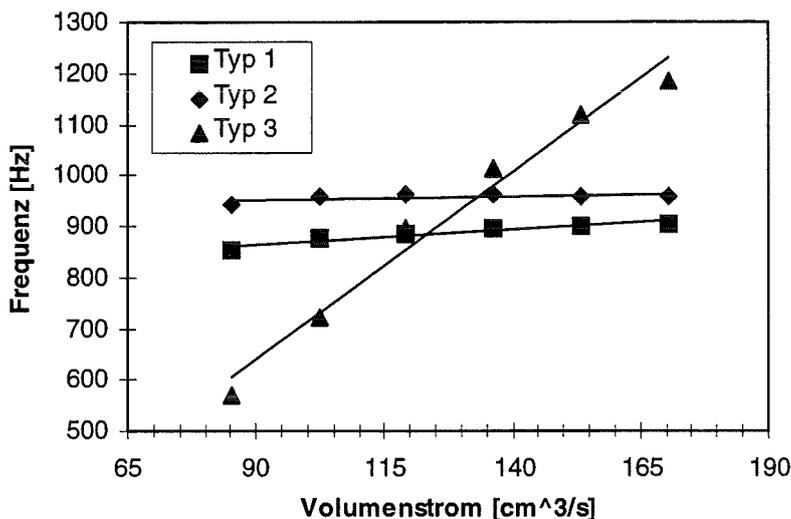


Abbildung 3.17 Abhängigkeit der Frequenzen der stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillatoren vom Volumenstrom bei einer Ausgangsbelastung durch eine Kanüle mit Innendurchmesser 1600 μm .

Während für die Oszillatoren vom Typ 1 und 2 nahezu keine Zunahme der Frequenzen mit dem Volumenstrom zu erfassen war, wurde für den Oszillator vom Typ 3 eine vergleichsweise sehr große Empfindlichkeit ermittelt. Die Steigung der eingezeichneten Ausgleichsgerade beträgt beim Oszillator vom Typ 1 $6\text{Hz} / 10\text{cm}^3/\text{s}$, bei Typ 2 $1\text{Hz} / 10\text{cm}^3$, während bei Typ 3 $74\text{Hz} / 10\text{cm}^3/\text{s}$ erreicht werden. Eine Anpassung der Frequenz des Oszillators vom Typ 3 an die Anforderungen eines fluidischen Aktors kann also über einen sehr großen Betriebsbereich erfolgen. Der in Kapitel 2 mit Hilfe der FEM-Simulation wasserbetriebener Oszillatoren hergeleitete lineare Zusammenhang zwischen Frequenz und Volumenstrom scheint im vorliegenden Fall nur für kleine Volumenströme gegeben zu sein. Mit wachsendem Volumenstrom geht die Frequenz jedoch in einen Sättigungsbereich über.

Für die drei Oszillatoren wurde jeweils auch das Betriebsverhalten bei Verwendung von Ausgangsbelastungen in Form von Kanülen mit Innendurchmesser 840 μm und 510 μm untersucht und verglichen. Dabei zeigte sich, daß für den Oszillator vom Typ 2 bei der größten Ausgangsbelastung mit der gegebenen Meßtechnik schon für Volumenströme kleiner 153 cm^3/s keine Oszillation mehr nachweisbar war.

Für eine Verwendung des Oszillators als Ansteuerereinheit eines fluidischen Aktors würde sich also demnach ein entsprechend Typ 3 gestalteter Oszillator am besten eignen. Die Ergebnisse der Untersuchung dieses Oszillators beim Betrieb mit den bereits erwähnten drei verschiedenen Ausgangsbelastungen sind in den Abbildungen 3.18 - 3.20 dargestellt.

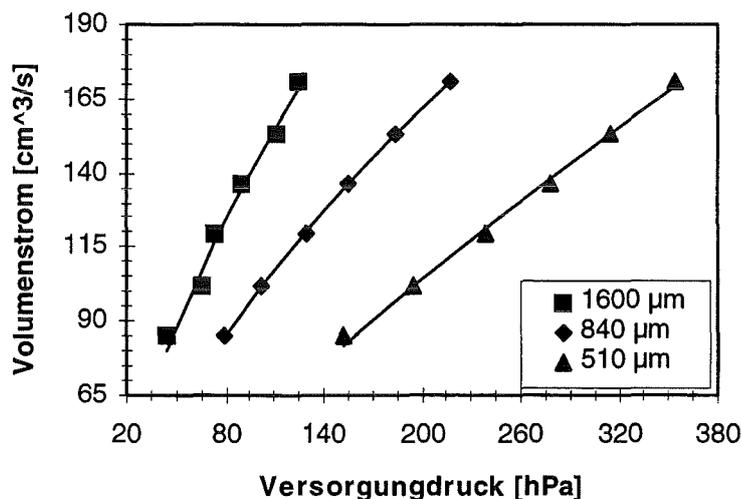


Abbildung 3.18 Kennlinien des stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillators Typ 3 bei unterschiedlichen Ausgangsbelastungen durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm , 840 μm und 510 μm .

Der erforderliche Versorgungsdruck nimmt wie erwartet mit kleiner werdendem Innendurchmesser der Kanülen, d.h. wachsender Ausgangsbelastung zu. Er erreicht für den kleinsten Innendurchmesser und den größten Volumenstrom einen Wert von 354 hPa.

Die gemessenen Ausgangsdruckdifferenzen nehmen dagegen ab, was darauf zurückzuführen ist, daß sich mit zunehmender Ausgangsbelastung am Ausgang ein Druck aufbaut, der nicht schnell genug abgebaut werden kann.

Aus diesem Grund nehmen auch die gemessenen Frequenzen mit abnehmendem Innendurchmesser der Kanülen ab. Alle drei Frequenz-Meßkurven scheinen mit größer werdendem Volumenstrom noch deutlicher als in Abbildung 3.17 in einen Sättigungsbereich überzugehen. Für Volumenströme bis maximal 136 cm^3/s wurden Ausgleichsgeraden berechnet, deren Steigungen mit wachsender Ausgangsbelastung von zunächst 89, auf 60 und schließlich 28 Hz pro 10 cm^3/s abnehmen. Die Möglichkeit der Anpassung des Oszillators an einen fluidischen Aktor verschlechtern sich also mit zunehmender Ausgangsbelastung. Auch die niedrigen Ausgangsdruckdifferenzen weisen darauf hin, daß der fluidische Aktor keinen zu großen Strömungsverlust bewirken sollte.

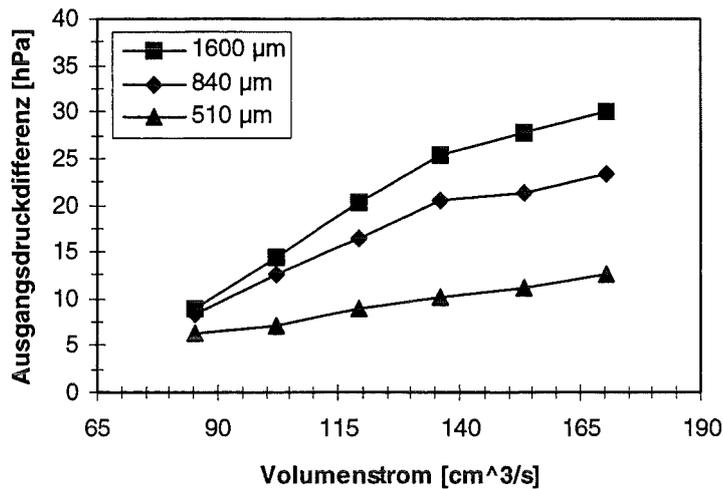


Abbildung 3.19 Ausgangsdruckdifferenzen des stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillators Typ 3 bei unterschiedlichen Ausgangsbelastungen durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm, 840 μm und 510 μm.

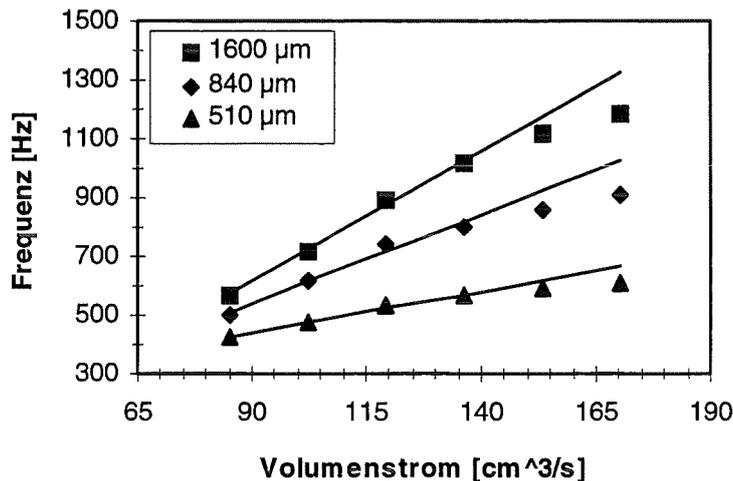


Abbildung 3.20 Frequenzen des stickstoffbetriebenen fluidischen Oszillators Typ 3 bei unterschiedlichen Ausgangsbelastungen durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm, 840 μm und 510 μm.

Allgemein liegen die ermittelten Frequenzen deutlich niedriger als beim Strahlableitkelement mit einfacher Rückführung. Dies liegt einerseits daran, daß durch die Ausstattung des Oszillators mit zwei Rückführungen die Schwingungsdauer verdoppelt bzw. die Frequenz halbiert wird, andererseits führt aber auch der beim Oszillator auftretende Coanda-Effekt dazu, daß der Strahl in seiner Ablenkung verbleibt, bis das Unterdruckgebiet, welches das Haften des Strahles verursacht, ausgeglichen ist. Beim Strahlableitkelement mit einfacher Rückführung kann der Strahl dagegen seine abgelenkte Position unmittelbar nach Wegfallen des Steuerimpulses verlassen, was die Schwingungsdauer verkürzt bzw. die Frequenz vergrößert.

Um zu überprüfen, ob der fluidische Oszillator für medizintechnische Anwendungen geeignet ist, wurde die im Folgenden dargestellte Untersuchung des Oszillators vom Typ 3 mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid durchgeführt.

Untersuchung des fluidischen Oszillators vom Typ 3 beim Betrieb mit Wasser:

Der Umbau der Meßapparatur zur Verwendung von Wasser als Antriebsfluid des Oszillators erfolgte wieder wie am Ende von Kapitel 3.1 beschrieben. Aufbauend auf den Ergebnissen der FEM-Simulation skalierteter Oszillatoren (siehe Kapitel 2.4) wurde ein für Wasser geeigneter Schwebekörper-Durchflußmesser mit einem Meßbereich von 0 - 12 l/h verwendet. Der Volumenstrom wurde in Schritten von 1 l/h erniedrigt bis keine Oszillation des Ausgangssignals mehr auflösbar war. Diese Untergrenze wurde bei einem Volumenstrom von 6 l/h erreicht. Als Ausgangsbelastung erwiesen sich nur die Kanülen mit einem Innendurchmesser von 840 µm als geeignet. Die gemessene Kennlinie sowie eine entsprechende Fitfunktion zeigt Abbildung 3.21.

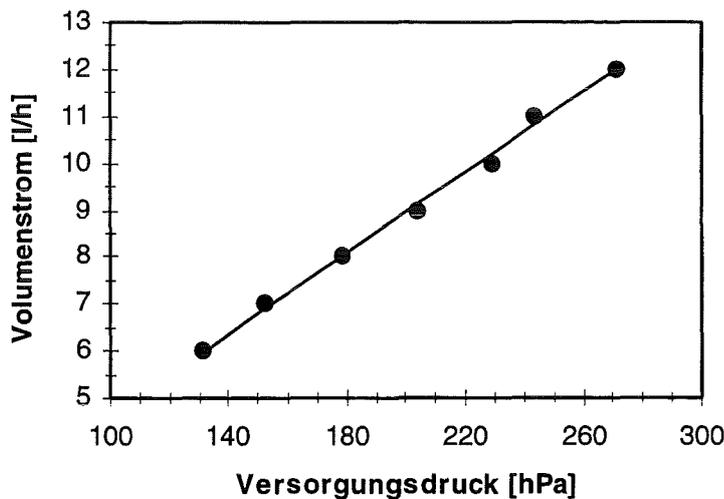


Abbildung 3.21 Kennlinie des wasserbetriebenen fluidischen Oszillators vom Typ 3 bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 840 µm.

Aufgrund der identischen Düsengeometrien und Volumenströme können wieder die gleichen Strömungsgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen wie beim wasserbetriebenen Strahlablenkelement mit einfacher Rückführung berechnet werden. Die Strömung ist daher auch hier über den gesamten Meßbereich turbulent. Die gemessenen Versorgungsdrücke liegen - im Gegensatz zu der Untersuchung der fluidischen Elemente mit Stickstoff als Arbeitsfluid - beim Oszillator deutlich höher als beim Strahlablenkelement mit einfacher Rückführung. Während beim Oszillator 131 - 271 hPa für einen Volumenstrom von 6 - 12 l/h erforderlich sind, reichten im Fall der Strahlablenkelemente 24 - 74 hPa aus. Dieses Ergebnis erklärt sich durch die unterschiedlichen Geometrien und Ausgangsbelastungen, d.h. den Strömungswiderstände der fluidischen Elemente. Beim wasserbetriebenen Strahlablenkelement konnte nur im Fall der Verwendung eines Schlauchstückes mit einer Länge von 30 mm und einem Innendurchmesser von 3 mm eine Schwingung des Ausgangssignals beobachtet werden. Beim Oszillator dagegen mußten die schon bei der Untersuchung der fluidischen Elemente mit Gas verwendeten Kanülen mit einem Innendurchmesser von 840 µm verwendet werden.

Im Vergleich zu den Ergebnissen der FEM-Simulation eines Oszillators mit einer Düsenweite von 500 µm (7,2 hPa bei einem Volumenstrom von 8,7 l/h) beträgt der Versorgungsdruck das mehr als 25 fache. Dies ist einerseits über die unterschiedlichen Stellräume, andererseits über die unterschiedliche Strukturhöhe der Oszillatoren zu erklären. Die Strukturhöhe des FEM-simulierten Oszillators betrug wegen der Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze

4167 μm . Dieser Wert ergab sich aus der Strukturhöhe des simulierten Basis-Oszillators von 250 μm , die entsprechend der in LIGA-Technik gefertigten Wandstrahlelemente aus Kapitel 1.1 gewählt worden war. Die hier untersuchten Oszillatoren hatten jedoch fertigungsbedingt eine Frästiefe von 2500 μm , woraus ein deutlich erhöhter Strömungswiderstand folgt. Darüber hinaus wurde die FEM-Simulation ohne jede Ausgangsbelastung durchgeführt.

Die ermittelten Ausgangsdruckdifferenzen (Abbildung 3.22) streuen auch hier stark. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde auch bei der Untersuchung der wasserbetriebenen Oszillatoren durch Ausgasungen erschwert. Ein Vergleich der Werte mit den für das Strahlablelement ermittelten oder aus der FEM-Simulation berechneten Ausgangsdruckdifferenzen ist aufgrund der bereits diskutierten unterschiedlichen Ausgangsbelastungen nicht möglich.

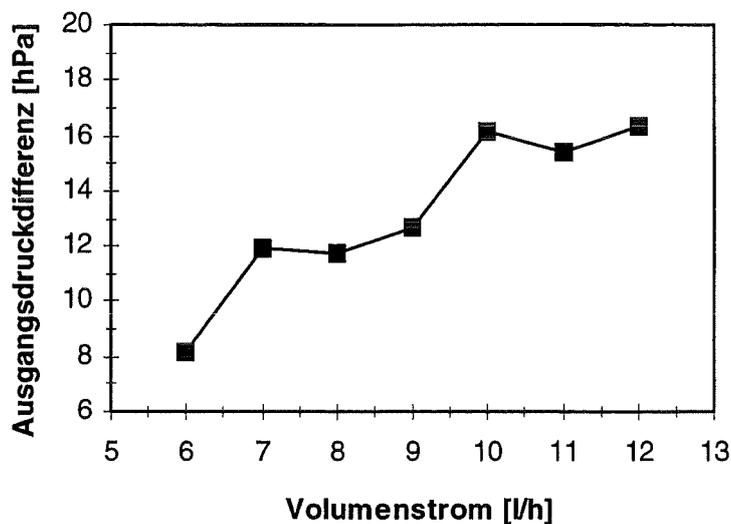


Abbildung 3.22 Ausgangsdruckdifferenzen des wasserbetriebenen fluidischen Oszillators vom Typ 3 bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 840 μm .

Die gemessenen Frequenzen des Fluidstrahls zeigt Abbildung 3.23. Die Untergrenze des Volumenstroms, für den eine Frequenz noch bestimmbar war, betrug 7 l/h . Die Frequenzen streuen um die berechnete Ausgleichsgerade, wenngleich der aus den Ergebnissen der FEM-Simulation abgeleitete lineare Zusammenhang zwischen Frequenz und Volumenstrom deutlich erkennbar ist. Die Steigung der Ausgleichsgerade beträgt $2\text{Hz}/1\text{l/h}$. Ein Sättigungsbereich scheint im Gegensatz zum Gasbetrieb des Oszillators bis zu einem Volumenstrom von 12 l/h nicht erreicht zu werden. Im Vergleich zu den für das wasserbetriebene Strahlablelement mit einfacher Rückführung gemessenen Frequenzen (88 - 129 Hz für einen Volumenstrom von 7 - 12 l/h) liegen die Frequenzen des Oszillators mit 19 - 31 Hz wieder deutlich niedriger. Dieser Sachverhalt erklärt sich auch hier über die unterschiedliche Anzahl der Rückführungen und das Auftreten des Coanda-Effektes beim Oszillator. Überraschend ist der große Unterschied zwischen dem Ergebnis der FEM-Simulation (0.88 Hz für einen Volumenstrom von 8.7 l/h) und der hier beschriebenen experimentellen Untersuchung des Oszillators vom Typ 3. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß der Verlauf der Frequenz der Oszillatoren aufgrund ihrer unterschiedlichen Steuerräume, Strukturhöhen und Ausgangsbelastungen nicht direkt verglichen werden kann.

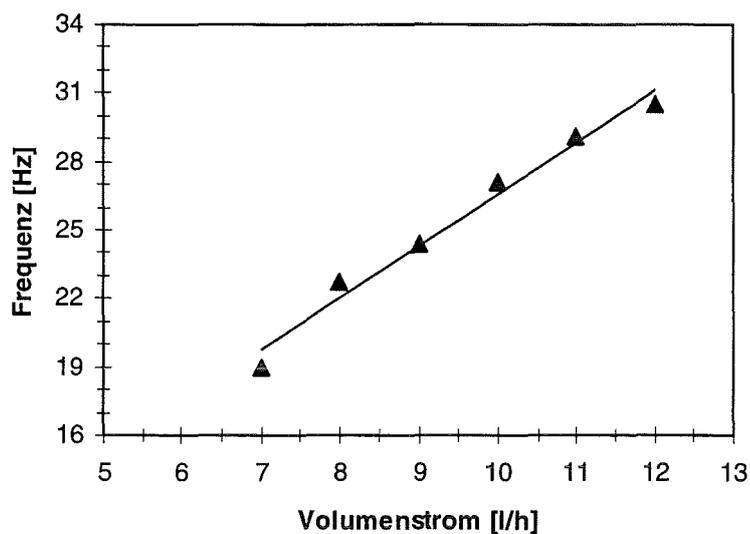


Abbildung 3.23 Frequenzen des wasserbetriebenen fluidischen Oszillators vom Typ 3 bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 840 μm .

Es läßt sich also zusammenfassend sagen, daß ein Oszillator mit entsprechend dem Wandstrahlelement aus Kapitel 1.1 gestaltetem Stellerraum, d.h. einer Stufe in der Haftwand und Rückführungen mit mindestens der doppelten Steuerdüsenweite, das stabilste und reproduzierbarste Betriebsverhalten beim Betrieb mit Stickstoff oder Wasser als Antriebsfluid aufweist.

Darüber hinaus konnte der lineare Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Volumenstrom, der mit Hilfe der FEM-Simulation wasserbetriebener Oszillatoren hergeleitet worden war, für eine Verwendung von Wasser experimentell überprüft werden. Für Stickstoff als Antriebsfluid war diese Proportionalität nur für kleine Volumenströme erkennbar. Bei diesen Untersuchungen zeigte sich außerdem, daß die Frequenz eines Oszillators sowie seine Empfindlichkeit ($\Delta f/\Delta Q$) mit wachsender Ausgangsbelastung abnehmen. Unter der Voraussetzung der Übertragbarkeit der Betriebscharakteristik bei der Verwendung von Stickstoff auf einen Wasserbetrieb sind diese Ergebnisse im Hinblick auf eine Abstimmung des Oszillators auf den Linearaktor relevant.

Bei der Verwendung von Wasser zeigte sich außerdem, daß die Reproduzierbarkeit der Messungen durch Ausgasungen deutlich verringert wurde. Durch kleinste Gasblasen, welche die Strömungskanäle - besonders die Fluidrückführungen - verengen oder vollständig verschließen, werden Asymmetrien in der Oszillatorgeometrie erzeugt, die den Betrieb des Oszillators beeinflussen oder sogar verhindern. Durch Spülen der fluidischen Elemente mit Isopropanol konnte die Haftungsneigung der Bläschen an den Strukturwänden vermindert werden. Es wurde jedoch beobachtet, daß die Struktur dadurch in Bereichen großer Materialspannungen zur Reißbildung neigten und die Blasen nach ca. 30 Minuten Betrieb, so stark wie vor dem Spülen an den Strukturwänden hafteten. Bei einer Verkleinerung der Strukturen, welche für die Verwendung des Oszillators als Ansteuereinheit eines fluidischen Aktors notwendig ist, ist zu befürchten, daß diese Blasenbildung ein noch größeres Problem darstellt. Die experimentelle Untersuchung solcher miniaturisierter Oszillatoren ist im nächsten Kapitel dargestellt.

4. Miniaturisierung des fluidischen Oszillators

Für die geplante Verwendung des Oszillators in Kombination mit dem Linearaktor aus Kapitel 1.2 ist eine deutliche Verkleinerung der Strukturen notwendig. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 2.4 dargestellten Skalierungsverhaltens der Betriebsgrößen eines fluidischen Oszillators und der experimentellen Ergebnisse wasserbetriebener Oszillatoren, die im vorangegangenen Kapitel dargestellt sind, können für diese miniaturisierten Modelle Vorhersagen bezüglich des zu erwartenden Betriebsbereiches getroffen und somit sinnvolle Verkleinerungsmaßstäbe ermittelt werden. Ein Überblick über die so bestimmten voraussichtlichen Werte liefert Tabelle 4.1, in der noch einmal der funktionale Zusammenhang zwischen der Betriebsgröße des Bezugsmodells (ungestrichener Parameter) und dem skalierten Modell (gestrichene Größe) dargestellt ist. Grundlage dieser funktionalen Zusammenhänge ist Identität der Reynoldszahl Re des Bezugsmodells und der Reynoldszahl eines form- und winkeltreu skalierten Modells Re' .

Skalierungs- faktor	Versorgungs- düsenweite	Höhe	Versorgungs- druck	Volumenstrom	Frequenz
k	$d'=k*d$	$h'=k*h$	$p'_v=1/k^2*p_v$	$Q'=k*Q$	$f'=1/k^2*f$
[-]	[μm]	[μm]	[hPa]	[ℓ/h]	[Hz]
1	500	2500	131 - 271	6 - 12	19 - 31
0.8	400	2000	205 - 423	4.8 - 9.6	30 - 48
0.6	300	1500	364 - 753	3.6 - 7.2	53 - 86
0.4	200	1000	819 - 1694	2.4 - 4.8	119 - 194
0.2	100	500	3275 - 6775	1.2 - 2.4	475 - 775
0.1	50	250	13100 - 27100	0.6 - 1.2	1900 - 3100

Tabelle 4.1 Skalierungsverhalten wesentlicher Betriebsgrößen wasserbetriebener fluidischer Oszillatoren.

Unter Berücksichtigung der experimentellen Ergebnisse der Untersuchung des Linearaktors (Kapitel 1.2.2) ist Tabelle 4.1 zu entnehmen, daß eine Verkleinerung der Versorgungsdüsenweite auf 50 μm aufgrund der hohen Frequenzen nicht mehr sinnvoll ist. Der Kolben würde bei Frequenzen dieser Größe nur noch einen minimalen Hub ausführen. Außerdem ist bei Versorgungsdrücken in der berechneten Größenordnung mit großen experimentellen Schwierigkeiten bei der Anschlußtechnik der Mikrostrukturen zu rechnen.

Eine Versorgungsdüsenweite von 100 μm entspricht dem maximal möglichen Wert, wenn alle anderen Dimensionen ihr Verhältnis zur Versorgungsdüsenweite beibehalten und die Gesamtabmessungen des Oszillators die des Linearaktors nicht überschreiten sollen. Diese Anforderung muß jedoch an einen Oszillator gestellt werden, wenn ein modularer Stapelaufbau, wie er im Fall der Kombination aus Wandstrahlelement und Linearaktor realisiert wurde, möglich bleiben soll. Bei einer Versorgungsdüsenweite von 100 μm ist, unter Berücksichtigung des mindestens notwendigen Aspektverhältnisses von 5, eine Strukturhöhe von 500 μm notwendig. Ein Oszillator mit diesen Abmessungen kann in LIGA-Technik hergestellt werden.

Bei Versorgungsdüsenweiten größer $100\ \mu\text{m}$ muß aufgrund der dann notwendigen Strukturhöhe größer $500\ \mu\text{m}$ auf feinmechanische Fertigungsmethoden zurückgegriffen werden. Hier bieten sich das Funkenerodieren oder das Fräsen an. Bei einer durch Funkenerodieren hergestellten Struktur besteht das Problem, daß die durch die Strukturierung der Rückführungskanäle vom Oszillator separierten Bereiche nachträglich paßgenau zur verbleibenden Struktur wieder positioniert werden müssen. Dies ist, wie in Vorversuchen ermittelt wurde, nicht mit der notwendigen Genauigkeit möglich, wodurch Asymmetrien in der Geometrie entstehen, die einen stabilen Betrieb des Oszillators verhindern. Die kleinste, durch Fräsen herstellbare Versorgungsdüsenweite, bei der auch ein Aspektverhältnis von 5 gewährleistet werden kann, beträgt $300\ \mu\text{m}$. Ein miniaturisierter Oszillator mit einer solchen Versorgungsdüsenweite wurde hergestellt und als Zwischenschritt auf dem Weg zu einem Mikro-Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von $100\ \mu\text{m}$ experimentell untersucht.

4.1 Feinmechanisch gefertigte miniaturisierte Oszillatoren

Die Funktionseinheit des miniaturisierten Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von $300\ \mu\text{m}$ wurde entsprechend dem in Abbildung 3.12c gezeigten Oszillator vom Typ 3 gefertigt.

Das Oszillatormodell wurde wieder so entworfen, daß in die Bodenplatte, in die die Struktur gefräst wird, Drucksensoren eingeschraubt werden können und ein Deckel, der die Fluidanschlüsse trägt, die gefräste Struktur verschließt. Als Drucksensoren wurden die kleinsten kommerziell erhältlichen Sensoren¹³, die ausreichend hohe Eigenfrequenzen besitzen, verwendet. Diese Sensoren arbeiten in einem Meßbereich von 0 - 1.7 hPa Überdruck mit einer Genauigkeit von 0.1 % des maximal möglichen Meßwertes. Sie besitzen Eigenfrequenzen von 300 kHz und gestatten Druckänderungen mit Frequenzen bis zu 30 kHz zu messen [Kul-96]. Die Sensorflächen besitzen einen Durchmesser von 2.6 mm, so daß der Oszillator vom Typ 3, der eine Düsenweite von $500\ \mu\text{m}$ besitzt, zusammen mit den Drucksensoren und deren Position nahezu formtreu auf 60 % der ursprünglichen Größe verkleinert werden konnte. Die übrige Meßtechnik blieb gegenüber der in Kapitel 3.1 beschriebenen sowohl bei der Untersuchung der Strukturen mit Stickstoff als auch mit Wasser unverändert.

Um auch die Ausgangsbelastungen exakt mit zu skalieren, wäre eine Verkleinerung der Durchmesser der bisher verwendeten Kanülen von 1600 auf $960\ \mu\text{m}$, von 840 auf $504\ \mu\text{m}$ und von 510 auf $306\ \mu\text{m}$ notwendig. Außerdem müßten die Fluidanschlußstücke und die Kanülenlängen mitverkleinert werden. Die Anschlußstücke sind jedoch nur in einer Größe und die Kanülen nur in bestimmten Durchmessern und in einer Länge erhältlich. Es wurden daher für die Untersuchung der Oszillatoren Kanülen mit einem Durchmesser von $840\ \mu\text{m}$, $510\ \mu\text{m}$ und $330\ \mu\text{m}$ verwendet. Zusätzlich wurde das Betriebsverhalten auch bei der Verwendung von Kanülen mit Innendurchmesser $1600\ \mu\text{m}$ untersucht. Aufgrund der eingeschränkt formtreuen Verkleinerung der Ausgangsbelastungen des Oszillators ist ein Vergleich des Betriebsverhaltens der Oszillatoren mit einer Versorgungsdüsenweite von $500\ \mu\text{m}$ und von $300\ \mu\text{m}$ entsprechend den Ähnlichkeitsgesetzen nur unter Vorbehalten möglich.

¹³Firma Kulite, Hofheim/Taunus, Typ XT-140M

4.1.1 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Stickstoff

Eine weitere Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit des Betriebsverhaltens der Oszillatoren mit 500 μm und mit 300 μm Versorgungsdüsenweite ist neben der Form- und Winkeltreue der Geometrie die Gleichheit des interessierenden Reynoldszahlbereiches der Strömung. Diese Gleichheit wird über eine Skalierung des Volumenstroms erreicht, welche entsprechend Tabelle 2.3 erfolgt. Da beim Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm der Volumenstrom bei der Verwendung von Stickstoff zwischen 85 und 170 cm^3/s variiert wurde, muß demnach bei der Untersuchung des Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 300 μm ein Volumenstrom von 51 bis 102 cm^3/s untersucht werden. Um eine umfangreichere Charakterisierung des miniaturisierten Oszillators zu ermöglichen, wurde sein Betriebsverhalten zusätzlich für Volumenströme zwischen 102 und dem Maximalwert des Volumenstrommessers von 170 cm^3/s untersucht.

In einer Voruntersuchung wurde zunächst die Eignung der bereits genannten Kanülen als Ausgangsbelastung überprüft. Dabei wurde festgestellt, daß bei Verwendung der Kanülen mit einem Innendurchmesser von 330 μm und 510 μm über den gesamten Meßbereich keine Frequenz des Oszillators bestimmt werden konnte, wengleich unregelmäßige Schwingungen in den Ausgangsdrucksignalen beobachtbar waren. Bei einer Ausgangsbelastung des Oszillators durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 840 μm und 1600 μm war ein Mindestvolumenstrom von 85 cm^3/s notwendig, um eine periodische Schwingung zu ermitteln. Da dieser Volumenstrom größer als der theoretisch erwartete Wert von 51 cm^3/s ist, werden also durch die Verkleinerung der Struktur größere Mindestreynoldszahlen für einen stabilen Betrieb benötigt.

Mit Gleichung 1.2 ergaben sich aus den Volumenströmen Strömungsgeschwindigkeiten im Zulauf der Versorgungsdüse von 38 - 76 m/s . Der für den Zulauf der Versorgungsdüse berechnete hydraulische Durchmesser des verkleinerten Oszillators beträgt 1500 μm , so daß die mit Gleichung 1.2 berechneten Reynoldszahlen Werte zwischen 4056 und 8111 annehmen. Die Strömung ist demnach, wie zu erwarten, im untersuchten Volumenstrombereich turbulent. Über die Strömungsverhältnisse in der Versorgungsdüse kann aus den bereits erwähnten Gründen (siehe Kapitel 3.2.2) auch hier keine Aussage gemacht werden.

Die Kennlinien des miniaturisierten Oszillators für eine Ausgangsbelastung durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 840 μm bzw. 1600 μm sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die erforderlichen Versorgungsdrücke erreichen im Fall der stärkeren Ausgangsbelastung Werte bis zu 804 hPa. Zur Verdeutlichung des Verlaufes der Kennlinien wurden wieder geeignete Fitfunktionen berechnet.

Bei der Messung der Ausgangsdrücke zeigte sich, daß die Streuung der minimalen und maximalen Ausgangsdrücke wesentlich stärker als beim Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm war. Die Differenz der Ausgangsdrücke ist daher mit einem größeren Fehler behaftet und zeigt insgesamt einen unsystematischen Verlauf. Für einen Strahlaustritt an Ausgang 1 (A1) bzw. an Ausgang 2 (A2) ergaben sich darüber hinaus sehr unterschiedliche Ausgangsdruckdifferenzen, weshalb auf die Bildung des Mittelwertes in diesem Fall verzichtet wurde (Abbildung 4.2). Im Fall einer Belastung des Oszillators durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 1600 μm betragen die Ausgangsdruckdifferenzen 105 - 178 hPa bzw. 5 - 79 hPa, für eine Belastung durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 840 μm ergaben sich 117 - 208 hPa bzw. 17 - 111 hPa. Aus diesem Ergebnis kann auf eine fertigungsbedingte Asymmetrie des Oszillators geschlossen werden,

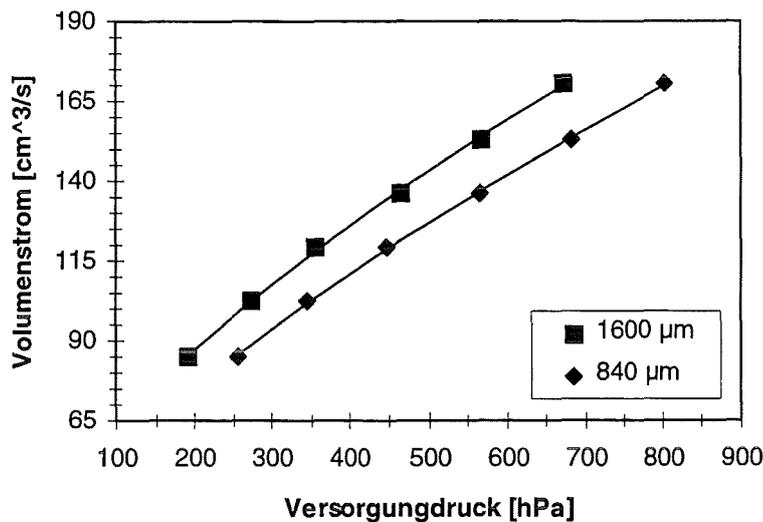


Abbildung 4.1 Kennlinien des miniaturisierten stickstoffbetriebenen Oszillators ($d_v = 300 \mu\text{m}$) bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm bzw. 840 μm .

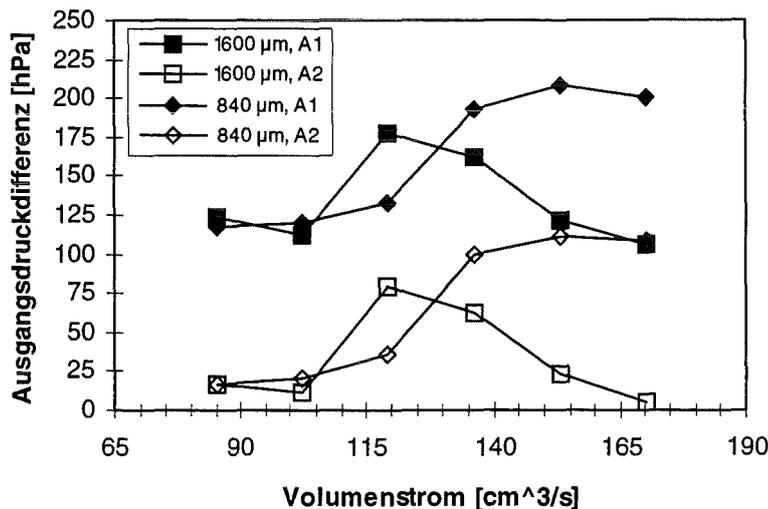


Abbildung 4.2 Ausgangsdruckdifferenzen des miniaturisierten stickstoffbetriebenen Oszillators ($d_v = 300 \mu\text{m}$) bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm bzw. 840 μm .

was dazu führt, daß die Ablenkung des Strahles zur rechten bzw. zur linken Haftwand nicht gleich stark ist.

Eine Bestimmung des genauen Frequenzverlaufes war daher ebenfalls nur schwer möglich. Die Volumenstromabhängigkeit der Frequenz im Fall einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 1600 μm bzw. 840 μm zeigt Abbildung 4.3. Auch hier, wie schon beim Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm , verringert sich im Fall der stärkeren Ausgangsbelastung die Zunahme der Frequenz mit zunehmendem Volumenstrom. Zur Berechnung der ebenfalls eingezeichneten Ausgleichsgeraden wurden die für Volumenströme zwischen 85 und 153 cm³/s gemessenen Frequenzen (1600 μm -Messung) bzw. die für Volumenströme zwischen 85 und 136 cm³/s gemessenen Frequenzen (840 μm -Messung) betrachtet. Die numerisch ermittelte Linearität des Zusammenhangs zwischen der

Frequenz und dem Volumenstrom kann also für kleine Volumenströme auch hier durch die Messung bestätigt werden. Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt $397\text{Hz} / 10\text{cm}^3/\text{s}$ (1600 μm -Messung) bzw. $354\text{ Hz} / 10\text{cm}^3/\text{s}$ (840 μm -Messung).

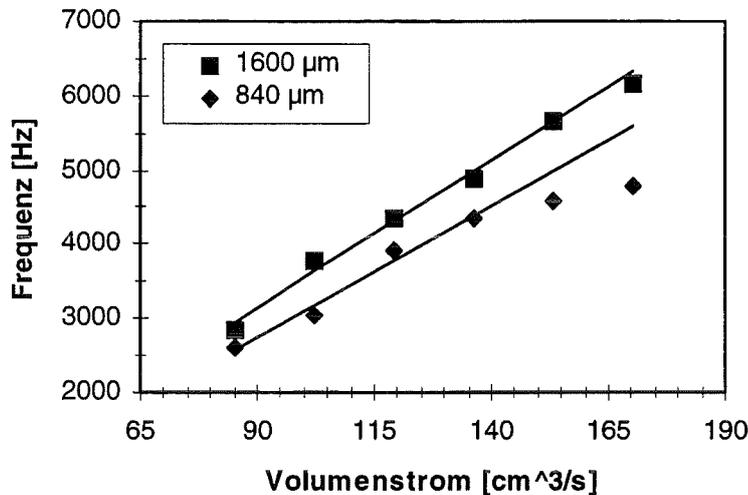


Abbildung 4.3 Frequenzen des miniaturisierten stickstoffbetriebenen Oszillators ($d_V = 300\ \mu\text{m}$) bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser 1600 μm bzw. 840 μm .

Um das in Kapitel 2.4 über die numerische Simulation des fluidischen Oszillators hergeleitete Skalierungsverhalten der Frequenzen (Gleichung 2.10) experimentell zu verifizieren, wurden die ermittelten Ergebnisse (840 μm -Messung) mit entsprechend den Ähnlichkeitsgesetzen berechneten Betriebsgrößen verglichen. Dieser Berechnung lagen die Meßergebnisse des stickstoffbetriebenen Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm und einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 1600 μm zugrunde. Für gleiche Volumenstrom- d.h. Reynoldszahlbereiche betragen die berechneten Frequenzen 2917 - 3292 Hz, während die gemessenen Werte mit 2617 - 3028 Hz etwas niedriger lagen. Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung, da die Ausgangsbelastung des miniaturisierten Oszillators wie weiter oben erwähnt aus technischen Gründen etwas zu stark war. Es kann daher insgesamt von einem der Theorie entsprechenden Skalierungsverhalten der Frequenz des stickstoffbetriebenen Oszillators ausgegangen werden kann.

4.1.2 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Wasser

Um die experimentellen Ergebnisse des wasserbetriebenen miniaturisierten Oszillators ebenfalls im Rahmen einer Ähnlichkeitsbetrachtung mit den Ergebnissen wasserbetriebener Oszillatoren mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm vergleichen zu können, wurden die hier beschriebenen Untersuchungen für Volumenströme zwischen 3 und 8 ℓ/h durchgeführt. Ein Volumenstrom von 3 ℓ/h entsprach dabei dem minimalen Volumenstrom bei dem Schwankungen in den Ausgangsdrucksignalen noch nachweisbar waren. Diese Schwankungen konnten jedoch nur bei einer Belastung der Ausgänge durch Kanülen mit einem Innendurchmesser von 510 μm erfaßt werden.

Während die Versorgungskennlinie des wasserbetriebenen miniaturisierten Oszillators problemlos erfaßt werden konnte und die gemessenen Versorgungsdrücke mit 161 - 661 hPa im Rahmen der Erwartungen lagen, gestaltete sich die Erfassung periodischer Ausgangsdrucksignale und somit die Bestimmung des Frequenzverlaufs äußerst schwierig.

Die Minima und Maxima der Ausgangsdrucksignale streuten wesentlich stärker als bei der Untersuchung der Struktur mit Stickstoff als Arbeitsfluid. Exemplarisch zeigt Abbildung 4.4 die für einen Volumenstrom von 7 l/h aufgenommenen Meßsignale

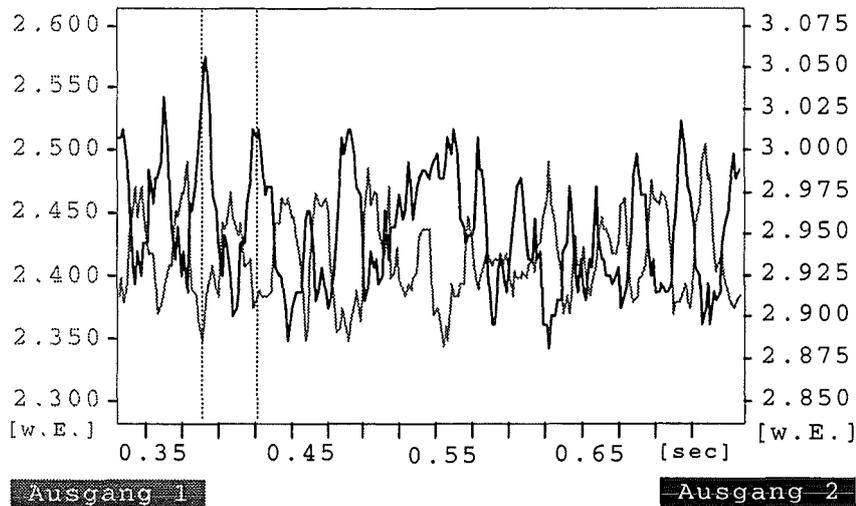


Abbildung 4.4 Ausgangsdrucksignale des wasserbetriebenen miniaturisierten Oszillators ($d_v = 300 \mu\text{m}$) bei einer Ausgangsbelastung durch Kanülen mit Innendurchmesser $510 \mu\text{m}$ und einem Volumenstrom von 7 l/h.

Die aus diesen Signalen bestimmte Frequenz beträgt 26 Hz, wobei die beiden eingezeichneten vertikalen Linien die betrachtete Schwingungsdauer verdeutlichen. Der Schwingung überlagert ist eine unregelmäßige Schwingung mit einer Frequenz in der Größenordnung von 100 Hz. Ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang mit dem Volumenstrom konnte weder für die kleinen noch für die großen Frequenzen bestimmt werden.

Neben der starken Streuung der minimalen und maximalen Ausgangsdrücke wurde wie schon beim Stickstoffbetrieb des miniaturisierten Oszillators wieder der Unterschied in den ermittelten Ausgangsdruckdifferenzen, für einen hauptsächlich Strahlaustritt an Ausgang 1 bzw. an Ausgang 2, festgestellt. Ein systematischer Verlauf der Ausgangsdruckdifferenzen konnte wie schon bei der Verwendung von Stickstoff auch hier nicht ermittelt werden.

In Anbetracht dieser Ergebnisse wurde von der Durchführung einer Skalierungsbetrachtung abgesehen. Die bereits beim Betrieb der Oszillatoren festgestellte Asymmetrie der Struktur macht sich also auch bei der Untersuchung der Strukturen mit Wasser stark bemerkbar. Darüber hinaus beeinträchtigten die bereits erwähnten, beim Betrieb mit Wasser auftretenden Ausgasungen die Strömung trotz Benetzung der Strukturwände mit Isopropanol sehr stark. Die Ursache für beide Erscheinungen ist in der feinmechanischen Fertigung des miniaturisierten Oszillators zu suchen. Zu große Fertigungstoleranzen führen zu Asymmetrien, die einen stabilen Betrieb verhindern. Darüber hinaus begünstigt eine große Rauigkeit der Oberfläche, d.h. eine große Zahl an Ausgasungskeimen, die Haftung von Blasen in der Struktur.

4.2 Mikro-Oszillatoren in LIGA-Technik

In einem nächsten Schritt wurde der fluidische Oszillator weiter verkleinert und mit einer Versorgungsdüsenweite von $100\ \mu\text{m}$ und einer Strukturhöhe von $500\ \mu\text{m}$ in LIGA-Technik als Primärstruktur aus PMMA hergestellt. Die REM-Aufnahmen in Abbildung 4.5 zeigen eine Gesamtansicht des Mikro-Oszillators sowie einen Ausschnitt, in dem der Schaltraum und ein Teil der Fluidrückführungen und der Ausgänge zu sehen sind.

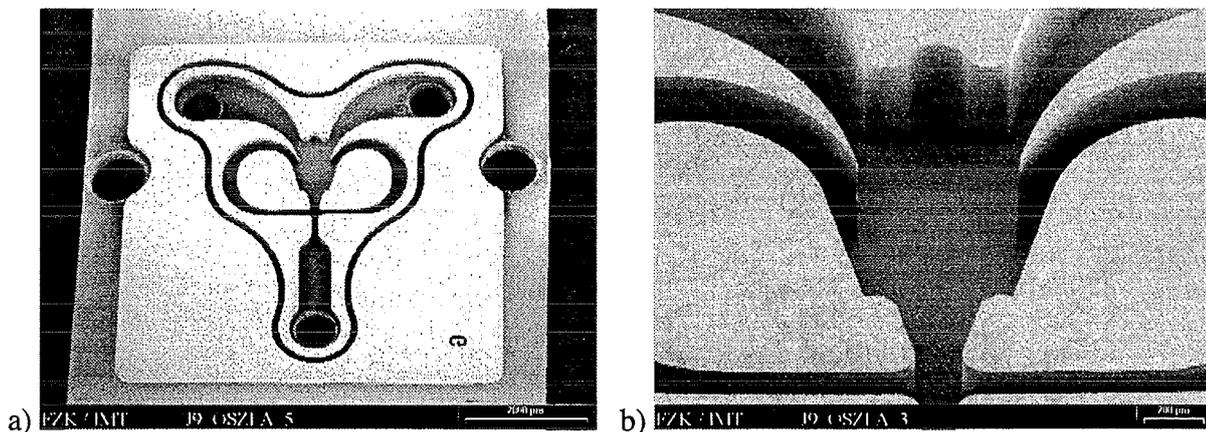


Abbildung 4.5 REM-Aufnahmen des fluidischen Mikro-Oszillators

a) Gesamtansicht des Mikro-Oszillators.

b) Schaltraum und ein Teil der Fluidrückführungen und der Ausgänge.

Der Schaltraum und die Fluidrückführungen wurden entsprechend dem Oszillator Typ 3 aus Kapitel 3.2 bzw. dem in Kapitel 4.1 untersuchten feinmechanisch hergestellten fluidischen Oszillator gestaltet, wobei die Abmessungen der Designs auf ein Fünftel bzw. ein Drittel verkleinert wurden. Ebenfalls formtreu skaliert wurde die Versorgungsdüse, während die Fluidabführungen so gestaltet wurden, daß die Fluidausgänge und der Fluideingang die gleiche geometrische Anordnung bilden wie beim Wandstrahlelement. So konnte gewährleistet werden, daß die Anschlußtechnik der Wandstrahlelement-Linearaktor-Kombination auch für die Kombination aus fluidischem Oszillator und Linearaktor zu verwenden ist. Um die Oszillatorstruktur wurde wie schon beim Linearaktor ein Stoppgraben strukturiert, um die Möglichkeit zu schaffen, einen Deckel aufzukleben.

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, wurden auch beim Mikro-Oszillator mit dem Laser Löcher in das Keramiksubstrat geschnitten. Sie sind einerseits für die Fluidanschlüsse und die Meßtechnik, andererseits zur Aufnahme von Paßstiften notwendig.

Aufgrund der Abmessungen des Mikro-Oszillators war es nicht möglich die Drucksensoren¹⁴ so zu positionieren, daß die Sensorfläche mit der strömungsbegrenzenden Wand abschließt, wie dies in den vorangegangenen Kapiteln der Fall war. Es wurden daher eine geeignete Deckplatte und entsprechende Adapter, die die Sensoren mit der Deckplatte verbinden, entworfen. Der Mikro-Oszillator wurde zur Untersuchung zwischen dieser Deckplatte und einer Fluidanschlußplatte verpreßt. Die Ausrichtung erfolgte dabei über die Verwendung der genannten Paßstifte. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

¹⁴Firma Kulite (Hofheim), Typ XTM-190M

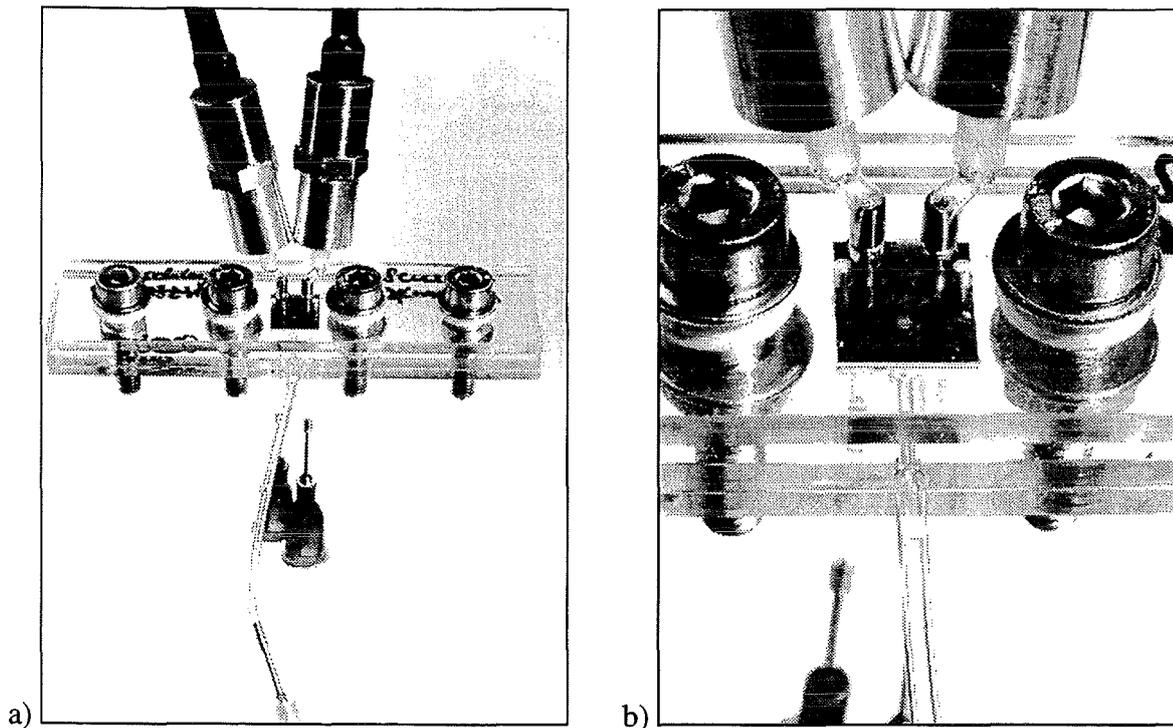


Abbildung 4.6 a) Zur experimentellen Untersuchung zwischen einer Deckplatte und einer Fluidanschlußplatte montierter Mikro-Oszillator mit Drucksensordaptern und Drucksensoren.
b) Vergrößerte Darstellung des Mikro-Oszillators

Um das Betriebsverhalten des Mikro-Oszillators wieder mit den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel vergleichen zu können, wurde die Ausgangsbelastung entsprechend der Struktur verkleinert. Diese Skalierung war jedoch, wie schon im Fall der miniaturisierten Oszillatoren mit einer Versorgungsdüsenweite von $300\ \mu\text{m}$, nicht exakt formtreu möglich. Eine technisch realisierbare Ausgangsbelastung, bei der sowohl mit Gas als auch mit Wasser über einen großen Volumenstrombereich eine Schwingung des Fluidstrahls gemessen werden konnte, bestand in einem $20\ \text{mm}$ langen Schlauchstück mit einem Innendurchmesser von $750\ \mu\text{m}$, das von einer $15\ \text{mm}$ langen Kanüle mit einem Innendurchmesser von $510\ \mu\text{m}$ verengt wurde.

Die Untersuchung des Mikro-Oszillators wurde wieder zunächst unter Verwendung von Stickstoff und dann unter Verwendung von Wasser durchgeführt. Es wurde die Versorgungskennlinie ermittelt sowie der zeitliche Verlauf der Ausgangsdruckdifferenz, aus dem die Frequenz ermittelt werden kann.

4.2.1 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Stickstoff

Die experimentelle Untersuchung des Mikro-Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von $100\ \mu\text{m}$ wurde für einen Stickstoffvolumenstrom von 0 bis $51\ \text{cm}^3/\text{s}$ durchgeführt. Es konnten über den gesamten Bereich oszillierende gegenphasige Ausgangsdrucksignale erfaßt werden, die eine „kleine“ und eine „große“ Frequenz besitzen. Während die kleine Frequenz mittels Fouriertransformation bestimmt werden konnte, war eine Bestimmung der großen Frequenz aufgrund der Unregelmäßigkeit nur für einzelne Schwingungen möglich. Eine typische Messung der beiden Ausgangsdrucksignale für einen Volumenstrom von $43\ \text{cm}^3/\text{s}$ ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

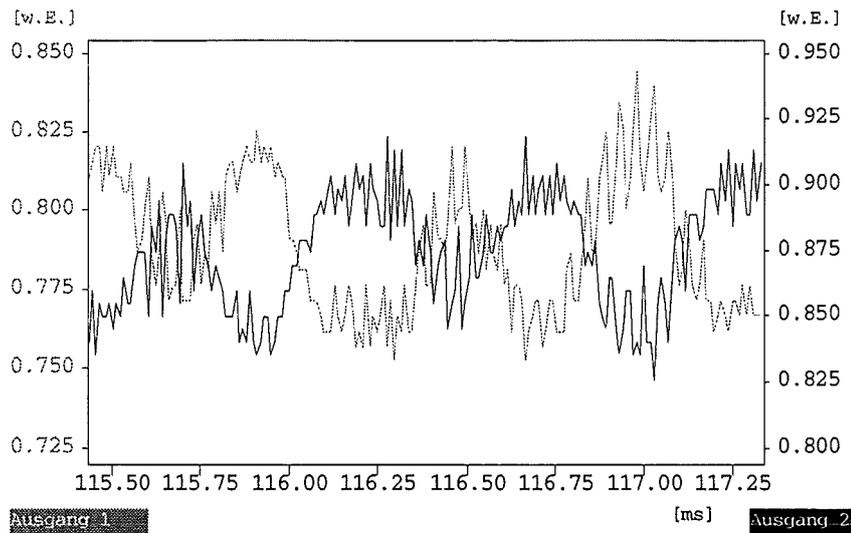


Abbildung 4.7 Ausgangsdrucksignale des stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillators ($d_V = 100 \mu\text{m}$).

Für die kleinen Frequenzen wurden über den gesamten untersuchten Volumenstrombereich Werte von 1,5 bis 1,8 kHz bestimmt, während für die großen Frequenzen Werte von über 25 kHz ermittelt wurden. Eine systematische Zunahme der Frequenz mit dem Volumenstrom, wie sie bei der Untersuchung der größeren Oszillatoren stets festgestellt wurde, konnte weder für die kleinen noch für die großen Frequenzen experimentell erfasst werden.

Die erfasste Versorgungskennlinie des Mikro-Oszillators sowie eine berechnete Fitfunktion zeigt Abbildung 4.8.

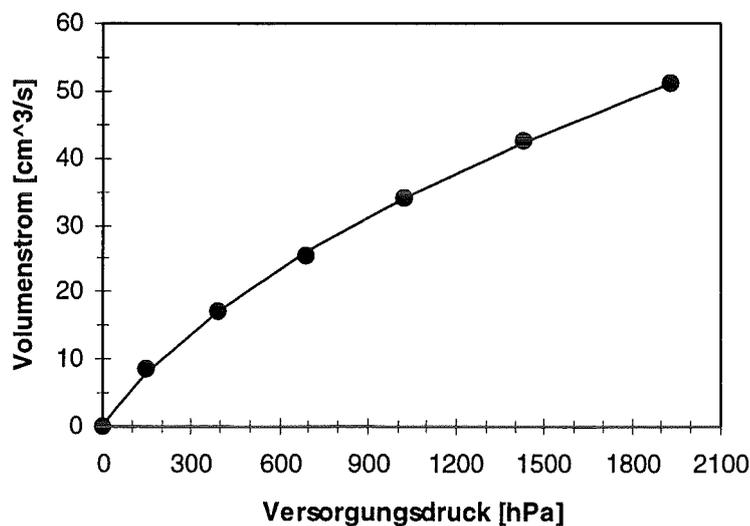


Abbildung 4.8 Abhängigkeit des Volumenstroms durch den stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillator vom Versorgungsdruck.

Es wurden Versorgungsdrücke bis zu 1931 hPa gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Zulauf der Versorgungsdüse betragen bis zu 204 m/s mit Reynoldszahlen bis zu 7286.

Da die in Kapitel 4.1 ermittelten charakteristischen Betriebsgrößen des miniaturisierten Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von $300 \mu\text{m}$ von einer fertigungsbedingten Asymmetrie der Struktur geprägt waren, wurden die Betriebsparameter des Mikro-Oszillators

mit den skalierten Werten des Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von $500\ \mu\text{m}$ verglichen. Unter der Voraussetzung einer exakt formtreuen Abbildung der Geometrie, die auch die Ausgangsbelastungen einschließt, sollten die Versorgungsdrücke des Mikro-Oszillators im untersuchten Volumenstrombereich bis zu $3125\ \text{hPa}$ betragen. Aus der Versorgungskennlinie kann daher geschlossen werden, daß die Ausgangsbelastung zu gering ist, um eine genaue Ähnlichkeitsbetrachtung zu erlauben.

Die Frequenzen der Schwingung sollten bei einer exakten Skalierung der Ausgangsbelastungen Werte größer $15\ \text{kHz}$ annehmen, die sich bei einer zu geringen Ausgangsbelastung noch vergrößern sollten. Die durch eine Fouriertransformation bestimmbar kleinen Frequenzen müssen daher als Superposition der eigentlichen Schwingung des Fluidstrahles gewertet werden. Die Hauptschwingung des Fluidstrahles ist offensichtlich für eine Ausbildung der Strömung zu schnell, da der Druck am nicht beschalteten Ausgang nicht schnell genug abgebaut werden kann. Bestätigt wird dieses Ergebnis durch die ermittelten Ausgangsdruckdifferenzen, die in Abbildung 4.9 dargestellt sind. Sie sollten bei einer exakten Skalierung bis zu $750\ \text{hPa}$ betragen. Darüber hinaus ist der systematische Anstieg mit zunehmendem Volumenstrom durchbrochen.

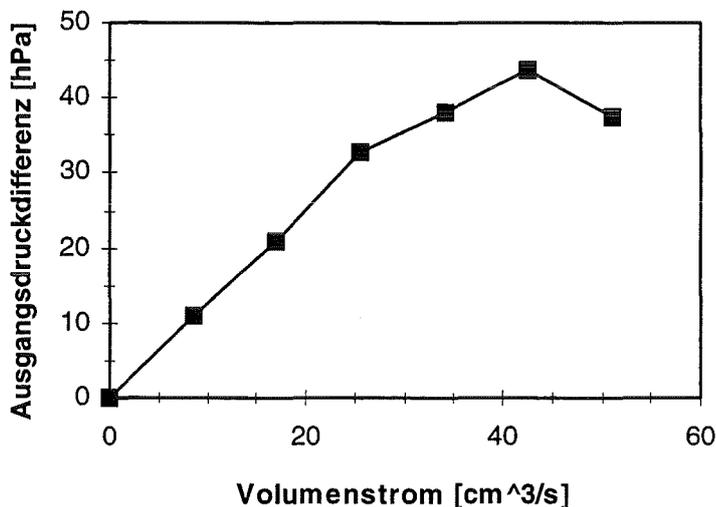


Abbildung 4.9 Abhängigkeit der Ausgangsdruckdifferenz des stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillators vom Versorgungsdruck.

Ein merklicher Unterschied zwischen der Ausgangsdruckdifferenz, die zwischen Ausgang 1 und Ausgang 2 herrscht, und der Ausgangsdruckdifferenz, die zwischen Ausgang 2 und Ausgang 1 vorliegt, konnte im Fall des Mikro-Oszillators nicht festgestellt werden. Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung, da die Struktur in LIGA-Technik hergestellt wurde. Falls bei diesem Herstellungsverfahren Maßabweichungen auftreten, so sollten sie entsprechend der Geometrie des fluidischen Oszillators ebenfalls symmetrisch sein.

4.2.2 Experimentelle Untersuchungen beim Betrieb mit Wasser

Im Vergleich zum Stickstoffbetrieb des Mikro-Oszillators konnte bei der Verwendung von Wasser die Frequenz der Schwingung eindeutig bestimmt werden. Typische Meßsignale bei einem Volumenstrom von $4\ \text{l/h}$ sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Eine den Signalen überlagerte größere Frequenz konnte auch bei größter Auflösung nicht festgestellt werden.

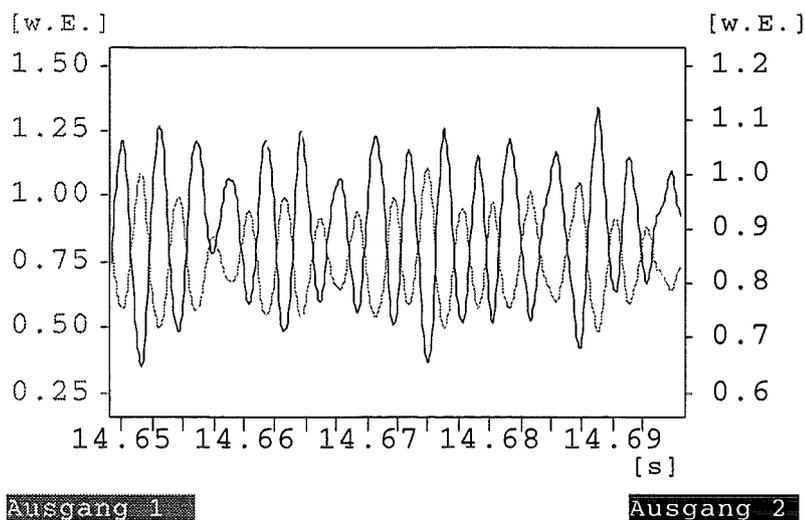


Abbildung 4.10 Ausgangsdrucksignale des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators ($d_v = 100 \mu\text{m}$) bei einem Volumenstrom von 4 l/h . Die ermittelte Frequenz beträgt 360 Hz .

Die Versorgungskennlinie wurde für Volumenströme im Bereich von 0 bis 5 l/h aufgenommen, was Strömungsgeschwindigkeiten in der Versorgungsdüse von bis zu 28 m/s und Reynoldszahlen bis zu 4611 entspricht. Wie in den vorangegangenen Untersuchungen wurde auch hier eine Fitfunktion für eine Proportionalität zwischen dem Versorgungsdruck und dem Volumenstrom in Form eines Polynoms zweiten Grades berechnet, die in Abbildung 4.11 ebenfalls eingezeichnet ist.

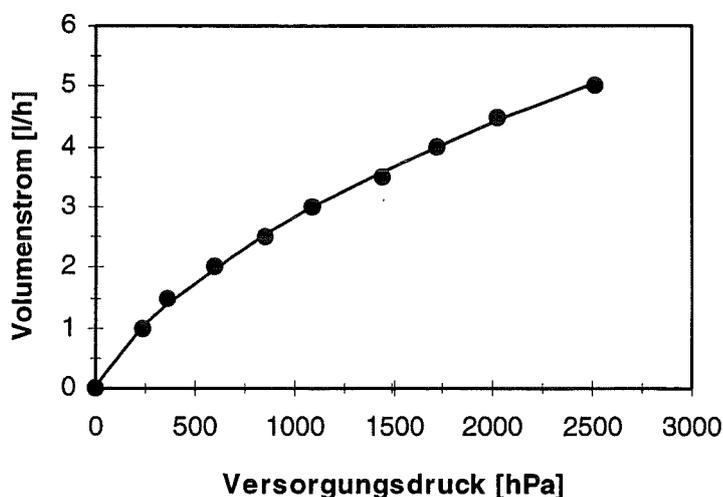


Abbildung 4.11 Abhängigkeit des Volumenstroms durch den wasserbetriebenen Mikro-Oszillator vom Versorgungsdruck.

Die gemessenen Versorgungsdrücke betragen bis zu 2509 hPa . Sie liegen im Vergleich zu Werten, die für eine exakt formtreue Skalierung des Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von $500 \mu\text{m}$ zu erwarten gewesen wären (über 14000 hPa), wieder wesentlich niedriger. Die Ausgangsbelastung ist also auch bei der Verwendung von Wasser zu gering, um einen direkten Vergleich der Ergebnisse des Mikro-Oszillators mit dem größeren Modell zu erlauben.

Auch die ermittelten Frequenzen des Mikro-Oszillators liegen niedriger als entsprechend der Skalierung berechnet, was allerdings im Widerspruch zu den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnissen steht. Dort konnte gezeigt werden, daß mit einer Abnahme der Ausgangsbelastung auch eine Zunahme der Frequenzen verbunden ist (Abbildungen 3.20 und 4.3), so daß die Frequenzen bei einer zu geringen Ausgangsbelastung größer als berechnet sein sollten. Die Größenordnung der ermittelten Frequenzen stimmt jedoch mit der Erwartung von einigen hundert Hertz überein (Abbildung 4.12). Auch der entsprechend den Ergebnissen der numerischen Simulation erwartete lineare Zusammenhang zwischen Frequenz und Volumenstrom ist erkennbar. Die Steigung der Ausgleichsgerade beträgt $48\text{Hz} / 1\ell/\text{h}$. Für das Auftreten einer periodischen Schwingung des Fluidstrahls war ein Mindestvolumenstrom von $2\ell/\text{h}$ notwendig.

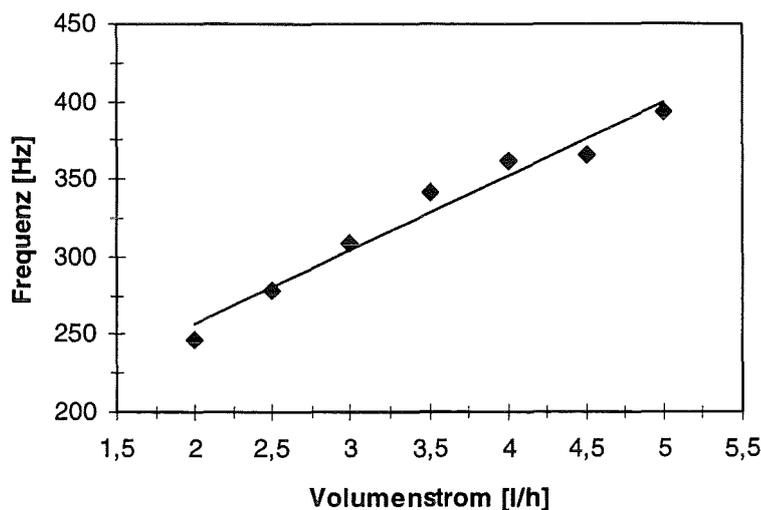


Abbildung 4.12 Abhängigkeit der Frequenzen des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators vom Versorgungsdruck.

Die Schwingung des Mikro-Oszillators wird also auch hier gedämpft, da sich die Drücke im Ausgang nicht schnell genug abbauen können. Bestätigt wird diese Annahme wieder durch die Ausgangsdruckdifferenzen, die entsprechend einer exakten Skalierung bis zu 660hPa betragen und somit über den ermittelten Werten liegen sollten.

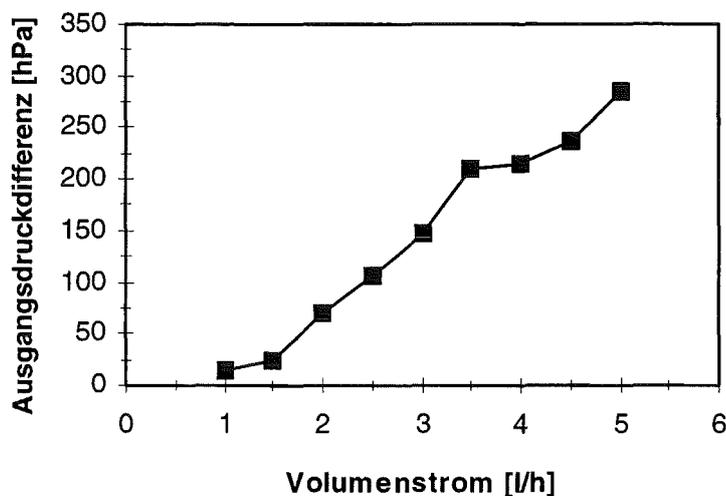


Abbildung 4.13 Abhängigkeit des Ausgangsdrucks des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators vom Versorgungsdruck.

In Abbildung 4.13 sind die Mittelwerte Ausgangsdruckdifferenzen zwischen Ausgang 1 und 2 bzw. Ausgang 2 und 1 dargestellt. Wie schon bei der Verwendung von Stickstoff konnte kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Werten festgestellt werden, der auf eine Asymmetrie der Struktur schließen ließe. Die Zunahme der Ausgangsdruckdifferenzen mit dem Volumenstrom ist klar erkennbar, wenngleich die Werte etwas streuen. Bei einer Mittelung über eine größere Anzahl von Schwingungen sollte hier eine Verbesserung zu erreichen sein.

Die bereits erwähnten Ausgasungen bereiteten bei der Untersuchung des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators weniger Probleme als bei der Untersuchung der größeren Oszillatoren. Offensichtlich besitzt die Oberfläche der in LIGA gefertigten Struktur aufgrund ihrer geringeren Rauigkeit weniger Ausgasungskeime als die gefrästen Strukturen. Ein Haften von Ausgasungen, die zu Verengungen oder zum Verschuß von Strömungskanälen führen kann, ist daher weniger begünstigt.

Durch die in Kapitel 3 und 4 beschriebenen experimentellen Untersuchungen konnte der numerisch ermittelte lineare Zusammenhang zwischen der Frequenz eines wasserbetriebenen Oszillators und dem Volumenstrom bestätigt werden. Dieser Zusammenhang war außerdem auf eine Verwendung von Stickstoff als Arbeitsfluid erweiterbar, sofern der Volumenstrom, d.h. die Reynoldszahlen nicht zu große Werte annehmen. Das numerisch ermittelte Skalierungsverhalten der Frequenz ($f' = 1/k^2 \cdot f$, k ist der Skalierungsfaktor) konnte für einen Stickstoffbetrieb und einer Verkleinerung des Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm auf 300 μm verifiziert werden. Bei einer weiteren Verkleinerung der Geometrie vergrößert sich die Frequenz zwar weiter, eine eindeutige Bestimmung war jedoch nicht mehr möglich, da die Strömung sich nicht schnell genug ausbilden kann. Bei der Verwendung von Wasser konnte ebenfalls eine Vergrößerung der Frequenz mit kleiner werdender Geometrie nachvollzogen werden. Die Überprüfung des numerisch ermittelten Skalierungsverhaltens wurde beim Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 300 μm durch die Asymmetrie und die Oberflächenrauigkeit der feinmechanisch gefertigten Struktur erschwert, während beim in LIGA-Technik gefertigten Mikro-Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 100 μm aus technischen Gründen die exakte Skalierung der Ausgangsbelastung und somit ein direkter Vergleich nicht möglich war.

Im Hinblick auf eine Verwendung des Mikro-Oszillators als Ansteuereinheit eines Linearaktors nehmen die bei einem Betrieb der Struktur mit Stickstoff ermittelten Frequenzen der superpositionierten Schwingung und die wesentlich größeren, berechneten Frequenzen sehr große Werte an. Es ist daher zu befürchten, daß ein angesteuerter Kolben nur noch einen minimalen Hub ausführen kann, was nicht im Sinne seiner Verwendung als Werkzeug wäre. Die ursprünglichen Motivation für eine Entwicklung des fluidischen Mikro-Oszillators sieht jedoch einen Einsatz der Struktur in der Medizintechnik vor, wobei als Arbeitsfluid eine biokompatible Flüssigkeit verwendet werden soll. Es sind daher besonders die Ergebnisse der Untersuchung des wasserbetriebenen Oszillators relevant, die Frequenzen in der Größenordnung von einigen hundert Hertz ergaben. Diese Werte sind zwar unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Untersuchung des Linearaktors (Kapitel 1.2) ebenfalls groß, doch sollten sie zur Ansteuerung eines Aktors noch geeignet sein.

Die experimentelle Untersuchung der Kombination aus fluidischem Mikro-Oszillator und Linearaktor ist im nächsten Kapitel dargestellt.

5. Fluidisches Oszillator-Linearaktor-Mikrosystem

Mit dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Mikro-Oszillator und dem in Kapitel 1.2 dargestellten Mikro-Linearaktor wurde ein fluidisches Mikrosystem aufgebaut, mit dem fluidische Energie in mechanische Energie in Form einer Translationsbewegung umgeformt werden kann. Dieses dynamische System verfügt mit dem Oszillator über eine Selbststeuerung, so daß keine zusätzliche Ansteuerung mehr nötig ist. Die Energie der Kolbenbewegung wird der Strömung durch das Mikrosystem entnommen, die daher für einen kontinuierlichen Betrieb zu jedem Zeitpunkt aufrecht erhalten bleiben muß. Für eine periodische Kolbenbewegung ist ein periodischer Oszillatorbetrieb notwendig. Die Frequenz der Kolbenbewegung wird über die Frequenz des Oszillators bestimmt.

Der Aufbau des Mikrosystems erfolgte entsprechend dem aus Wandstrahlelement und Linearaktor bestehenden Mikrosystem (Kapitel 1.3.1) und ist in Kapitel 5.1 beschrieben. Die zur experimentellen Untersuchung der Oszillator-Linearaktor-Kombination verwendete Meßtechnik sowie die experimentellen Ergebnisse sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

5.1 Aufbau des Mikrosystems

Den schematischen Aufbau des Oszillator-Linearaktor-Mikrosystems zeigt Abbildung 5.1.

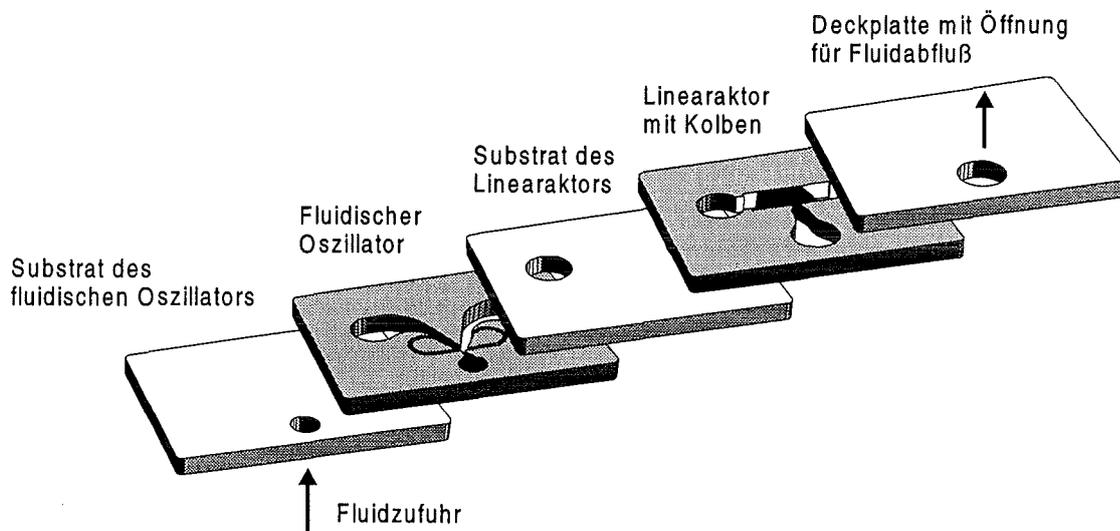


Abbildung 5.1 Schematischer Aufbau des Oszillator-Linearaktor-Mikrosystems.

Der auf einer Anschlußplatte montierte fluidische Oszillator wird nach oben hin durch das Substrat des Linearaktors verschlossen. Auf dem Linearaktor wird nach Einsetzen des Kolbens ein feinmechanisch hergestellter Deckel, der Löcher für den Fluidabfluß besitzt, positioniert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ausgleichsöffnungen des Linearaktors, die eine kontinuierliche Durchströmung des Mikrosystems gewährleisten, und die entsprechenden Löcher in der Deckplatte in Abbildung 5.1 nicht dargestellt.

Zur fluidischen Ankopplung des Linearaktors an den Oszillator und des Oszillators an eine Anschlußplatte wurden die Keramiksubstrate der beiden Module wieder mit entsprechenden Löchern versehen, die mit dem Laser strukturiert wurden. Zusätzlich wurden auch hier Löcher

zur Aufnahme von Paßstiften in die Substrate geschnitten (in Abbildung 5.1 ebenfalls nicht dargestellt), so daß die Anschlußplatte, die beiden Module und der Deckel paßgenau übereinander positioniert werden können. Das System wurde durch Verpressen mit dem Niederhalter aus Abbildung 1.4 gedichtet.

5.2 Betriebsverhalten

Das Mikrosystem wurde, wie schon die Strahlableitkelemente mit einfacher Rückführung und die fluidischen Oszillatoren, zunächst beim Betrieb mit Stickstoff und dann beim Betrieb mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid getestet. Es konnte für beide Medien eine Kolbenbewegung beobachtet werden, woraus geschlossen werden kann, daß für die Ausgleichsöffnungen des Linearaktors geeignete Dimensionierungen gewählt wurden.

Um auszuschließen, daß die beobachteten Kolbenbewegungen durch Turbulenzen in der Strömung oder durch Resonanzen des Fluids im Kolbenkanal verursacht werden, wurde sowohl für Stickstoff als auch für Wasser zunächst eine einfache Untersuchung durchgeführt. Der Linearaktor wurde ohne Verwendung des fluidischen Oszillators durch beide Fluidzuläufe gleichzeitig angeströmt. Diese Strömungssituation entspricht dem Fall, daß der Oszillator nicht betriebsfähig ist, symmetrisch durchströmt wird und somit keine periodische Ausgangsdruckdifferenz zur Ansteuerung des Kolbens bereitstellt. Da über den gesamten untersuchten Versorgungsdruckbereich bei diesem Experiment keine Kolbenbewegung beobachtet werden konnte, kann davon ausgegangen werden, daß die Ansteuerung des Kolbens tatsächlich durch den miniaturisierten fluidischen Oszillator erfolgt.

Für beide Medien wurde die Versorgungskennlinie des Mikrosystems erfaßt, wobei im Fall der Verwendung von Stickstoff wieder der bereits erwähnte Volumenstrommesser für Gase zum Einsatz kam, der im Fall der Verwendung von Wasser durch einen Schwebekörperdurchflußmesser mit einem Meßbereich von 0 - 5 l/h ersetzt wurde.

Untersuchung des Mikrosystems beim Betrieb mit Stickstoff:

Bei der Verwendung von Stickstoff konnte eine Kolbenbewegung für Versorgungsdrücke im Bereich von 1500 bis 3000 hPa beobachtet werden. Für Versorgungsdrücke kleiner 1500 hPa war keine Kolbenbewegung erkennbar, was darauf schließen läßt, daß der zum Betrieb der Oszillator-Aktor-Kombination mindestens notwendige Volumenstrom noch nicht erreicht wurde. Bei Versorgungsdrücken größer 3000 hPa wurde ein starker Anstieg in der Versorgungskennlinie des Mikrosystems erfaßt, so daß davon ausgegangen werden muß, daß keine ausreichende Dichtung des Mikrosystems durch Verpressen mehr erreicht werden kann. Die Schwingung des Kolbens schien bei Versorgungsdrücken zwischen 2000 und 2500 hPa die stabilste und reproduzierbarste Frequenz zu besitzen.

Die für einen Stickstoffbetrieb ermittelte Versorgungskennlinie des Mikrosystems (OSZI-LA) zeigt Abbildung 5.2. Wie der Kennlinie zu entnehmen ist, nimmt der Leckstrom des Mikrosystems bereits ab einem Versorgungsdruck von 2000 hPa stark zu. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, ist neben den Meßwerten auch eine für Versorgungsdrücke bis 1992 hPa berechnete Fitfunktion eingezeichnet.

Zum Vergleich ist auch die Versorgungskennlinie des stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillators (OSZI), sowie die entsprechende Fitfunktion eingezeichnet. Sie liegt etwas über der Versorgungskennlinie des Mikrosystems, woraus geschlossen werden kann, daß die durch den Linearaktor verursachte Ausgangsbelastung des Mikro-Oszillators größer ist, als die in Kapitel 4.2 beschriebene Ausgangsbelastung, die bei der Untersuchung des Mikro-Oszillators verwendet wurde.

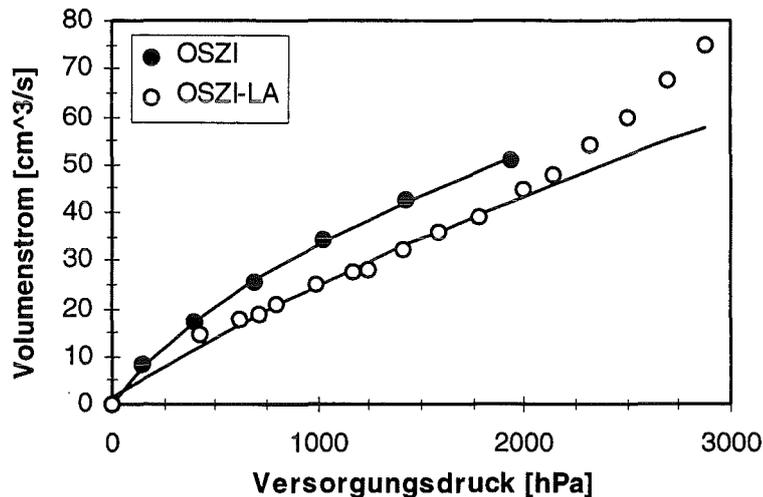


Abbildung 5.2 Versorgungskennlinie des stickstoffbetriebenen Oszillator-Linearaktor-Mikrosystems (OSZI-LA) im Vergleich zur Versorgungskennlinie des stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillators (OSZI).

Wie bei der Untersuchung der Kolbenbewegung beobachtet werden konnte, wurden aufgrund eines zu geringen Kolbenhubes weder die mittleren Ausgleichöffnungen freigegeben, noch konnte eine Veränderungen der Lichtschrankensignale erfaßt werden. Aus den Geometriedaten des Linearaktors kann demnach ermittelt werden, daß der Kolbenhub weniger als 295 μm beträgt, wobei davon ausgegangen wird, daß die Kolbenbewegung um die genaue Mittellage im Kolbenkanal erfolgt und die Lichtleitfasern in der Mitte der Mikrotunnel positioniert werden (siehe Abbildung 1.9). Um eine Vorstellung von der Größenordnung des Kolbenhubes zu erhalten, wurde der Deckel des Mikrosystems während der Kolbenbewegung mit Markierungen versehen. Anschließend wurde der Abstand der Markierungen mit einem Mikroskop vermessen. Die ermittelten Werte lagen im Bereich von 50 μm . Eine genauere Bestimmung war aufgrund der Unregelmäßigkeit der Kolbenbewegung nicht möglich.

Da die Lichtschranken durch den geringen Hub des Kolbens nicht erreicht wurden, war eine Bestimmung der Frequenz der Kolbenbewegung ebenfalls schwierig. Der Kolben wurde daher vor der Inbetriebnahme des Mikrosystems in Richtung einer Lichtschranke verschoben, so daß die Schwingungen um eine Nullage, die nicht identisch mit der Mitte des Kolbenkanals ist, ausgeführt wurden. Diese erzwungene Position mußte mehrfach vorgegeben werden, da der Kolben nach wenigen Schwingungen zur Mitte des Kolbenkanals zurückkehrte. Die durch diese Positionierung erreichte Variation des Lichtschrankensignals wurde zunächst mit einem Oszilloskop analysiert, wobei festgestellt wurde, daß jeweils nur wenige Wechsel zwischen den Minima und Maxima einen periodischen Verlauf hatten und großen Perioden jeweils kleinere überlagert waren. Die Perioden wurden dann einzeln ausgemessen und die Mittelwerte gebildet. Die für die großen Perioden ermittelten Frequenzen betragen zwischen 350 und 730 Hz, während für die kleineren Werte zwischen 770 und 2000 Hz gemessen wurden. Um eine mittlere Frequenz der Kolbenbewegung über eine größere Anzahl von

Schwingungen zu ermitteln, wurde das Lichtschrankensignal dann mit dem Meßcomputer erfaßt und eine Fouriertransformation durchgeführt, wodurch jedoch keine eindeutige und reproduzierbare Frequenz bestimmt werden konnte. Ein typisches Meßsignal zeigt Abbildung 5.3. Die überlagerten kleineren Frequenzen konnten mit dem PC nicht erfaßt werden.

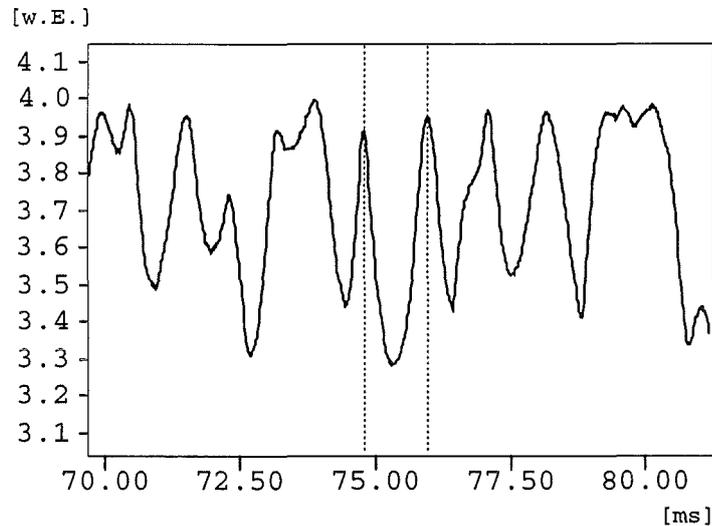


Abbildung 5.3 Lichtschrankensignal des stickstoffbetriebenen Oszillator-Linearaktor-Mikrosystems.

Wie erwartet, sind die Frequenzen des Mikro-Oszillators bei der Verwendung von Stickstoff also zu groß, um eine periodische Kolbenbewegung mit ausreichendem Kolbenhub zu ermöglichen. Die dennoch beobachtbare Bewegung des Kolbens wird offenbar durch die bei der Untersuchung des stickstoffbetriebenen Mikro-Oszillators erfaßten, kleineren Frequenzen verursacht. Da diese kleineren Frequenzen jedoch einen unsystematischen Verlauf aufwiesen, ist eine kontrollierte Beeinflussung der Kolbenfrequenz bzw. des Kolbenhubes nicht möglich.

Untersuchung des Mikrosystems beim Betrieb mit Wasser:

Bei der Untersuchung des Mikrosystems mit deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid konnten Kolbenbewegungen für Versorgungsdrücke zwischen 700 und 3500 hPa beobachtet werden. Diese Bewegungen zeigten ebenfalls, wie schon bei der Verwendung von Stickstoff, keine deutliche Periodizität. Die gleichmäßigste Kolbenbewegung wurde für Versorgungsdrücke im Bereich von 1000 hPa beobachtet.

Auch im Fall der Verwendung von Wasser stieg der Volumenstrom ab einem bestimmten Versorgungsdruck aufgrund des überproportional zunehmenden Leckstromes stark an. Dieser Schwellwert betrug ca. 3000 hPa, was auch schon bei der Untersuchung des aus Wandstrahlelement und Linearaktor bestehenden, wasserbetriebenen Mikrosystems beobachtet werden konnte (Abbildung 1.15). Die ermittelte Versorgungskennlinie des Mikrosystems (OSZI-LA), sowie eine für Versorgungsdrücke bis 3020 hPa berechnete Fitfunktion ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Für Versorgungsdrücke kleiner 700 hPa liegen die gemessenen Volumenströme über der berechneten Fitfunktion. Ein solcher Verlauf entspricht der Erwartung, da in diesem Versorgungsdruckbereich keine Kolbenbewegung beobachtet werden konnte, so daß der Strömungswiderstand des Mikrosystems entsprechend kleiner sein sollte.

Zum Vergleich ist außerdem wieder die Versorgungskennlinie des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators (OSZI) und ihre berechnete Fitfunktion eingezeichnet.

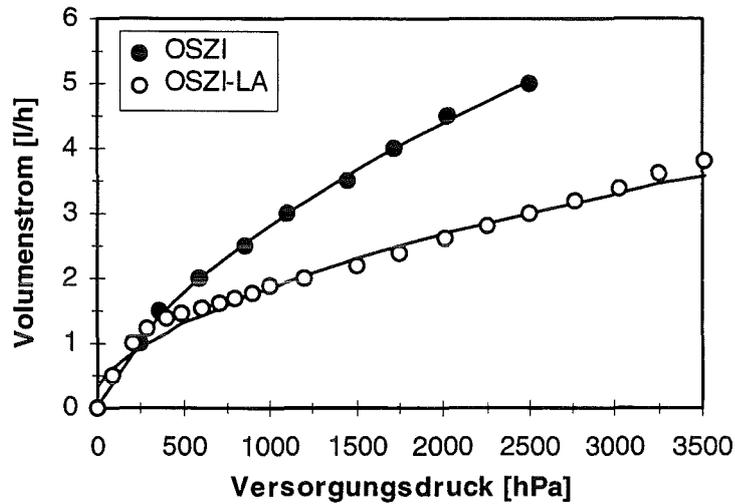


Abbildung 5.4 Versorgungskennlinie des wasserbetriebenen Oszillator-Linearaktor-Mikrosystems (OSZI-LA) im Vergleich zur Versorgungskennlinie des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators (OSZI).

Auch hier, wie schon bei der Verwendung von Stickstoff, liegt die Versorgungskennlinie des Mikrosystems deutlich unter der Kennlinie des Mikro-Oszillators, so daß geschlossen werden kann, daß der Linearaktor eine stärkere Ausgangsbelastung darstellt, als die bei der Untersuchung des Mikro-Oszillators verwendeten Kanülen.

Auch im Fall der Verwendung von Wasser war der beobachtete Kolbenhub zu gering, um die mittleren Ausgleichsöffnungen freizugeben oder die Lichtschranken zu erreichen. Er beträgt daher weniger als 295 μm , schien jedoch insgesamt größer als bei der Verwendung von Stickstoff zu sein. Diese Beobachtung entspricht der Erwartung, da für den wasserbetriebenen Mikro-Oszillator deutlich niedrigere Frequenzen ermittelt worden waren, als bei der Verwendung von Stickstoff. Darüber hinaus sollte die auf den Kolben wirkende Gleitreibungskraft im Fall der Verwendung von Wasser geringer sein, als bei einem Stickstoffbetrieb. Eine Vermessung des Kolbenhubs über eine Markierung des Deckels, wie bei der Untersuchung des Mikrosystems mit Stickstoff, war wegen des ausströmenden Fluids nicht möglich.

Zur Ermittlung der Frequenz der Kolbenbewegung wurde wiederum versucht den Kolben Schwingungen um eine Nullage, die nicht identisch mit der Mitte des Kolbenkanals ist, ausführen zu lassen. Da der Kolben jedoch sofort nach Anlegen des Versorgungsdruckes in die Mitte des Kolbenkanals zurückkehrte, war eine Analyse des Lichtschrankensignals in diesem Fall nicht möglich. Die Frequenz schien jedoch wesentlich kleiner als bei der Verwendung von Stickstoff zu sein, was sowohl der Beobachtung eines vergrößerten Kolbenhubs als auch den experimentellen Ergebnissen der Untersuchung des Mikro-Oszillators entspricht. Die Frequenz konnte mit dem Auge deutlich aufgelöst werden, wenngleich sie nicht gering genug war, um über eine parallel zur Beobachtung erfolgende Zeitmessung bestimmt zu werden.

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, daß ein aus fluidischem Oszillator und Linearaktor bestehendes Mikrosystem sowohl bei der Verwendung von Stickstoff, als auch von Wasser prinzipiell betriebsfähig ist. Der für ein solches Mikrosystem entwickelte und in Kapitel 4.2 beschriebene fluidische Mikro-Oszillator ist zur Ansteuerung eines Linearaktors verwendbar, wenngleich durch eine weitere Abstimmung der beiden Komponenten die Stabilität des Mikrosystems noch verbessert werden kann.

Ohne die beiden Designs zu überarbeiten sollte eine Zunahme des Kolbenhubes durch die Verwendung von Kolben geringerer Masse, die beispielsweise aus PMMA gefertigt sein können, erreichbar sein. Eine Verbesserung des Betriebsverhaltens des Mikrosystems könnte auch durch die Verwendung eines Linearaktors mit verändertem Strömungswiderstand der Ausgleichsöffnungen, die in den Arbeiten von [Gün-96] und [Jus-96] dargestellt sind, erreicht werden.

Im Hinblick auf die Verwendung des Mikrosystems im Rahmen des IMICS-Projektes als linear arbeitendes Werkzeug mit fluidischem Antrieb und integrierter Ansteuerung, ist jedoch eine Überarbeitung des Designs, bei der auch eine Verkleinerung der Gesamtabmessungen des Mikrosystems erreicht wird, unumgänglich. Da die zu erwartenden Schneidkräfte eines Werkzeuges zusätzlich zu der zur Überwindung der Trägheit und der Reibung des Kolbens aufgebracht werden müssen, muß außerdem die Ausgangsdruckdifferenz des Oszillators vergrößert werden. Dies könnte durch eine Verkleinerung des Strömungswiderstandes der Fluidabflüsse im Linearaktor erreicht werden, da sich bei zu großer Belastung des Oszillators zum Zeitpunkt des Schaltens des Fluidstrahles möglicherweise noch kein Strömungsgleichgewicht eingestellt hat (siehe Abbildung 3.19). Weiterhin muß die Gleichförmigkeit des Betriebes verbessert, sowie die Ankopplung eines geeigneten Werkzeuges an den Kolben realisiert werden. Diese Ankopplung des Werkzeuges kann entweder in Richtung der Kolbenbewegung oder senkrecht dazu erfolgen, wobei im zuletzt genannten Fall die Verluste durch entstehende Drehmomente so klein wie möglich gehalten werden müssen.

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines fluidischen Mikro-Oszillators, der als Antriebs- und Ansteuereinheit eines miniaturisierten doppeltwirkenden Zylinders mit Kolben (Mikro-Linearaktor) verwendet werden kann. Die Motivation für diese Entwicklung ergab sich aus einem Konzept des EG-Projektes IMICS, das ein aus Oszillator und Linearaktor mit Werkzeug aufgebautes Mikrosystem als therapeutische Komponente auf einem Herzkatheter vorsieht. Die Aufgabe dieser therapeutischen Komponente besteht in der Entfernung von Ablagerungen in den Herzkranzgefäßen, weshalb die Entwicklung des Mikro-Oszillators unter verschiedenen Vorgaben, die sich aus der geplanten medizintechnischen Verwendung ergeben, erfolgte. Dies sind die Verwendung einer biokompatiblen Flüssigkeit, ein maximal zulässiger Versorgungsdruck von 20000 hPa, ein maximaler Volumenstrom von 1.8 l/h, Abmessungen, die denen des menschlichen Gefäßsystems angepaßt sind sowie erreichbare Schneidkräfte des Werkzeugs in der Größenordnung einiger Millinewton.

In der vorliegenden Arbeit wurde erstmals ein wasserbetriebener fluidischer Mikro-Oszillator in LIGA-Technik entworfen, simuliert, hergestellt und getestet. Außerdem wurde dessen Einsatzmöglichkeit als Antriebs- und Ansteuereinheit eines Linearaktors nachgewiesen, was über die bisherige Verwendung fluidischer Oszillatoren in fluidischen Steuerungen oder als Sensoren hinausgeht. Zusätzlich zur Entwicklung des fluidischen Mikro-Oszillators wurde ein geeigneter Linearaktor entworfen und getestet sowie ein aus Oszillator und Linearaktor modular aufgebautes Mikrosystem realisiert.

Für die experimentelle Charakterisierung des fluidischen Oszillators mußte eine geeignete Meßtechnik gefunden werden, welche die Erfassung der im Hinblick auf dessen angestrebte Verwendung wesentlichen Betriebsgrößen erlaubte. Diese relevanten Größen waren der Versorgungsdruck, der Volumenstrom, die Frequenz der Schwingung des Fluidstrahls im Oszillator sowie Betrag und zeitlicher Verlauf der Ausgangsdruckdifferenz. Aus diesem Grund wurden neben quasistatischen auch dynamische Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. Der Versorgungsdruck und der Volumenstrom konnten mittels geeigneter Sensoren in der Fluidzuführung gemessen werden, während die Frequenz indirekt über die Erfassung des zeitlichen Verlaufs der statischen Ausgangsdrücke bestimmt wurde. Um diese statischen Ausgangsdrücke erfassen zu können, wurden die Ausgänge belastet, da diese Situation auch im Fall einer Kombination aus Oszillator und Linearaktor gegeben ist.

Bei der experimentellen Untersuchung der fluidischen Elemente wurden zunächst prinzipielle Funktionstests mit Stickstoff als Arbeitsfluid durchgeführt. Im Anschluß daran wurden die Strukturen bei der Verwendung von deionisiertem Wasser als Arbeitsfluid untersucht. Ein wesentliches Problem bei der Verwendung von Wasser bestand im Auftreten von Ausgasungen, die die Strömungskanäle verengen oder verschließen können. Durch eine Optimierung der Druckerzeugung im Arbeitsfluid, die Benetzung und die Verringerung der Oberflächenrauigkeit der Strukturen konnten diesbezüglich entscheidende Verbesserungen erreicht werden.

Die prinzipielle Verwendbarkeit von Flüssigkeiten zum Betrieb miniaturisierter Strömungselemente wurde zunächst an einem aus einer anderen Arbeit [Vol-94] zur Verfügung stehenden, miniaturisierten bistabilen Wandstrahlelement mit einer Versorgungsdüsenweite von 30 µm und einer Strukturhöhe von 250 µm experimentell untersucht. In diesem Element wird ein abgelenkter Fluidstrahl nicht wie bei einem fluidischen Oszillator durch einen intern rückgeführten Fluidstrahl, sondern durch einen externen Steuerimpuls geschaltet. Es wurde nachgewiesen, daß das miniaturisierte Wandstrahlelement ab einem Versorgungsdruck von

1750 hPa und einem Volumenstrom von 0.49 ℓ/h - also in einem gemäß der Vorgaben des IMICS-Projektes sinnvollen Betriebsbereich - auch unter Belastung geschaltet werden kann. Außerdem konnte der Ausgangskennlinie des Elementes entnommen werden, daß mit diesem Element weitere Elemente gleichen Typs geschaltet werden können. Damit wurde nachgewiesen, daß mit solchen bistabilen Wandstrahlelementen eine Rückkopplung und damit die Realisierung eines flüssigkeitsbetriebenen miniaturisierten Oszillators möglich ist.

Die Oszillationsfähigkeit wurde dann mit Hilfe einer Finite Elemente Methoden (FEM) Simulation eines Oszillatormodells, dessen Abmessungen sich an denen des bistabilen Wandstrahlelementes orientierten, bestätigt. Dabei ergaben sich Oszillationsfrequenzen bis zu 626 Hz bei einem Volumenstrom von 1 ℓ/h . Um eine Anpassung des Oszillators an den Linearaktor zu ermöglichen, wurden darüber hinaus die Beeinflussungsmöglichkeiten der Frequenz numerisch untersucht. Für eine gegebene Geometrie ist die Frequenz linear vom Volumenstrom abhängig. Bei einer vollständigen Vergrößerung dieser Geometrie nimmt die Frequenz mit dem Kehrwert des quadrierten Vergrößerungsfaktors ab. Beide Proportionalitäten konnten auch über eine Betrachtung des Schaltmechanismus verifiziert werden. Da bei der Durchführung der FEM-Simulationen bestimmte Randbedingungen wie der Einfluß der Meßtechnik oder die Ausgangsbelastung des Oszillators numerisch schwer erfaßbar waren, wurde das Oszillatordesign dann experimentell weiterentwickelt.

Zusätzlich zu diesen Voruntersuchungen wurde ein für den späteren Aufbau des Mikrosystems geeigneter Linearaktor unter Berücksichtigung der Anforderungen des IMICS-Projektes entworfen, in LIGA-Technik hergestellt und als Einzelkomponente experimentell untersucht. Die Gestaltung der Geometrie des Linearaktors erfolgte dabei entsprechend den voraussichtlichen Anforderungen eines fluidischen Oszillators, wie sie sich aus der Untersuchung des Wandstrahlelementes ergaben sowie dem angestrebten modularen Stapelaufbau des Mikrosystems. Bei der Dimensionierung der Strömungskanäle wurde darauf geachtet, daß keine zu starke Ausgangsbelastung des Oszillators erzeugt wird. Außerdem wurden Ausgleichsöffnungen strukturiert, da nur bei ständiger Durchströmung des Oszillators dessen kontinuierlicher Betrieb sichergestellt ist. Durch die experimentelle Untersuchung des Linearaktors konnte gezeigt werden, daß die Abmessungen der Strömungskanäle im Hinblick auf eine Verwendung der Struktur im Rahmen des IMICS-Projektes geeignet gewählt wurden (notwendiger Versorgungsdruck von 271 hPa bei einem Volumenstrom von 1 ℓ/h). Darüber hinaus wurden durch die Bestimmung der Kolbengeschwindigkeiten die maximal möglichen Kolbenfrequenzen in Abhängigkeit des Versorgungsdrucks ermittelt. Es zeigte sich, daß diese bei gleichem Volumenstrom stets kleiner als die FEM-simulierten Oszillator-Frequenzen waren, woraus sich die Notwendigkeit einer Anpassung des Oszillators an den Linearaktor ergab, so daß eine direkte Umsetzung des FEM-simulierten Oszillatordesigns nicht möglich war.

Das für eine Kombination aus fluidischem Oszillator und Linearaktor entworfene Konzept eines modularen Stapelaufbaus wurde ebenfalls im Vorfeld der Mikro-Oszillatorentwicklung, durch ein aus bistabilem Wandstrahlelement und Linearaktor aufgebautes Mikrosystem, exemplarisch untersucht. Mit diesem Konzept konnte erstmals die Ankopplung zweier in LIGA-Technik hergestellter fluidischer Bauteile mit minimalem Strömungswiderstand der fluidischen Verbindungen und kleinsten Gesamtmaße realisiert werden. Aus der Funktionsfähigkeit des Mikrosystems wurde eine geeignete konstruktive Gestaltung des Aufbaus abgeleitet.

Um den fluidischen Oszillator an den Linearaktor anzupassen, wurde das Oszillatordesign dann experimentell entwickelt. Dazu wurde die Geometrie des fluidischen Oszillators in zwei Bereiche aufgeteilt. Dies waren die beiden Rückführungskanäle, über die abwechselnd ein

Steuerimpuls bereit gestellt wird und der Steuerraum, in dem der Coanda-Effekt, d.h. die Ablenkung und das Haften des Fluidstrahls, auftritt.

Um die optimale Gestaltung der Rückführungskanäle unabhängig vom Steuerraum des Oszillators ermitteln zu können, wurden zunächst verschiedene fluidische Strahlablenkelemente mit einfacher Fluidrückführung, aber unterschiedlichen Rückführungskanalbreiten und -längen entworfen. In diesen Elementen wird der Fluidstrahl in der abgelenkten Position nicht durch den Coanda-Effekt gehalten, weshalb auch kein Rückstellimpuls für einen dynamischen Betrieb notwendig ist. Die Strahlablenkelemente wurden feinmechanisch mittels Fräsen mit einer Versorgungsdüsenweite von 500 μm und einer Strukturhöhe von 2500 μm aus PMMA gefertigt. Bei der experimentellen Untersuchung der Strahlablenkelemente zeigte sich, daß die beste Gestaltung der Rückkopplung, d.h. der stabilste Betrieb, die größten Ausgangsdruckdifferenzen und die niedrigsten Frequenzen im Fall des breitesten und längsten Rückführungskanals gegeben sind.

Zur Bestimmung des optimalen Designs des Steuerraumes wurden dann drei verschiedene fluidische Oszillatoren entworfen. Sie wurden mit Steuerräumen entsprechend einem in [Rec-76] dargestellten Design eines Haftstrahlelementes, in Anlehnung an den Steuerraum des FEM simulierten Designs und mit einem Steuerraum, wie ihn auch das bistabile Wandstrahlelement besitzt, ausgestattet und mit Fluidrückführungen entsprechend den Ergebnissen der Untersuchung der Strahlablenkelemente versehen. Auch diese Elemente wurden feinmechanisch mit Versorgungsdüsenweiten von 500 μm und einer Strukturhöhe von 2500 μm aus PMMA hergestellt. Bei der experimentellen Untersuchung dieser Strukturen zeigte sich, daß der Oszillator mit einem entsprechend dem bistabilen Wandstrahlelement gestalteten Steuerraum, die stabilste Betriebscharakteristik sowie die stärkste Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom aufweist. Der mit Hilfe der FEM-Simulation hergeleitete lineare Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Volumenstrom, der eine einfache Einflußnahme auf die Betriebsgrößen erlaubt, konnte experimentell verifiziert werden. Bei der Verwendung von Wasser schwingt der Strahl für Volumenströme zwischen 7 und 12 ℓ/h mit einer Frequenz im Bereich von 20 bis 30 Hz.

Das experimentell ermittelte optimale Oszillatordesign wurde dann verkleinert, wobei die Verkleinerungsfaktoren über eine Ähnlichkeitsbetrachtung, die auch das numerisch ermittelte Skalierungsverhalten der Frequenz einschloß, bestimmt wurden. Es wurde ein weiterer feinmechanisch hergestellter Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 300 μm und einer Strukturhöhe von 1500 μm realisiert. Außerdem wurde ein als Primärstruktur aus PMMA in LIGA-Technik gefertigter Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 100 μm und einer Strukturhöhe von 500 μm hergestellt.

Bei der experimentellen Untersuchung des fluidischen Oszillators mit einer Versorgungsdüsenweite von 300 μm konnte ebenfalls eine Schwingung des Fluidstrahls nachgewiesen und somit die grundsätzliche Miniaturisierbarkeit des Oszillators überprüft werden. Aufgrund einer fertigungsbedingten Asymmetrie sowie einer großen Oberflächenrauigkeit der Struktur war diese Schwingung jedoch sehr unregelmäßig, so daß eine genaue Bestimmung der Abhängigkeit der Frequenz vom Volumenstrom in diesem Fall nicht möglich war.

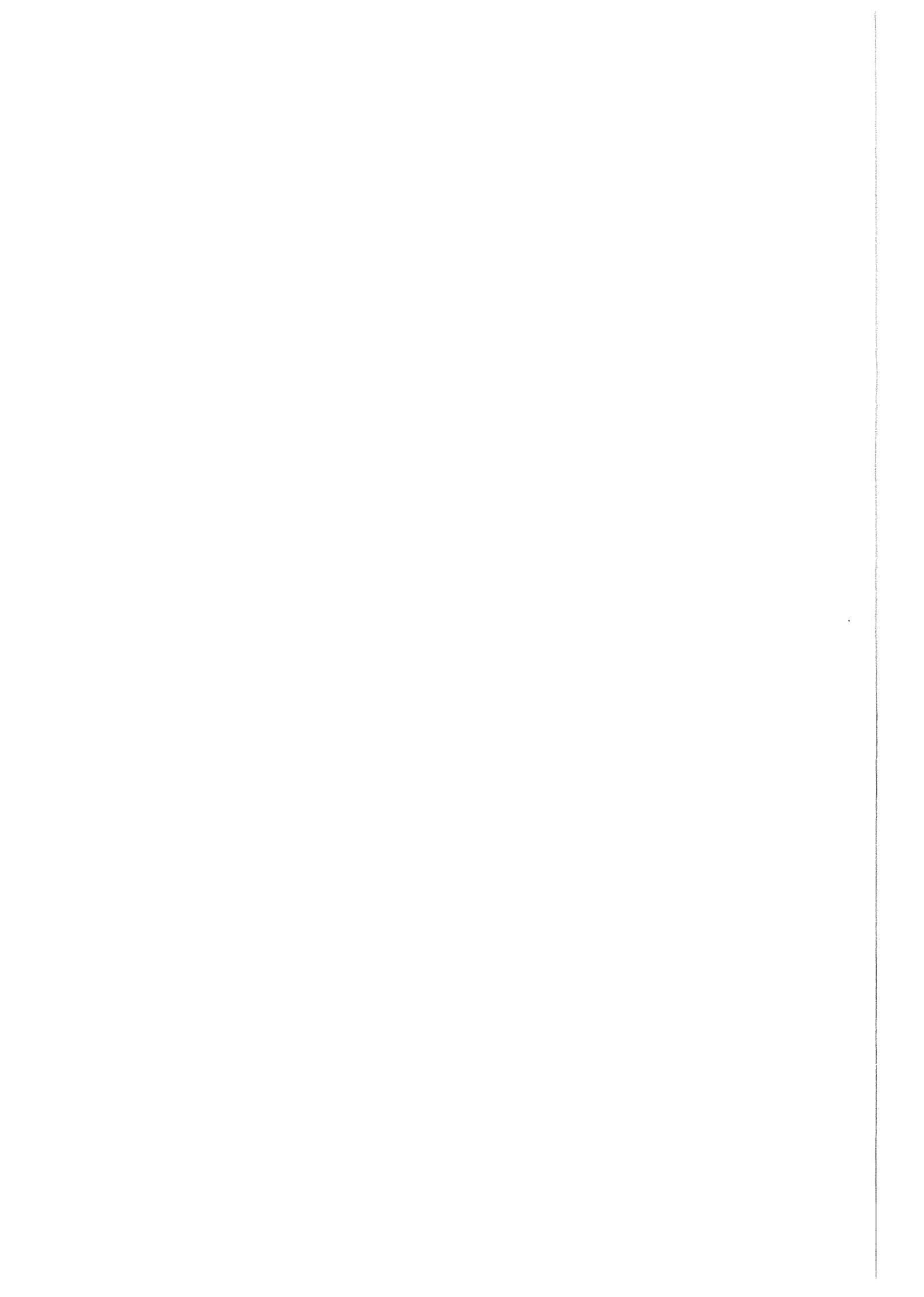
Es wurde dann erstmals ein in LIGA-Technik hergestellter fluidischer Oszillator mit einer Versorgungsdüsenweite von 100 μm experimentell untersucht. Dabei zeigte sich, daß bei dieser Struktur eine Bestimmung der Frequenz in Abhängigkeit vom Volumenstrom vergleichsweise problemlos möglich war. Es wurden Frequenzen im Bereich von 250 - 400 Hz für Volumenströme von 2 bis 5 ℓ/h gemessen, wobei wieder der numerisch ermittelte lineare Zusammenhang experimentell bestätigt werden konnte. Die bereits erwähnten Ausgasungen bereiteten bei der Untersuchung des wasserbetriebenen Mikro-Oszillators weniger Probleme als bei der Untersuchung der größeren Oszillatoren, da die Oberfläche der

in LIGA gefertigten Struktur aufgrund ihrer geringeren Rauigkeit weniger Ausgasungskeime als die gefrästen Strukturen besitzt. Darüber hinaus konnte keine störende Asymmetrie der Struktur festgestellt werden.

Mit dem in LIGA-Technik gefertigten Mikro-Oszillator und dem Mikro-Linearaktor wurde dann ein Mikrosystem aufgebaut, mit dem fluidische Strömungsenergie in mechanische Energie, in Form einer oszillierenden translatorischen Kolbenbewegung umgewandelt werden kann. Die prinzipielle Betriebsfähigkeit dieses Mikrosystems bei der Verwendung von Wasser wurde experimentell nachgewiesen. Es konnte somit die Verwendbarkeit des entwickelten fluidischen Mikro-Oszillators als Antriebs- und Ansteuereinheit eines Linearaktors überprüft werden. Mit einer Kolbenbewegung ab einem Versorgungsdruck von 700 hPa und einem Volumenstrom von 1.6 l/h, entspricht der ermittelte Betriebsbereich weiteren Vorgaben des IMICS-Projektes. Bezüglich der erreichbaren Kolbenfrequenzen und des Kolbenhubes konnten in dieser Arbeit nur Abschätzungen vorgenommen werden. Zur genaueren Bestimmung dieser Größen muß in einer zukünftigen Arbeit die Meßtechnik entsprechend angepaßt werden, was z.B. durch die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera erfolgen kann.

Für eine Verwendung des Mikrosystems im Rahmen des IMICS-Projektes ist darüber hinaus eine weitere Verkleinerung der Gesamtabmessungen notwendig. Außerdem muß an den Kolben ein geeignetes Schneidwerkzeug angekoppelt werden. Diese Ankopplung kann entweder in Richtung der Kolbenbewegung oder senkrecht dazu erfolgen, wobei im zuletzt genannten Fall die Verluste durch entstehende Drehmomente so klein wie möglich gehalten werden müssen. Weiter müssen die Ausgangsdruckdifferenzen des fluidischen Oszillators vergrößert werden, da zusätzlich zur Überwindung der Trägheit und der Reibung des Kolbens die Schneidkräfte des Werkzeuges aufgebracht werden müssen. Dies kann durch eine Vergrößerung der Strömungswiderstände der Fluidabflüsse im Linearaktor erreicht werden, wobei unter Berücksichtigung der Funktionsfähigkeit des Oszillators hierbei eine obere Belastungsgrenze jedoch nicht überschritten werden darf.

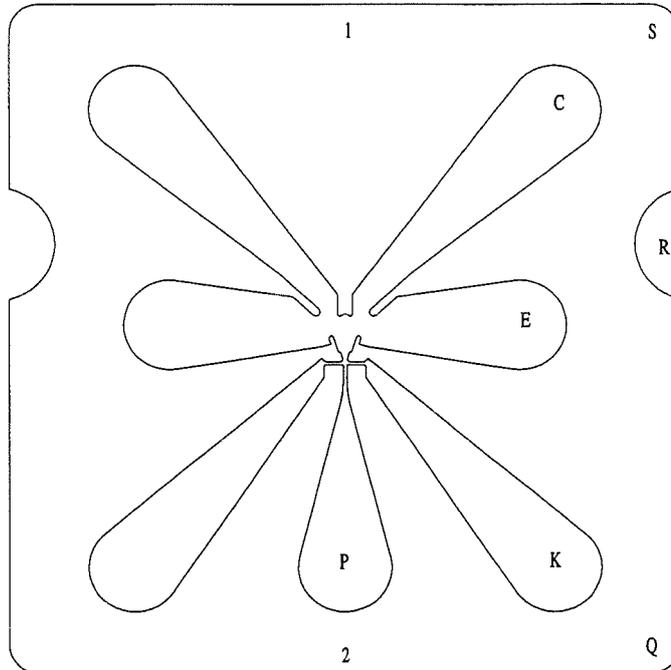
Ein anderes Einsatzgebiet des fluidischen Oszillators stellt die Meßtechnik dar, in der aufgrund der linearen Abhängigkeit der Oszillatorfrequenz vom Volumenstrom eine Verwendung der Struktur als miniaturisierter Volumenstromsensor vorstellbar ist. Als zu messende Medien wären sowohl gasförmige als auch flüssige Fluide geeignet. Darüber hinaus wären auch andere Materialeigenschaften wie z.B. die Dichte oder die Viskosität eines Mediums denkbare Meßgrößen, da eine direkte Abhängigkeit der Frequenz des Oszillators von diesen Größen vorausgesetzt werden kann. Außerdem wäre eine Verwendung des Oszillators als Sensor zur Bestimmung der anteiligen Zusammensetzung von Fluidgemischen denkbar, da jede Mischung eine charakteristische Frequenzkennlinie besitzen sollte.



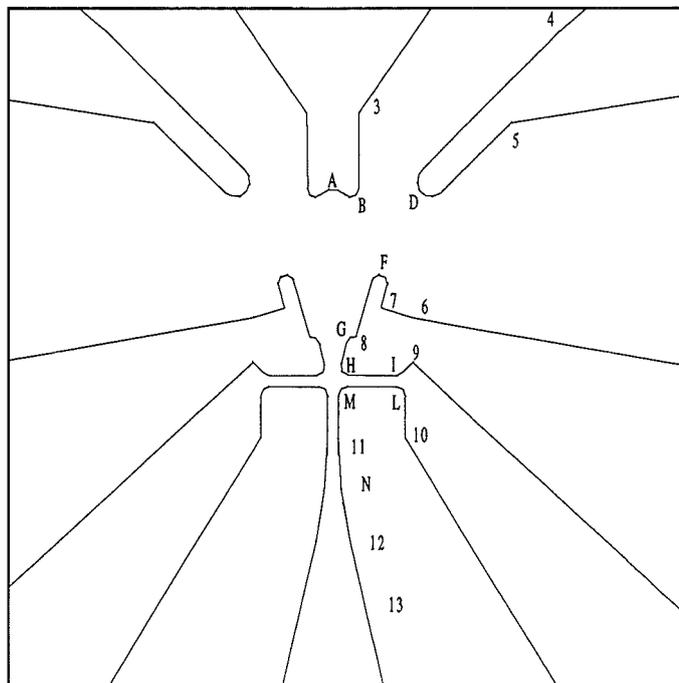
Anhang A.1

Konstruktionsdaten des Wandstrahlelementes

Gesamtansicht:



Detailansicht:

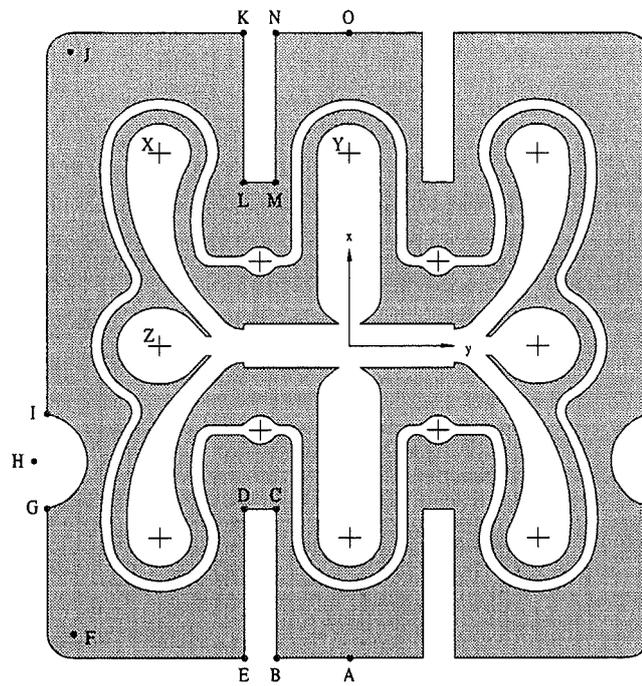


Punkt	x [μm]	y [μm]	r [μm]
A	0	388,6	38,4
B	44	427	20
C	1800	2300	400
D	177	427	20
E	1500	375	400
F	117	258	20
G	53	115	20
H	40	67	20
I	160	67	20
K	1800	-1800	400
L	160	0	20
M	34	0	20
N	1000	-100	986
P	0	-1800	400
Q	2625	-2500	250
R	3000	1100	510
S	2625	3000	250

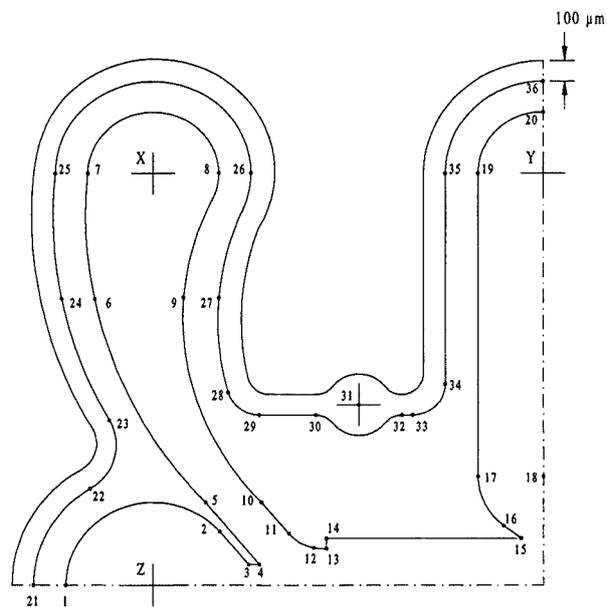
Punkt	x [μm]	y [μm]
1	0	3250
2	0	-2750
3	64	552
4	356	615
5	290	502
6	200	180
7	123	202
8	62	133
9	200	75
10	180	-95
11	14	-100
12	41,65	-331,85
13	386,37	-1696,47

Konstruktionsdaten des Linearaktors

Gesamtansicht:



Detailansicht:



Koordinaten der Fluidein- und -ausgänge:

Punkt	x [μm]	y [μm]	r [μm]
X	-1800	2000	300
Y	0	2000	300
Z	-1800	0	400

Koordinaten der äußeren Berandung des Aktorgehäuses:

Punkt	x [μm]	y [μm]	r [μm]
A	0	-3250	
B	-700	-3250	
C	-700	-1700	
D	-1000	-1700	
E	-1000	-3250	
F	-2625	-3000	250
G	-2875	-1694,444	
H	-3000	-1200	510
I	-2875	-705,556	
J	-2625	3000	250
K	-1000	3250	
L	-1000	1700	
M	-700	1700	
N	-700	3250	
O	0	3250	

Koordinaten der Strömungskanäle:

Punkt	x [μm]	y [μm]	r [μm]
1	-2200	0	
2	-1495,247	259,086	
3	-1360	100	
4	-1310	100	
5	-1560	400	
6	-2002,472	1141,791	(R2049,211)
7	-2100	2000	
8	-1540,192	1850	
9	-1647,052	1087,405	(R1288,794)
10	-1300	400	
11	-1174,136	248,963	

12	-1020,492	177	
13	-1000	177	
14	-1000	227	
15	-100	227	
16	-180	287	
17	-300	527	
18	0	527	300
19	-300	2000	
20	0	2300	

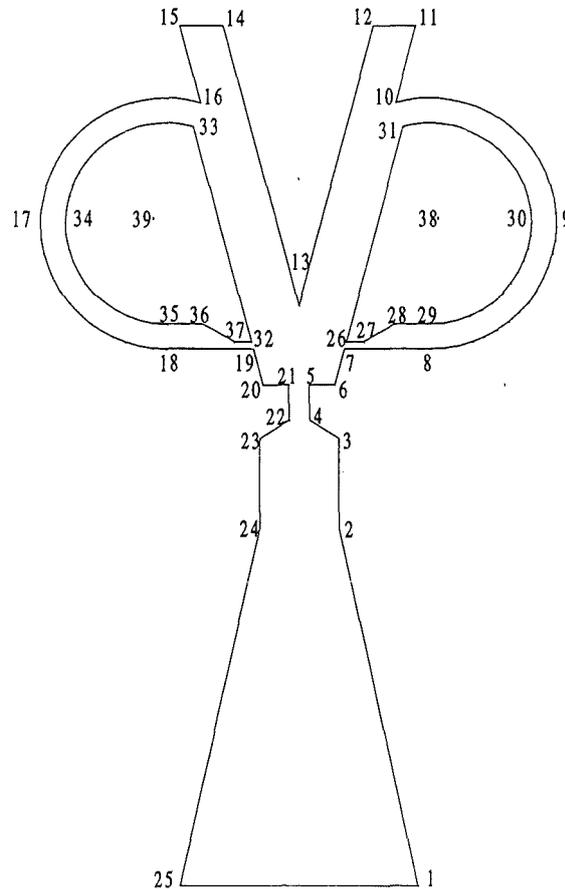
Koordinaten der Stopnut (Breite 100 μm):

Punkt	x [μm]	y [μm]	r [μm]
21	-2350	0	
22	-2089,236	467,806	
23	-2002,171	801,860	
24	-2217,592	1382,003	(R2049,211)
25	-2250	2000	
26	-1380	1840	
27	-1499,751	1394,850	(R1288,794)
28	-1455,187	936,033	
29	-1310,890	827	
30	-1050	827	
31	-850	877	150
32	-650	827	
33	-600	827	
34	-450	977	
35	-450	2000	
36	0	2450	

Anhang A.2

Konstruktionsdaten des FEM-simulierten fluidischen Oszillators

Gesamtansicht:

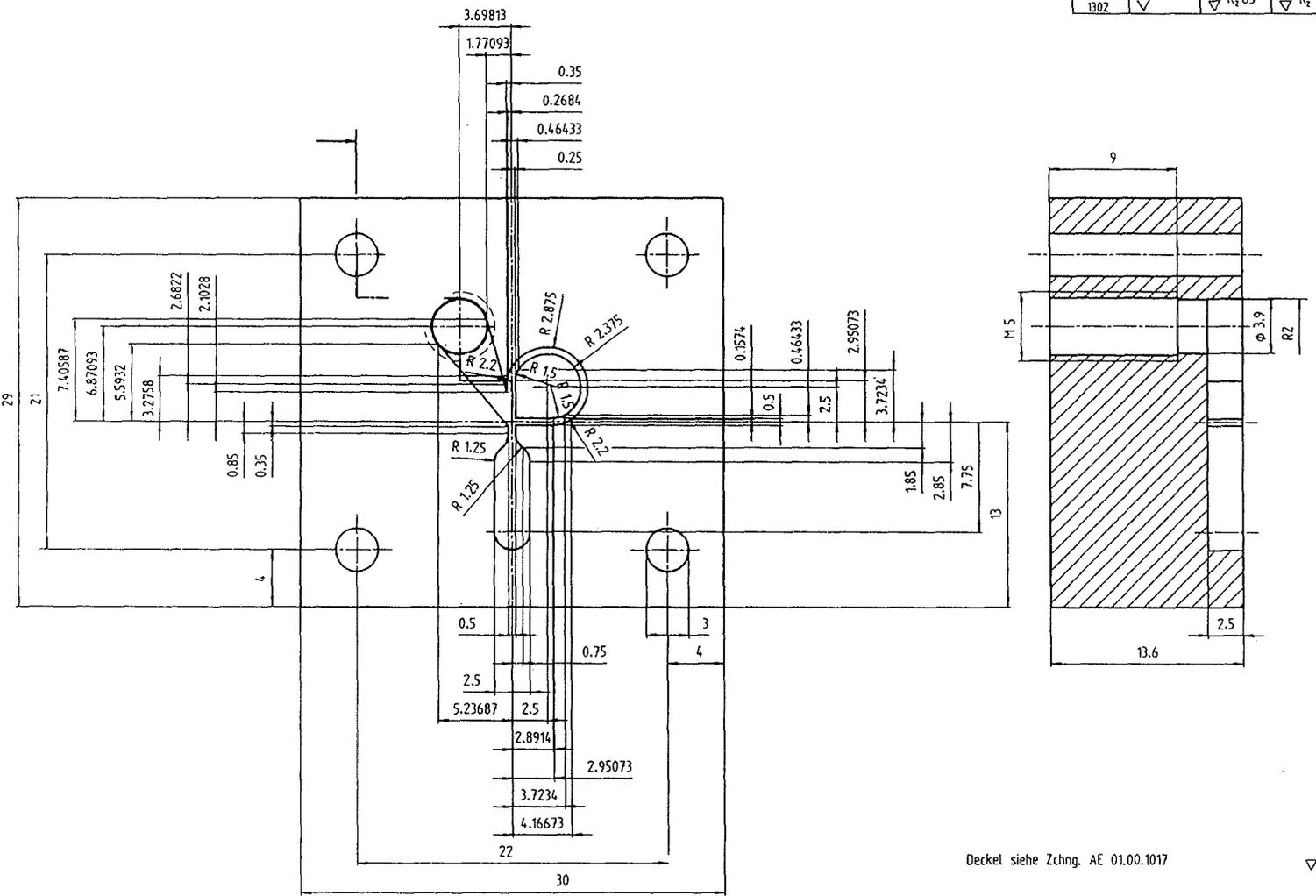


Punkt	x [μm]	y [μm]
1	390,52	-1713,42
2	55	-200
3	55	-75
4	15	-50
5	15	0
6	50	0
7	63,4	50
8	185	50
9	360	225
10	136,6	393,1

11	165	500
12	104,5	500
13	0	110
14	-104,5	500
15	-165	500
16	-136,36	393,1
17	-360	225
18	-185	50
19	-63,4	50
20	-50	0
21	-15	0
22	-15	-50
23	-55	-75
24	-55	-200
25	-390,52	-1713,42
26	66,08	60
27	90	60
28	135	85
29	185	85
30	325	225
31	146,34	359,56
32	-66,08	60
33	-146,34	359,56
34	-325	225
35	-185	85
36	-135	85
37	-90	60
38	185	225
39	-185	225

Anhang A.3 Konstruktionsdaten der Strahlableitenelemente mit einfacher Rückführung

DN 3141	Reihe 2	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽
DN ISO 1302		√Rz 63	√Rz 16	√Rz 4	√Rz 1

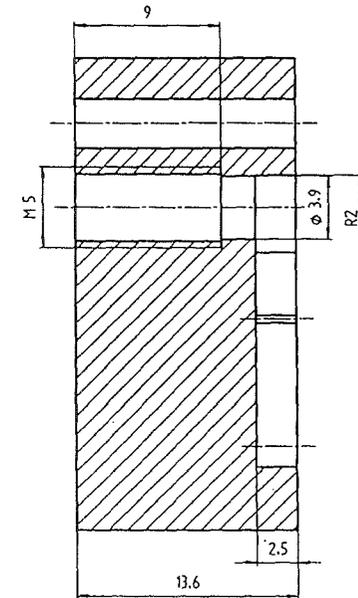
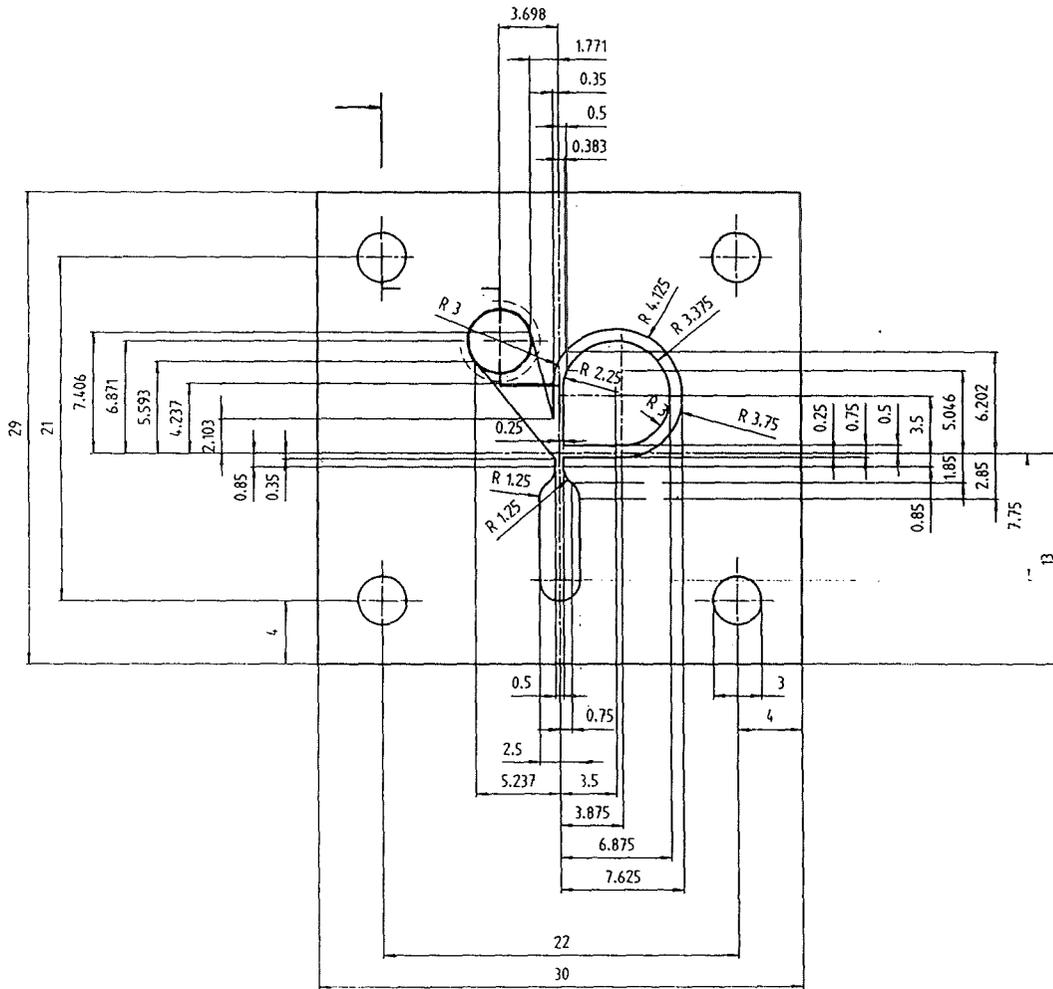


Deckel siehe Zchnng. AE 01.00.1017

√Rz 16

Datenbank \$1\$DIAZO\$PREISREGISTRAR\$TABEL\$DBA.3B / AE-01-00-1018-A2																	
Diese Zeichnung wurde mit CAD erstellt. Änderungen dürfen nur mit CAD durchgeführt werden.																	
<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Zustände / Produktionsstatus</th> <th colspan="2">Lichtbogen / Anmerkungen</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>4</td> </tr> </table>	Zustände / Produktionsstatus		Lichtbogen / Anmerkungen		1	2	1	2	3	4	3	4	<table border="1"> <tr> <td>F</td> <td>Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut f. Mikrostrukturtechnik</td> </tr> </table>	F	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut f. Mikrostrukturtechnik		
Zustände / Produktionsstatus		Lichtbogen / Anmerkungen															
1	2	1	2														
3	4	3	4														
F	Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut f. Mikrostrukturtechnik																
<table border="1"> <tr> <th>Material</th> <th>Maßstab</th> <th>Gewichte</th> <th>Werkstoff</th> <th>Preis</th> <th>Prozess</th> </tr> <tr> <td>S - 1</td> <td>1:1</td> <td></td> <td>Plexiglas</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Material	Maßstab	Gewichte	Werkstoff	Preis	Prozess	S - 1	1:1		Plexiglas			<table border="1"> <tr> <th>Bezeichnung</th> <th>Zeichnungs-Nr.</th> </tr> <tr> <td>SAE Typ 1A</td> <td>AE 01.00.1018</td> </tr> </table>	Bezeichnung	Zeichnungs-Nr.	SAE Typ 1A	AE 01.00.1018
Material	Maßstab	Gewichte	Werkstoff	Preis	Prozess												
S - 1	1:1		Plexiglas														
Bezeichnung	Zeichnungs-Nr.																
SAE Typ 1A	AE 01.00.1018																
<table border="1"> <tr> <th>Zust.</th> <th>Änderung</th> <th>Datum</th> <th>Name</th> <th>Urtyp.</th> <th>Erstellt für</th> <th>Erstellt durch</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Zust.	Änderung	Datum	Name	Urtyp.	Erstellt für	Erstellt durch								<table border="1"> <tr> <td>Blatt</td> <td>R</td> </tr> </table>	Blatt	R
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urtyp.	Erstellt für	Erstellt durch											
Blatt	R																

DIN 3141	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽
Reihe 2	REZENT	▽ _{Rz 63}	▽ _{Rz 16}	▽ _{Rz 4}	▽ _{Rz 1}
DIN ISO 1302	✓				

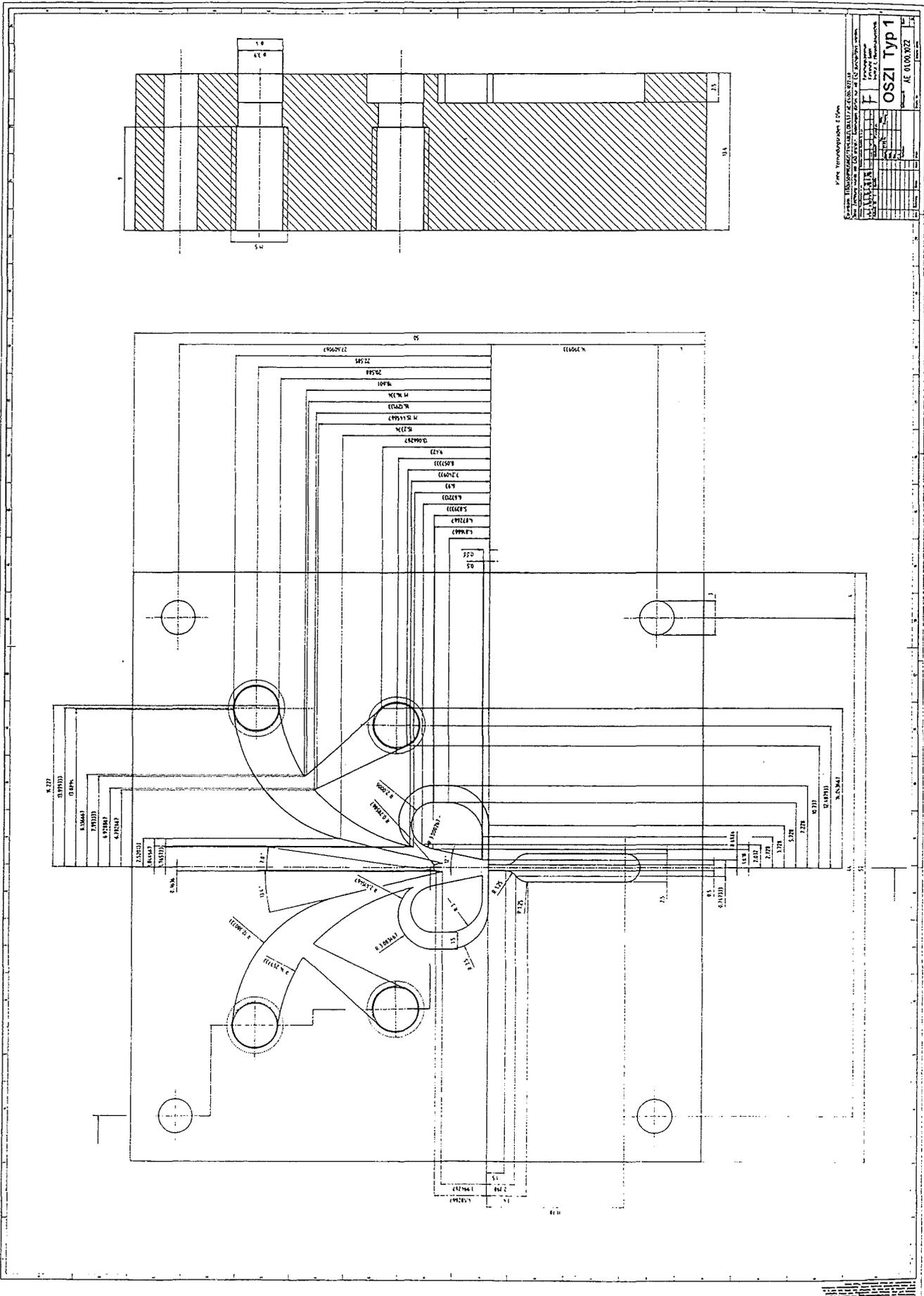


Deckel siehe Zchnng. AE 01.00.1017

▽_{Rz 16}

Datenbank \$15DIA20/PREISINGISTRABELE DBA.39 / AE-01-00-1019-A2				Diese Zeichnung wurde mit CAD erstellt. Änderungen dürfen nur mit CAD durchgeführt werden.			
Zustellung		Anzahl		Preis		Forschungszentrum Karlsruhe GmbH Institut f. Mikrostrukturtechnik	
Zustellung		Anzahl		Preis		SAE Typ 2A	
Zustellung		Anzahl		Preis		Zeichnungs-Nr. AE 01.00.1019	
Zustellung		Anzahl		Preis		Blatt	
Zustellung		Anzahl		Preis		R.	
Zust.	Änderung	Datum	Name	Urspr.	Erstellt für	Erweitert durch	

Anhang A.4 Konstruktionsdaten der experimentell untersuchten fluidischen Oszillatoren



Bezeichnungen

a	Abstand der Versorgungsdüse zum Keil bei fluidischen Strömungselementen
b_{Aus}	Breite eines Ausgangs beim fluidischen Oszillator
b_{Rf}	Breite eines Rückführkanals bei fluidischen Strömungselementen
b_{Sch}	Breite eines Schenkels beim fluidischen Oszillator
c	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
c_1, c_2	Konstanten
c_s	Schallgeschwindigkeit
d	Düsenweite
d_h	hydraulischer Durchmesser
d_{St}	Steuerdüsenweite
d_v	Versorgungsdüsenweite
f	Frequenz
$f_{\text{max.}}$	maximal mögliche Kolbenfrequenz des Linearaktors
h	Höhe der LIGA-Struktur
k	Skalierungsfaktor
ℓ	Länge eines Rückführkanals bei fluidischen Strömungselementen
\dot{m}	Massenstrom
p	Druck
$p_{\text{dyn,aus}}$	dynamischer Ausgangsdruck
$\Delta p_{\text{dyn,aus}}$	Differenz der dynamischen Ausgangsdrücke
p_v	Versorgungsdruck
p_{Verlust}	Druckverlust
$p_{v,\text{LA}}$	Versorgungsdruck des Linearaktors
$p_{v,\text{Oszi}}$	Versorgungsdruck des fluidischen Oszillators
r	Radius des Rückführkanals bei fluidischen Strömungselementen
t	Zeit
$v_{\text{mittl.}}$	mittlere Geschwindigkeit des Kolbens im Linearaktor
w	Haftwandlänge beim fluidischen Oszillator
A	Querschnittsfläche
A_{aus}	Querschnittsfläche des Ausgangs
F	Kraft

Bezeichnungen

F_m	massebezogene Kraft
FEM	Finite Elemente Methode
LA	Linearaktor
M	Machzahl
PMMA	Polymethylmethacrylat
Q	Volumenstrom
Q_{Ausgang}	Volumenstrom durch den Ausgang des Wandstrahlelements
$Q_{\text{Versorgung}}$	Volumenstrom durch den Eingang des Wandstrahlelements
Re	Reynoldszahl
U	Umfang
V	Volumen
WSE	Wandstrahlelement
WSE-LA	Kombination aus Wandstrahlelement und Linearaktor
ε	Dissipationsrate der Turbulenzenergie
κ	Turbulenzenergie
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
τ_s	für den Fluidstrahl benötigte Schaltzeit von einer Haftwand des Oszillators zur anderen
τ_T	Transmissionszeit des Schaltsignales durch den Rückführungskanal des Oszillators
ζ	Druckverlustbeiwert

Indizes

aus	Ausgang
dyn	dynamisch
h	hydraulisch
m	massebezogen
max	maximal
mittl	mittlere
stab	stabil
Aus	Ausgang

Aus	Ausgang
Haft	Haftung
LA	Linearaktor
Last	Belastung
Oszi	fluidischer Oszillator
Rf	Rückführung
S	Schalten
Sch	Schenkel
St	Steuerdüse
T	Transmission
V	Versorgungsdüse

Sonstige Zeichen

Δ	Laplace-Operator
∇	Nabla-Operator
$\frac{\partial}{\partial t}$	partielle zeitliche Ableitung
$\frac{d}{dt}$	totale zeitliche Ableitung
'	transformierte Größe
~	Proportionalität
\rightarrow	Vektorpfeil

Literaturverzeichnis

- [Bec-86] Becker, E. W.; Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, A.:
"Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Electroforming and Plastic Molding (LIGA-Process)";
Microelectronic Engineering 4, 1986, S.35-56.
- [Cam-69] Campagnuolo, C.J.; Gehman, S.E.:
"Fluidic Oscillator Design";
Instruments and Control Systems, März 1969, S.91-94.
- [Dau-95] Dauber, O.; Gebhard, U.; Hein, H.:
"Experimentelle und theoretische Untersuchung des Betriebsverhaltens von miniaturisierten Wandstrahlelementen mit Wasser als Arbeitsfluid";
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1995.
- [Flo-92] FLOTRAN revision 2.1
"User's Manual";
CompuFlo Inc., 1992.
- [Fün-94] Fünser, T.; Vollmer, J.; Hein, H.:
"Experimentelle Bestimmung des Betriebsverhaltens von miniaturisierten bistabilen Wandstrahlelementen mit unterschiedlichen Geometrien";
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994.
- [Geb-95] Gebhard, U.; Hein, H.; Menz, W.; Ruther, P.:
"A Fluidic Micro-Oscillator to Steer a Linear Tool";
Proc. Int. Symp. on Microsystems, Intelligent Materials and Robots, MIMR'95, Sendai, Japan, 1995, S.41-44.
- [Geb-96] Gebhard, U.; Hein, H.; Schmidt, U.:
"Numerical Investigation of Fluidic Micro-Oscillators";
J. Micromech. Microeng. 6, 1996, S.115-117.
- [Glä-65] Glättli, H.H.:
"Miniaturisierungsprobleme bei strömungsmechanischen Elementen";
Proc. IFAC/IFIP Symposium, München, 1965, S.35-41
- [Glä-73] Glättli, H.H.:
"Fluidische Schaltelemente";
Neue Züricher Zeitung, Beilage Forschung und Technik,
19. März 1973, Nr. 130
- [Gra-93] Gravesen, P.; Branebjerg, J.; Jensen, O.S.:
"Microfluidics - A Review";
Workshop Digest, Micro Mechanics Europe 1993,
MME'93, Neuchatel, Switzerland, 1993, S.143-164.

- [Gün-96] Günther, R.; Gebhard, U.; Ruther, P.:
"Entwicklung eines hydraulischen Linearaktors für die minimalinvasive Medizintechnik";
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Jus-96] Just, E.; Gebhard, U.; Ruther, P.:
"Charakterisierung eines fluidisch angetriebenen Linearaktors für die minimal-invasive Medizintechnik";
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Kar-87] Kar, S.; Desai, M.C.; Gharpurey, G.M.:
"A Fluidic Flowmeter";
Conf. on Fluid Mechanics Fluid Power, Srinagar, Indien, 1987, S.719-723
- [Kul-96] Firma Kulite Semiconductor GmbH, Hofheim/Ts.
persönliche Mitteilung
- [LeR-68] LeRoy Jr., M.J.:
"Evaluation of a Fluidic Oscillator as a Molecular Weight Sensor for Gas Mixtures";
NASA TM X-1698, Washington, D.C., U.S.A., 1968
- [Maa-94] Maas, D.; Büstgens, B.; Fahrenberg, J.; Keller, W.; Seidel, D.:
"Application of Adhesive Bonding for Integration of Microfluidic Components";
Proc. ACTUATOR 94, Bremen, 1994, S.75-78.
- [Moh-91] Mohr, J.; Bley, P.; Burbaum, C.; Wallrabe, U.:
"Herstellung von beweglichen Mikrostrukturen mit dem LIGA-Verfahren";
KfK-Nachrichten, Jahrg. 23, 2-3/91, S.110-117.
- [Pro-66] Prokopius, P.R.:
"Use of a Fluidic Oscillator as a Humidity Sensor for a Hydrogen-Steam Mixture";
NASA-TM-X-1269, Washington, D.C., U.S.A., 1966.
- [Tip-71] Tippetts, J.R., Ng, H.K., Royle, J.K.:
"An Oscillating Bistable Fluid Amplifier for use as a Flowmeter";
IFAC Symp. on Fluidics, Prag, Tschechoslowakei, 1971, Beitrag C6
- [Rec-76] Rechten, A.:
"Fluidik";
Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 1976.
- [Rut-95] Ruther, P.; Bacher, W.; Feit, K.; Maas, D.; Menz, W.:
"Microtesting System Made by the LIGA Process to Measure the Young's Modulus in Cantilever Microbeams";
Proc. ASME'95 Winter Meeting, DSC-Vol. 57-2, San Francisco, U.S.A., 1995, IMECE, S.963-967.

- [Vol-93] Vollmer, J.:
"Numerische Simulation von Mikrofluidiks im Vergleich zum Experiment";
Tagungsband CAD-FEM Users' Meeting 1993, Bamberg, Beitrag 19
- [Vol-94] Vollmer, J.; Hein, H.:
"Miniaturisierte fluidische Strahlelemente in LIGA-Technik mit integrierter elektrischer Steuerung";
Dissertation, Universität Karlsruhe 1994, FZKA-Bericht Nr. 5375
- [Zie-91] Zierep, J.; Bühler, K.:
"Strömungsmechanik";
Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1991.