





Abschlussbericht

Erforschung skalierbaren Prinzipien für miniaturisierte Aktoren

Laufzeit: 01.10.2002 - 30.06.2006

Förderkennzeichen:03 i 4907

Projektleiter / Antragsteller:	Prof. Dr. KH. Hirschmann
Bearbeiter:	DiplIng. H. Einhorn
	DiplIng. (FH) R. Müller
	DiplIng. A. Sommerfeld
Justus-von-Liebig-Weg 6	

18059 Rostock







Inhaltsverzeichnis

	Kurzdarstellung	- 2 -
	 Ziel des Forschungsvorhabens Vorraussetzungen 	- 2 - - 4 -
	4. Planung und Ablauf des Vorhabens	- 6 -
	5. Eigene Vorarbeiten	- 6 -
	6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	- 7 -
11	Eingehende Darstellung	- 9 -
	1 Tochnische Ausstattung	0
	Frzielte Fraeboisse	- 9 -
	2. CED-Borochnungon	11 -
	2.1 Cr D-Derechnungen	15 -
	2.1.1 Veraleich der Berechnungen mit den Messungen	18 -
	2.1.2 Vergleich der Derechnungen mit den Messungen	20 -
	2.2.1 Schraubensnindelnumne	20 -
	2.2.1 Schlaubenspindelpumpe	20 -
	2.2.2 Tiubkoibenpumpe	23 -
	2.2.2.1 Ellisatz als Dosierpumperul Standneizgerate	25 -
	2.2.2.2 Funktionsmuster und Messungen	20-
	2.2.2.5 Plattonyontil AE 3	20 -
	2.2.2.4 Flatterivertin AF 5	29 -
	2.2.2.5 Magnetitels	40 -
	2.3 Technische Ausstattung	40 -
	2.3.1 Provinsion -	11 -
	2.3.2 Reschreibung Konstruktion und Simulation des Tronfengenerator	- 11- c // 2
	3 Fortschritt hei anderen Stellen	<u>۲</u> ۲.۵
	 A Erfolgte oder genlante \/eröffentlichungen 	4 9 /0
		+3







I Kurzdarstellung

2. Ziel des Forschungsvorhabens

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, skalierbare Prinzipien für miniaturisierte Aktoren zu entwickeln. Diese Zielsetzung entspringt der Erkenntnis, dass die meisten Aktoren nicht wie Sensoren mit Verfahren der Mikrosystemtechnik dargestellt werden können, sondern wegen der zu handhabenden Energie- und Stoffströme bevorzugt als miniaturisierte mechanisch-elektrisch-fluidische Baugruppen aufgebaut werden müssen. Leistungsfähige Aktoren liegen zwischen der Mikro- und Makrowelt.

Fokussiert wurde die Forschungsaktivität auf robuste, miniaturisierte, fluidische Aktoren wie Pumpen, Mischer und Ventile. Ergänzend dazu wurden Untersuchungen zu unkonventionellen tribologischen Systemen notwendig und auch durchgeführt.

wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele orientierten Die sich an den 711 erforschenden Phänomenen, die ingenieurwissenschaftlicher, physikalischer und werkstoffspezifischer Natur sind. Im Vordergrund standen dabei die Funktionsprinzipien. Weniger wurden neue und bekannte Fertigungstechnologien weiterentwickelt. Sie werden aber für die Funktionsmusterfertigung angewendet.

Bei den fluidischen Mikrosystemen mit bewegten Bauteilen müssen, im Vergleich zu den Makrosystemen, sehr enge Maß-, Form- und Lagetoleranzen eingehalten werden, um akzeptable volumetrische und fluidisch-mechanische Wirkungsgrade zu erzielen. Eine lineare Down-Skalierung der bei den Makrosystemen angewandten Funktionsprinzipien führt zu unverhältnismäßig engen Toleranzen, die wenn überhaupt nur mit sehr großem fertigungs- und montagetechnischem Aufwand einhaltbar sind. Hinzu kommt, dass bei den engen fluidgefüllten Spalten die hydrodynamische Schmierung massiv in das Mischreibungsgebiet übergeht. Die bekannten Auswirkungen sind die Reduzierung des mechanischen Wirkungsgrades und der Lebensdauer.

Ein im Verlauf des Projektes verfolgter Ansatz konzentriert sich auf die aktive Toleranzkompensation zum einen nach dem Selbsthilfeprinzip, z.B. mit sich selbst einstellenden Spalten oder einer Spaltverlustkompensation durch Rückförderstrukturen.







Hinzu kamen prinzipiell andere Ansätze, z.B. Verdrängerpumpen, bei denen sich ein zeitweise abgeschlossenes Arbeitsvolumen periodisch ändert. So sollte die Energie über den magnetischen Fluss durch die Gehäusewand hindurch eingebracht werden. Eine Lösung stellt die neu entwickelte Hubkolbenpumpe dar, siehe Kapitel II2.2.2. Ergänzt wurden die Forschungsarbeiten um Verfahren, die eine Fluidförderung durch piezoelektrisch ausgelöste Druckwellen bewirken. Hinsichtlich der ebenfalls benötigten Absperrorgane gibt es bei den Makroventilen bevorzugt Kolbenschieber- und Sitzventile. Für miniaturisierte Absperrorgane kommen Lösungenansätze in Frage, die geringe bewegte Massen und hohe Eigenfrequenzen haben. Eine weitere Anforderung an die Ventilprinzipien stellt das minimierte Totvolumen dar. Dies ist wichtig bei Anwendungen, bei denen eine genaue Dosierung im Vordergrund steht.

Die systematische Untersuchung unter Einbeziehung des Betätigungsmomentes und des Energieverbrauches liefert Erkenntnisse über die Eignung der Prinzipien für die Miniaturisierung. Geeignete Prinzipien sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens in ein Labormuster umgesetzt werden.

Die Strömungsverhältnisse in engen Radial- und Axialspalten werden durch CFD-Simulation untersucht und die Ergebnisse durch Versuche verifiziert. Mit dem Modellversuchsaufbau wird insbesondere das Reibmoment im Axialspalt in Abhängigkeit von der Leckstrommenge ermittelt, wenn die Oberfläche einer Spaltwand strukturiert ist. Ziel ist es, die hydrodynamischen Förder- bzw. Dichteigenschaften unterschiedlicher Rückförderstrukturen zu charakterisieren, um mit geeigneten Strukturen die Leckverluste durch die Stirnspalte von kleinen Umlaufverdrängern zu reduzieren.

Der Prüfstand besteht aus zwei zylindrischen Reibkörpern, von denen der eine elektromotorisch angetrieben wird. Die beiden Reibkörper sind stirnseitig durch einen engen Axialspalt getrennt. Der Axialspalt wird in der Mitte über eine ringförmige Nut mit einem Fluid versorgt, das nach innen und außen abströmt. Die Fluid- und Reibkörpertemperatur wird mit Hilfe eines Flüssigkeitsthermostaten konstant gehalten.

Das Reibmoment wird mit einem Kraftaufnehmer gemessen, der das Reibmoment des nicht angetrieben, in einem reibungsfreien Luftlager gelagerten, Reibkörper abstützt. Der angetriebene Reibkörper übt auf den nicht angetriebenen über die Flüssigkeit eine Kraft aus. Dementsprechend stellt sich die Spalthöhe ein. Alternativ wird ein Spalt mit definierter Höhe eingestellt. Gemessen werden außerdem der Durchfluss durch den Spalt nach innen und außen und die Temperatur im Spalt. Zur Beobachtung der







Vorgänge im Spalt mit Rückförderstrukturen ist eine Wand in Glas ausgeführt. Für die Beobachtung ist ein entsprechendes Mikroskop mit Kameraaufsatz vorhanden.

Die für die numerische Simulation erforderlichen Berechnungsvolumina werden als 3D-CAD-Modelle dargestellt und anschließend mit der Software ICEM CFD vernetzt. Als Löser für das Strömungsproblem stehen die Softwarepakete StarCD und Ansys CFX 5 zur Verfügung, die vorab auf ihre Eignung hin überprüft wurden.

3. Vorraussetzungen

Zum Thema Mikrosysteme gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen und Patente. Eine Übersicht findet man in /1/, einschließlich eines Unterkapitels über mikrofluidische Komponenten und einer umfänglichen Literatursammlung. Zum Stand der Wissenschaft und Forschung auf dem Gebiet der mikrofluidischen Aktorik gibt es speziell zu Pumpen einen repräsentativen Übersichtsartikel /2/, in dem 59 Publikationen referenziert werden. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Mikropumpen ohne bewegte mechanische Teile für Fördermengen von weniger als einem Mikroliter geeignet sind. Das heißt es bleibt eine Lücke für miniaturisierte mechanische Pumpen im Bereich von Fördermengen im Mikroliterbereich bis zu den Kleinpumpen. Zu den in diesem Forschungsvorhaben vorgesehenen Untersuchungen von miniaturisierten fluidischen Systemen, findet man vor allem Produktinformationen, z.B. der Firmen HNP-Mikrosysteme oder Lee. Weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen sind nicht bekannt.

- /1/ Berger, J.; Büttgenbach, S.; Karthe, W.; Kergel, H.; Lehr, H.; Reichl, H.:
 Von den Technologien zur Anwendung. Editoren: S. Büttgenbach, VDE/VDI-GMM, Braunschweig; H. Sturm, VDI/VDE-IT, Berlin-Teltow; VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), 1997
- /2/ Nguyen, N.-T.; Dökel, W.: Mikropumpen - Der Entwicklungsstand im Überblick.F & M 109 (2001) 3, S. 69-73







Oberflächenstrukturen auf bewegten Maschinenteilen werden wegen ihrer Eigenschaft, einstellend Schmierspalte selbst zu erzeugen, bei Axialgleitlagern und Gleitringdichtungen angewendet. Die Erkenntnisse und konstruktionstechnischen Grundlagen aus diesen bewährten Anwendungs-gebieten waren Ausgangspunkt für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen. Abbildung 1 zeigt eine prinzipielle Darstellung von Gleitringdichtungen nach Müller [1] und die Aufgaben der verschiedenen Konstruktionselemente sowie die durch den hydrodynamischen Effekt hervorgerufene Rückförderwirkung. Bisher fehlt jedoch eine strömungsmechanische Erforschung der Zusammenhänge in engen Spalten als Voraussetzung für eine gezielte Optimierung der Oberflächenstrukturen.



Abbildung 1 Gleitringdichtung nach Müller [1]

- [1] Müller: Abdichtung bewegter Maschinenteile, Medienverlag Müller, Waiblingen 1990
- [2] Muijderman: Spiral Groove Bearings







4. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt hatte zunächst eine Laufzeit vom 01.10.2002 bis zum 31.09.2005. Während dieser Zeit wurden die Arbeitsfelder parallel von zwei Diplom-Ingenieuren bearbeitet. Unterstützung leistete ein Diplom-Ingenieur (FH), der die Elektro- und Messtechnik entwickelte und betreute.

Durch den positiv bewerteten Aufstockungsantrag konnte die Laufzeit bis zum 30.06.2006 verlängert werden. Für diesen Zeitraum wurde die Stelle des dritten Ingenieurs nicht mehr geplant, da entsprechende Labor- und Messtechnik bereits im ersten Förderzeitraum umgesetzt werden konnte.

Das Forschungsthema unterscheidet sich durch seine funktionsorientierte Vorgehensweise von anderen Mikrotechnologieprojekten, die eher das mit speziellen Fertigungsverfahren Machbare in den Vordergrund stellen.

5. Eigene Vorarbeiten

Der Antragsteller arbeitet im Rahmen seiner Hochschulforschung auf den Forschungsfeldern Mechatronik, Antriebstechnik und antragsspezifisch auf dem Gebiet der Piezo- und Zahnradpumpen. Im Folgenden sind frühere und aktuelle Forschungsthemen aufgelistet:

- Forschungstätigkeit im IBM-Forschungslabor in San Jose, USA, zu piezoelektrischen Tropfenerzeugern für Tintendrucker
- Pulsationsarme Zahnradpumpen (Patente), Stuttgart
- Piezoelektrischer Tropfenerzeuger mit größerem Tropfenvolumen (Patent), Rostock
- Bedrucken von Freiformflächen mit Piezodruckköpfen; (Rapid- Tooling) ProInno-Projekt, Rostock
- Schichtweises Erzeugen von Gießformen durch Einbringen von Tropfen in Alkalisilikate, Rostock
- Erzeugen und Beschichten von Endoprothesen mit biokompatiblen Materialschichten in Tropfenform, Rostock (gefördert von der Stiftung Industrieforschung)
- Die Erkenntnisse zur piezoelektrischen Tropfenerzeugung und deren Anwendung wurde in Publikationen /1/-/8/ veröffentlicht.







- /1/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Pumpen für kleinste Flüssigkeitsmengen, Landestechnologieanzeiger Mecklenburg-Vorpommern / 3, 1998.
- /2/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Mikropumpe zum Fördern, Dosieren und Plazieren von Flüssigkeiten, Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift DE 199 38 239.5, 1999.
- /3/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Piezoelektrische Mikropumpen für große Tropfenvolumina, Industrie Messe Hannover, 2000.
- /4/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Mould Making by Stratifying Droplets in Layers. In: Proc. of the International User's Conference on Rapid Prototyping & Rapid Tooling & Rapid Manufacturing uRapid 2001, p.281-287, Amsterdam, 2001.
- /5/ Berger, N.: Wachsende Zahl von Rapid-Tooling Verfahren, Industrieanzeiger, 25/2001, Konradin-Verlag, 2001.
- /6/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Gießformherstellung durch Auftragen von Tropfen-Schichten, Landestechnologieanzeiger Mecklenburg-Vorpommern / 3, 2001.
- /7/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Entwicklung und Implementierung einer Steuerung für ein neues Rapid Tooling Verfahren auf der Grundlage von LabVIEW. In: Tagungsband zum Kongress Virtuelle Instrumente in der Praxis VIP 2002, p.160-166, Hüthig Verlag, München, 2002.
- /8/ Müller, Th.; Hirschmann, K.-H.: Dosieren und Plazieren minimaler Flüssigkeitsmengen. In: Tagungsband zum Symposium Innovative Antriebssysteme ISOM 2002, p. 536-545, Chemnitz, 2002.

6. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Laufe des Projektes ergaben sich verschiedene Zusammenarbeiten mit Firmen und Forschungseinrichtungen.

Die Forscher kooperierten innerhalb der Universität Rostock mit Forschern aus der eigenen Fakultät, den Naturwissenschaften, den Biowissenschaften und der Medizin. Durch das Projekt angestoßen wurde die intensive Zusammenarbeit mit dem Institut für Strömungsmechanik der Universität Rostock. Es ist ein Arbeitskreis zum Thema CFD-Simulation entstanden. Der Institutsleiter Herr Prof. Leder hatte das Thema mikrofluidische Strömungsvorgänge und deren experimentelle Untersuchung neu in sein Forschungsprogramm aufgenommen. Die Forschungsvorhaben werden durch die







Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert. Die Zusammenarbeit mit den Graduiertenkollegs "Fluidische Sensor-Aktor-Systeme" und "Zellulare Sensorsysteme" wird gepflegt. Über die Grenzen der Universität hinaus werden Kontakte zu Forschern und Forschungseinrichtungen mit verwandter Zielsetzung, insbesondere zum Sonderforschungsbereich 499 "Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung umgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen" in Karlsruhe, zum Labor für Mikrozerspanung (LFM) der Universität Bremen und zum Institut für Mikrotechnik in Mainz gehalten, um die dort entwickelten Technologien in die Bewertung der eigenen Forschungsarbeiten einzubeziehen.

Im Zusammenhang mit dem Projekt steht das von der Stiftung Industrieforschung geförderte Thema "Entwicklung eines Freiformflächen-Coatingverfahrens für die Beschichtung medizinischer Implantate", das in Zusammenarbeit mit der Firma DOT, Rostock bis zur Anwendung gebracht wird.

Eine Zusammenarbeit mit einem Hersteller von Thermosystemen ergab sich nach der Präsentation eines Funktionsmusters der Hubkolbenpumpe. In Verbindung mit dem BMBF EXIST ist eine neue Dosierpumpen entstanden, deren Funktionsprinzip im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eingehend hinsichtlich der Wirkungsweise getestet und optimiert wurde. Der Hersteller ist im Rahmen einer Konzeptanalyse auf der Suche nach Alternativen für die momentan verbaute Dosierpumpe. Durch die technischen und funktionellen Vorteile der entwickelten Hubkolbenpumpe war dieses Konzept für den Hersteller interessant und es wurde im weiteren Verlauf des Projektes weiter untersucht. Es wurden die Anforderungen eingegrenzt und zielgerichtet geforscht. Für eine Bemusterung und Konzeptbewertung wurde zwischen dem Hersteller und der Universität Rostock ein Kooperationsvertrag in der Zeit vom 15.09.2005 bis zum 31.12.2005 abgeschlossen.

Weitere Kooperationspartner konnten durch das Netzwerk der InnoRegio Nukleus gewonnen werden. So stand die MQ Engineering GmbH Rostock zur Seite, als es um Materialanalysen ging. Ein weiterer Partner war HNP Mikrosysteme GmbH Parchim, als es um Fragen wie Werkstoffauswahl und Medienbeständigkeit ging.







II Eingehende Darstellung

1. Technische Ausstattung

Das Institut verfügte bereits über eine Koordinatenmessmaschine vom Typ Zeiss Prismo VAST, siehe Abbildung 2(a), und über zwei Laservibrometer mit jeweils einem Laserkopf der Firma Polytec, siehe Abbildung 2(b, c). Diese Messmittel eignen sich für hochpräzise und im Falle des Laservibrometers für hochdynamische Messungen. Die Erfahrungen und die Geräte wurden für die Forschungsarbeiten intensiv eingesetzt.

Im Laufe des Projektes wurde die technische Ausrüstung entsprechend den Anforderungen ergänzt bzw. neu aufgebaut.

Die vorhandene KMG wurde durch Projektmittel modernisiert. Die Modernisierung umfasste Änderungen an der Hard- und an der Software. Die Rechentechnik wurde auf den aktuellen Stand der Technik gebracht. Die Software Calypso und Holos von Zeiss läuft nunmehr auf Windowsbasis und bietet nicht nur im Bereich der Regelgeometrien entscheidende Verbesserungen in Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und die Bedienerfreundlichkeit.



Abbildung 2 Messtechnik







Für die experimentellen Untersuchungen sind Funktionsmuster erforderlich, die nach nichtkonventionellen Fertigungsverfahren in der Herstellung verlangen. Die erforderlichen Genauigkeiten, insbesondere die hohen Anforderungen an die Oberflächengüte, sind maßgebend für die hochgenaue Bearbeitung. Dafür wurde eine Mikrobearbeitungsmaschine der Firma Kugler angeschafft, siehe Abbildung 3. Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus 4-Achs-CNC-Hochgeschwindigkeits-fräsmaschine und einem Bearbeitungslaser (YAG) mit der Wellenlänge von 532 nm. Durch diese und die ergänzende technische Ausstattungen, siehe Tabelle 1, ist es möglich Funktionsmuster mit den erforderlichen engen Toleranzen und hohen Oberflächenqualitäten herzustellen und zu qualifizieren.

Tabelle 1 Technische Ausstattung

Mikrobearbeitungsmaschine	-4-Achs-CNC Hochgeschwindigkeitsfräsmaschine
Microgantry GU Firma Kugler	- HSC-Spindel 160 000 U/min (a)
Abbildung 3	- Fräser bis 0,1 mm , Bohrer bis 0,03 mm
	- 3-D-Messtaster als Werkstückmesssystem (c)
	- Laser Werkzeugmesssystem (b)
	- konfokaler Sensor für Höhenprofile (100nm
	Auflösung) (d)
Bearbeitungslaser	- 532 nm, 10 Watt
Lasermark 4 Firma Trumpf	- x-y-Ablenkeinheit
Abbildung 3 (a)	- Strukturieren, Ausschneiden
Ultraschallbearbeitung	- Feinst- und Nachbearbeitung auch in Glas
Firma Branson	und Keramik
Abbildung 3 (e)	
Messtechnik	- 2 Laservibrometer
	- Thermografie
	- Stereomikroskop
	- div. Sensoren für Durchfluß, Druck, Weg,
	Temperatur,



Abbildung 3 Bearbeitungszentrum







2. Erzielte Ergebnisse

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

2.1 CFD-Berechnungen

Die nachfolgend aufgeführten Untersuchungen und Ergebnisse im Bereich der CFD-Berechnung sind als arbeitsfeldübergreifend einzuordnen und können daher nicht nur einem Arbeitsfeld zugewiesen werden.

Zu Beginn der numerischen Untersuchungen wurden die zur Verfügung stehenden Berechnungsprogramme StarCD und ANSYS CFX hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die Strömung in engen Spalten hin überprüft. Dicht- bzw. Schmierspalte sind Volumen mit einer relativ großen Ausdehnung in der Fläche, haben jedoch im Verhältnis dazu eine sehr geringe Höhe. Man spricht vom so genannten Aspect Verhältnis, das in diesem Fall sehr ungünstig ausfällt. Beide Programme nutzen die Finite-Volumen-Methode zur Lösung von Strömungsaufgaben. Die Genauigkeit der Ergebnisse und die Berechnungsgeschwindigkeit hängen maßgeblich von der Qualität der verwendeten Berechnungsvolumen ab. In der Diskretisierungsphase wird das Gesamtvolumen in viele kleine Volumen unterteilt. Der eingesetzte Löser berechnet das Strömungsproblem danach in jedem Teilvolumen und setzt aus der Vielzahl von Teilergebnissen anschließend daraus das Gesamtergebnis mit Hilfe von Übergangsbedingungen zusammen. Aus rechentechnischen Gründen steht für jede Berechnung nur eine begrenzte Anzahl von Berechnungsvolumen zur Verfügung. Aus diesem Grund und aus der Überlegung heraus, dass der Dichtspalt auch in seiner Höhe hinreichend aufgelöst werden muss, haben die Berechnungsvolumen genauso wie der Dichtspalt selbst eine flächige, dünne Form.

Eine weitere besondere Herausforderung für die Berechnungssoftware ist die Nutzung von Berechnungsvolumen mit sogenannten kollabierten Flächen. Deren Einsatz wird nötig, wenn man Dichtspalte mit spitz auslaufendem Volumen diskretisieren möchte, wie es z.B. bei den Gleitringdichtungen aus Abbildung 1der Fall ist. Abbildung 4 zeigt die Veränderung eines Berechnungsvolumens hinsichtlich seiner Form. In der oberen Reihe ist die Entwicklung des Volumens (a) beim Einsatz von einer (b) bzw. von zwei



Abbildung 4 Veränderung eines Berechnungsvolumens durch den Einsatz kollabierter Flächen kollabierten Flächen (c) zu sehen. Die untere Reihe (d bis f) zeigt das jeweilige Volumen bei einem Untersuchungsobjekt mit sehr flacher Geometrie, z.B. einem Dichtspalt. Neben dem ungünstigen Aspect Verhältnis entstehen im vorliegenden Fall also auch sehr kleine Winkel, die eine numerische Lösung erschweren. Nach zahlreichen Tests fiel die Entscheidung zu Gunsten von ANSYS CFX, da die Berechnungen mit StarCD bei flachen Volumen nur sehr langsam und unter Verwendung kollabierter Flächen gar nicht konvergierten. Aber auch beim Einsatz von ANSYS CFX erhöht die ungünstige Geometrie die Rechenzeit.

Der zweite Schritt bei der Berechnung der Dichtspalte ist der Vergleich unterschiedlicher Strukturen. Dabei wurde zunächst der Strukturquerschnitt verändert. Strukturen mit dreieckigem Querschnitt, wie sie teilweise bei Gleitringdichtungen üblich sind, zeigten im Rahmen der Berechnungen gegenüber den Strukturen mit rechteckigem Querschnitt keinerlei Vorteile in Bezug auf Druckausbildung und Rückförderwirkung. Des Weiteren sind sie schwieriger zu fertigen. Eine weitere Untersuchung dieser Formen wurde verworfen.

Als nächstes wurde die Begrenzung der Strukturen in der Ebene variiert. Den größten Erfolg versprachen die bereits von Muijderman [2] theoretisch untersuchten Strukturen mit logarithmischer Begrenzung. Diese besitzen die spezielle Eigenschaft, dass jedes Basiselement der Struktur (jeweils eine Erhöhung und eine Vertiefung) zu jedem Zeitpunkt einen maximalen Beitrag zum Druckaufbau leistet. Abbildung 5 zeigt das Konzept der logarithmischen Begrenzung von Strukturen. Der die Struktur







begrenzende Radius r ist eine Funktion des umlaufenden Winkels θ und berechnet sich nach r = r₁e^{θ tan α}.

Nachdem die prinzipielle Form der Strukturen und auch die Spaltgeometrie am Modellprüfstand endgültig feststanden, wurde damit begonnen, Serien von Berechnungen durchzuführen. In deren Verlauf kamen 3D-Modelle zum Einsatz, die sich hinsichtlich ihrer geometrischen Eigenschaften in mehreren Parametern unterschieden. Es wurde stets nur ein Parameter variiert, so dass die Abhängigkeit der Rückförderung, des Reibmomentes und des Druckes vom jeweiligen Parameter nachweisbar war. Variationen der Randbedingungen wie anliegender Druck und Rotationsgeschwindigkeit wurden durchgeführt.

Bei den Berechnungen und deren Vorbereitung wurde jeweils die periodische Anordnung der Strukturen auf der rotierenden Oberfläche in Umfangsrichtung ausgenutzt. Es war also jeweils nur die Modellierung, Vernetzung



Abbildung 5 logarithmische Strukturbegrenzung nach Muijderman [2]

und Berechnung einer einzelnen Struktur notwendig. Über periodische Randbedingungen in ANSYS CFX wurde der Bezug zur realen Spaltgeometrie hergestellt. Abbildung 6 zeigt die einzelnen Arbeitsschritte, die für die Berechnung jeder Variante von Oberflächenstrukturen notwendig sind. Die Strukturgeometrie wurde mit dem CAD-Programm ProEngineer konstruiert (a). Anschließend wurde diese mit dem Programm ICEM CFD vernetzt (b). Zu beachten ist, dass aus Gründen der Übersichtlichkeit zunächst ein um den Faktor einhundert dickeres Modell erstellt und







vernetzt wird. Das fertige Netz wird schließlich wieder um denselben Faktor gestaucht. Der nächste Arbeitsschritt beinhaltet das Ansetzen der Randbedingungen in ANSYS CFX (c). Danach wird die eigentliche Rechnung gestartet. Die Ergebnisse, hier zum Beispiel die Druckverteilung, liegt zunächst für eine einzelne Struktur vor (d). Für die Darstellung der gesamten Druckverteilung im Spalt genügt eine periodische Anordnung des Einzelergebnisses. Andere Größen müssen entsprechend der Anzahl der Strukturen aufsummiert werden.



Abbildung 6 notwendige Arbeitsschritte

Bei den Berechnungen wurde ein durch die Rückförderstrukturen hervorgerufener hydrodynamischer Effekt wurde nachgewiesen. Eine Erhöhung der Drehzahl verstärkt stets die Rückförderwirkung. Alle konstruktiven Strukturparameter besitzen für jede Spaltgeometrie einen anderen optimalen Wert und müssen individuell angepasst werden.







2.1.1 Messungen mit dem Modellprüfstand

Abbildung 7 zeigt den Modellprüfstand, mit dessen Hilfe die Strömungsberechnungen überprüft werden.



Abbildung 7 Modellprüfstand

Mit dem vertikalen Verschiebetisch kann die Spalthöhe zwischen der oberen und unteren Spaltscheibe mit Hilfe eines Inkrementalmesssystems auf 0,1 µm genau eingestellt werden. Die Luftlager garantieren eine nahezu reibungsfreie Drehung beider Spaltscheiben. Während der Messungen wird die Spalthöhe mittels eines induktiven Abstandssensors überwacht, da die Luftlager unter Druckbelastung funktionsbedingt um wenige Mikrometer nachgeben.

Der Antrieb der oberen Spaltscheibe erfolgt durch einen eisenlosen Torquemotor. Dieser garantiert eine besonders gleichförmige Drehbewegung. Der Rotor des Motors sitzt direkt auf einer Hohlwelle, die im oberen Luftlager gelagert ist.







Das von der oberen Spaltstirnfläche auf die untere Spaltstirnfläche über die Flüssigkeit übertragene Reibmoment wird Hilfe eines Biegebalkensensors, der die untere Spaltscheibe abstützt, erfasst.

Das Fluid wird über eine Ringnut in den Spalt gepumpt und kann von dort aus nach innen über die Hohlwelle oder nach außen über eine Auffangrinne abfließen. Beide Fluidmengen werden gemessen und dadurch die Rückförderwirkung der jeweils eingesetzten Struktur bestimmt. Je mehr Fluid nach außen fließt, desto effektiver ist die Struktur.

Des Weiteren werden der durch die Pumpe erzeugte Druck und die Fluidtemperatur durch entsprechende Sensoren überwacht.

Alle Sensordaten werden mit Hilfe der Software LabView verarbeitet und angezeigt. Abbildung 8 zeigt die erstellte Bedienoberfläche.



Abbildung 8 Bedienoberfläche zur Datenerfassung im Programm LabView

Nach der Prüfung mehrerer Verfahren zur Herstellung von Oberflächenstrukturen hat sich folgendes bewährt: Auf eine geschliffene Stahlplatte aus austenitischem Stahl wird eine Kupferfolie mit bestimmter Dicke (z.B. 10 µm) geklebt. Anschließend wird ein lichtempfindlicher Positivlack aufgetragen. Die eigentlichen Strukturen werden nun wie bei der Fertigung von Leiterplatten mit Hilfe der Fotolithographie erzeugt. Die Stahlplatte mit der strukturierten Oberfläche wird mittels eines 50 µm starken







Transferklebers an eine Adapterscheibe befestigt, die direkt mit der Welle bzw. dem oberen Luftlager verschraubt wird.

Bei den Messungen konnte die Rückförderwirkung der Oberflächenstrukturen nachgewiesen werden. In vielen Fällen wurde der Spalt bereits vollständig hydrodynamisch nach innen abgedichtet ehe die höchste vorgesehene Drehgeschwindigkeit von 600 U/min erreicht wurde. Dies ist z.B. in der Abbildung 9 für eine Strukturhöhe von 25 µm der Fall.



Abbildung 9 Volumenstrom nach innen in Abhängigkeit von der Drehzahl und der eingesetzten Strukturhöhe







2.1.2 Vergleich der Berechnungen mit den Messungen

Abbildung 10 zeigt eine, wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, gefertigte Oberflächenstruktur und die entsprechende, mit Hilfe von ANSYS CFX ermittelte, Druckverteilung, die sich beim Einsatz dieser Struktur ausbildet. Rote Bereiche stellen hohe Drücke dar und blaue Bereiche niedrige.





Mit Hilfe Strömungssimulation wurde ein durch die aufgebrachten Strukturen hervorgerufener Fördereffekt aufgezeigt. Die zur Validierung der Ergebnisse durchgeführten Messungen am Modellprüfstand ergaben, dass der Fördereffekt in der Realität stärker war als von den Berechnungen vorausgesagt und mit steigender Drehzahl auch stärker zunimmt.

In Abbildung 11 ist die gemessene und berechnete Rückförderwirkung für eine bestimmte Oberflächenstruktur anhand des nach innen abfließenden Volumenstroms dargestellt. Es deutlich zu sehen, dass der Spalt in der Praxis bei 600 U/min bereits nach innen abgedichtet ist. Dem entgegen steht die Simulation, in der auch bei der Höchstdrehzahl noch ca. 28 % des Fluids nach innen fließen.

Das von der strukturierten Oberfläche auf die unstrukturierte Oberfläche übertragende Reibmoment ist ebenfalls stärker als berechnet.









Abbildung 11 Vergleich des berechneten mit dem gemessenen Durchfluss nach innen bei einer bestimmten Struktur

2.1.3 Ausblick

Die gewonnene Erkenntnis, dass die Rückförderwirkung stärker ist als erwartet, macht das Aufbringen von Oberflächenstrukturen auf bewegte Maschinenteile für die Praxis noch interessanter als bisher. Besonders bei Aktoren im Zentifluidbereich oder kleiner ist eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades zu erwarten. Die Wirkung der Oberflächenstrukturen ist umso größer, je kleiner die abzudichtenden Drücke und umso größer die Drehzahlen sind.







2.2 Umlaufverdränger AF 1

2.2.1 Schraubenspindelpumpe

Schraubenpumpen, die auch als Schraubenspindelpumpen bezeichnet werden, sind Pumpen mit umlaufendem Verdränger und konstantem Verdrängervolumen. Der Vortei von Schraubenpumpen ist der kontinuierliche und pulsationsfreie Förderstrom. Der konstruktive Aufbau ist relativ einfach: Zwei oder mehr Spindeln befinden sich im Eingriff und schließen das Medium zwischen den Zahnlücken und dem Gehäuse ein. Durch Drehung wird das Medium ohne Quetschen und Verwirbeln zur Druckseite gefördert. Schraubenpumpen sind grundsätzlich selbstansaugend. Sie eignen sich sowohl für nieder- als auch hochviskose Medien. Die Fertigung der Spindeln ist aufwendig, da erhebliche Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Verzahnung gestellt werden.

Wegen der speziellen Eigenschaften der Pumpe eröffnet sich ihr ein breites Anwendungsfeld sowohl in der Chemie-, Lebensmittel- und Textilindustrie als auch im Schiffbau. Serienschraubenpumpen werden mit einem Spindelaußendurchmesser ab 20 mm gefertigt. Für die pulsationsfreie Förderung kleiner Mengen, wie zum Beispiel in der Medizintechnik, sind Schraubenpumpen mit wesentlich kleinerem Abmaß geeignet. Im Forschungsvorhaben wurde eine Schraubenpumpe mit einem Spindelaußendurchmesser von 4 mm entworfen. Die Fertigung der Spindeln im Mikrobearbeitungszentrum des Instituts erfordert eine analytische Beschreibung der Zahnflanken. Die Treibspindel treibt die Nennspindel an. Dies erfordert eine Verzahnung, die den Gesetzmäßigkeiten des Verzahnungsgesetzes genügt. Beide Spindeln werden in einem Gehäuse gelagert und nach außen hin abgedichtet .

Die Verzahnung von treibender und angetriebener Spindel ist ein entscheidendes Element für die Funktion der Schraubenpumpe. An die Fertigung der Spindeln werden hohe Anforderungen bezüglich der Einhaltung enger Toleranzen gestellt. Anderenfalls würde im Betrieb ein Klemmen oder ein übermäßiger Verschleiß auftreten. Um Verschleiß vorzubeugen, ist neben der genauen Fertigung eine harte Oberfläche erforderlich. Die zulässige Größe des Spaltes zwischen Gehäuse und Spindel beziehungsweise zwischen Treib- und Nennspindel hängt von der Viskosität des Fördermediums ab. Niederviskose Medien erfordern einen kleineren Spalt, da sonst die Lässigkeitsverluste zu hoch werden. Dadurch wird der Wirkungsgrad der Pumpe erheblich herabgesetzt. Der Nennspindeldurchmesser wurde mit 4 mm festgelegt, da für Wellendurchmesser ab 2 bis 3 mm Normbauteile wie Radialwellendichtringe, Gleitlager und so weiter verfügbar sind. Beide Schraubenspindeln haben den gleichen







Außendurchmesser. Als Verzahnungsform wurde die Zykloidenverzahnung gewählt. Durch Abwälzen eines Rollkreises auf zwei gegenüberliegenden Wälzkreisen entstehen die Flankenformen.



Abbildung 12 Epizykloide (I.), Hypozykloide (r.)

Im Eingriff stehen eine Epizykloide (Aufradlinie) und die entsprechende Hypozykloide (Inradlinie), Abbildung 12. Die Vorteile der Zykloidenverzahnung liegen im geringen Verschleiß und ruhigen Lauf, weil der konvexe Außenzahn mit der konkaven Gegenflanke im Eingriff steht. Entscheidende Nachteile sind zum einem, dass die Verzahnung abstandsempfindlich ist und zum anderen, dass nicht beliebige Zahnräder kombiniert werden können, d.h. keine Zahnradeigenschaften vorhanden sind.

Der Aufbau stellt sich wie folgt da. Die einzelnen Bauteile der Schraubenpumpe, siehe Abbildung 13, sind in dem zweiteiligen Gehäuse untergebracht. Das Gehäuse nimmt die Reaktionskräfte auf. Darüber hinaus wird damit ein Austreten des Fördermediums nach außen verhindert. Auch die zwingend erforderliche Raumabtrennung innerhalb der Pumpe wird durch das Gehäuse realisiert.



Abbildung 13 Schraubenpumpe (CAD-Model, Funktionsmuster)







Das Gehäuse wird zum Deckel hin mit einem O-Ring abgedichtet. Die Abdichtung der Treibspindel nach außen erfolgt über einen eingeklebten Radialwellendichtring.

Die mechanische Kopplung der Treibspindel mit einem Motor erfolgt durch eine Elastomerkupplung. Sie wird zur spielfreien, exakten Drehmomentübertragung eingesetzt und damit Fluchtungsfehler ausgeglichen.

Die Spindeln werden radial im Gehäuse durch den Flüssigkeitsfilm abgestützt, wodurch eine separate Lagerung entfallen kann. Für die axiale Lagerung findet jeweils eine in die Stirnseite der Spindeln eingepresste Kugel Anwendung. Durch geringe Fertigungstoleranzen wird eine axiale Verschiebung von Treib- und angetriebener Spindel vermieden.

Für den motorischen Antrieb wurde ein Schrittmotor eingesetzt. Dieser Motortyp besitzt zwar den Nachteil, dass er Drehungleichförmigkeiten aufweist, wurde aber wegen der einfachen Ansteuerung für Dosierzwecke eingestellt.







2.2.2 Hubkolbenpumpe

An der Universität Rostock wurden in Zusammenarbeit mit EXIST und einem regional ansässigen Unternehmen Konzepte für eine Brennstoffförderpumpe für Fahrzeugstandheizungen erarbeitet, siehe Abbildung 15. Eine der als Studentenprojekt gestartete Konzepterarbeitung zeigte soviel Potenzial, dass sie im Rahmen dieses Forschungsvorhabens fortgesetzt worden ist. Thematisch gehört die Pumpe in das Arbeitsfeld "AF1 Umlaufverdränger", da auch sie ein geometrisch abgeschlossenes und zeitlich sich änderndes Verdrängervolumen besitzt. Das zugehörige Plattenventil und das Kugelventil lassen sich in das Arbeitsfeld "AF3 Absperrorgane und Schieber" eingliedern.

2.2.2.1 Einsatz als Dosierpumpe für Standheizgeräte

Beim Einsatz der Pumpe für eine Standheizung übernimmt diese sowohl die Förderung, als auch die Dosierung des Brennstoffes, siehe Abbildung 14. Der Brennstoff liegt in Form der üblichen Kraftstoffe im Tank von Kraftfahrzeugen vor (Benzin, Diesel, Biodiesel).



Abbildung 14 Schema Standheizung

Die Pumpe fördert und dosiert den Brennstoff aus dem Tank in den Brenner der Heizung. Um die Standheizung mit dem für die Verbrennung notwendigen Kraftstoff zu versorgen, werden in der Regel elektromagnetisch betriebene Dosierpumpen







eingesetzt. In der Standheizung wird der geförderte Kraftstoff mittels einer Venturidüse Gemischbildung erfordert einen sehr konstanten zerstäubt. Diese Art der Flammenabriss auftritt. Die bisher verwendeten Volumenstrom. damit kein Dosierpumpen arbeiten mit einer Frequenz von ca. 5 Hz und mit einem separaten Pulsationsdämpfer, was dennoch einen diskontinuierlichen Volumenstrom zur Folge hat, wodurch die Abgaswerte der Standheizung stark verschlechtert werden. Wichtig für die Funktion des Brenners ist dementsprechend eine kontinuierliche Zuführung des Brennstoffs. Da sich Kolbenpumpen bedingt durch ihren abgeschlossenen Förderraum für Dosierzwecke anbieten, wurde dieses Förderprinzip weiterverfolgt. Ziel war es bei einer Förderfrequenz von 50 Hz einen Volumenstrom von 630 ml/h zu erzeugen. Durch die anderen geforderten Randbedingungen wie dem Ansaugunterdruck von mind. 0,3 bar, dem Gegendruck von 4 bar, der max. elektr. Leistungsaufnahme von 3 W, der Medienbeständigkeit und einem Temperaturbereich von -40 bis 80 °C, bewegt sich diese Pumpe in einem Bereich mit engen physikalischen Grenzen. Die entwickelte Pumpe erzeugt durch ihre Doppelhubcharakteristik einen nahezu unterbrechungsfreien Förderstrom, da sie sowohl beim Vor-, als auch beim Rückhub das gleiche Volumen fördert.

Die Neuentwicklung fördert den Kraftstoff mit 50 Hz, obwohl die Pumpe selbst nur mit 25 Hz betrieben wird, was sich auch positiv auf die Lebensdauer auswirkt. Der Volumenstrom ist dadurch kontinuierlicher als bei der bisher verwendeten Dosierpumpe. Aufgrund der vergleichsweise hohen Förderfrequenz der Pumpe und dem dadurch sehr kleinen Fördervolumen pro Hub, ist das Selbstansaugen schwierig. Um das Selbstansaugverhalten der Pumpe zu verbessern, ist ein neuartiges Plattenventil entwickelt und an der Saugseite der Pumpe eingesetzt worden. Dieses Ventil zeichnet sich durch eine hohe Eigenfrequenz wegen seiner geringeren bewegten Masse aus und hat ein geringeres Totvolumen im Vergleich zum Zweiten, im Kolben eingebauten Kugelventil.









Abbildung 15 Dosierpumpe

2.2.2.2 Funktionsweise und Aufbau

Bei der betrachteten Pumpe handelt es sich um eine elektromagnetisch betreibbare Dosierpumpe. Das Funktionsschema ist in Abbildung 16 aufgezeigt. Der nahezu unterbrechungsfreie Förderstrom wird durch die Verwendung eines Stufenkolbens (3) erreicht, der durch die unterschiedliche Größe der Hubräume auf der Druck- (1) und Saugseite (2) gekennzeichnet ist. Der Kolben dient neben der Förderung des Kraftstoffes auch als Anker eines Elektromagneten. Somit kann bei der Abwärtsbewegung des Stufenkolbens das kleinere, druckseitige Hubvolumen durch eine Ausströmöffnung (4) im Gehäuse gedrückt und gleichzeitig mit der anderen größeren Seite des Stufenkolbens das Medium über das Einlassventil (5) angesaugt werden. Bei der Aufwärtsbewegung des Stufenkolbens wird mit dem größeren, saugseitigem Hubvolumen, durch eine Bohrung im Kolben, zum einem das kleinere, druckseitige Hubvolumen aufgefüllt und die zweite Hälfte des Hubvolumen durch die Ausströmöffnung (4) gefördert. Die Strömungsvorgänge werden zwangsweise über Ventile gesteuert. Verhalten sich die Hubvolumen bzw. Querschnittsflächen der Kolben von Saug- und Druckseite unter Beachtung des Federvolumens wie 2:1, so ist der Förderstrom im Mittel bei beiden Bewegungsrichtungen nahezu gleich.









Abbildung 16 Pumpenschema

2.2.2.3 Funktionsmuster und Messungen

Im Rahmen des Projektes wurden in mehreren Iterationsstufen weiterentwickelte Funktionsmuster gefertigt und hinsichtlich ihrer Funktion untersucht. Für die Funktion der Pumpe ist die Bewegung des Kolbens die wichtigste Einflussgröße. Die Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse einer durchgeführten Messung. Mittels des Laservibrometers wurde die Kolbengeschwindigkeit gemessen. Die Konstruktion der Pumpe wurde dafür so modifiziert, dass es möglich war, den Laserstrahl durch die Auslassöffnung auf den Kolben auszurichten. Durch Integration der gemessenen Geschwindigkeit wurde der Weg ermittelt. Neben der Geschwindigkeit wurden parallel auch das Ansteuersignal, der Strom und die Spannung aufgezeichnet. Durch diese zusätzlichen Messwerte lässt sich die elektrische Leistungsaufnahme berechnen, die unter einem vorgegebenem Niveau liegen muss. In Verbindung mit dem Ansteuersignal, lassen sich die Zeitkonstanten für die Kolbenbewegung ermitteln. So konnte die zeitliche Verzögerung zwischen dem Stromfluss und der einsetzenden Kolbenbewegung ermittelt werden. Gleiches gilt für das Abschalten. Die Zeitkonstanten charakterisieren den magnetischen Kreis und dessen Auslegung. Zusätzlich kann die maximale Ansteuerfrequenz bestimmt werden, bei der der Kolben noch komplette Hübe ausführt.









Abbildung 17 Messergebnisse Dosierpumpe

Für die Überprüfung der fluidischen Eigenschaften wie Volumenstrom, Förderdruck und Ansaugdruck wurde ein Prüflabor aufgebaut, siehe Abbildung 18. Der Prüfstand besitzt Drucksensoren und Temperatursensoren auf beiden Seiten des Aktors. Für die Messung des Volumenstroms wird ein Massenstrommesser nach dem Coriolisprinzip eingesetzt. Der Vordruck kann in einem Bereich von -0,8 bis 4 bar variiert werden. Auf der Druckseite ist eine motorisch angetriebene Feindrossel für die Einstellung des Gegendrucks verbaut.

Die relevanten Kenngrößen der fluidischen Aktoren wie Volumenstrom, Druck und Wirkungsgrad sind im hohen Maße von der Temperatur der Fluide abhängig. Bei dem typischerweise kleinen Volumenstrom der verwendeten fluidischen Aktoren kann davon ausgegangen werden, dass der über das Fluid eingebrachte Wärmestrom deutlich geringer ist als der, der über das Gehäuse durch die Umgebung ab und zufließt. Durch die über die Temperatur einstellbaren Viskosität der Flüssigkeit können die Aktoren mit dem gleichen Testfluid, aber mit unterschiedlichen Viskositäten untersucht, d.h. der Viskositätseinfluss auf das Verhalten der Aktoren ermittelt werden.

Um den Temperatureinfluss ermitteln bzw. ausschließen zu können, ist das Prüffeld in einen Klimaschrank untergebracht worden.









Abbildung 18 Prüffeld für kleine fluidische Aktoren

Die Abbildung 19 zeigt beispielhaft eine aufgenommene Kennlinie der Dosierpumpe. Dargestellt ist der Volumenstrom in Abhängigkeit vom Gegendruck. Die Pumpe wurde über den gesamten Bereich mit derselben Frequenz angesteuert. Charakteristisch für diesen Entwicklungsstand der Pumpe ist das relativ starke Abfallen des Volumenstroms bis zu einem Gegendruckbereich von ca. 0,5 bar, dies ist auf das verbaute Plattenventil zurückzuführen. Ein unvorgespanntes Plattenventil benötigt für eine korrekte Abdichtung eine gewisse Druckdifferenz am Ventil. In einem Bereich von ca. 0,5 bis 5 bar bleibt der geförderte Volumenstrom relativ konstant, hat aber die Tendenz abzusinken. Erst ab einem Druck von 5,3 bar beginnt der Volumenstrom stärker abzufallen. Die hohe Gleichförmigkeit des Volumenstroms bei sich änderndem Druck ermöglicht den Einsatz der Pumpe für die im Vorfeld genannte Anwendung.









Abbildung 19 Gegendruckvariation

2.2.2.4 Plattenventil AF 3

Für die beschrieben Hubkolbenpumpe wird für das saugseitige Ventil ein spezielles Plattenventil verwendet. Dieses druckgesteuerte Ventil zeichnet sich dadurch aus, dass es keine Vorspannung wie ein herkömmliches Kugelventil besitzt. Es öffnet und schließt sich schon bei sehr kleinen Druckdifferenzen. Die Stege übernehmen daher nur die Funktion der Lagerung und der Rückstellung des flachen Ventilkörpers. Bedingt durch diese Bauweise besitzt dieses Ventil ein sehr gutes Ansprechverhalten. Zusätzlich bedarf es nur eines sehr kleinen Bauraums im Verhältnis zu einem Kugelventil.

Die Geometrie der Ventilstege, siehe Abbildung 20, ist für die Funktion, im speziellen für die Hubbewegung, ausschlaggebend. Die Eigenschaften des Ventils können über die Festlegung der Geometrie positiv beeinflusst werden. Neben der Geometrie kann natürlich auch der Werkstoff bzw. die Materialstärke variiert werden. Die möglichen Maßnahmen zur Beeinflussung der Funktion des Ventils wurden betrachtet und auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft. Die Untersuchung wurde zum einen per Simulation und zum anderen in Versuchen vorgenommen.









Abbildung 20 Variation der Ventilgeometrie

Bei der Simulation wurde der kreisrunde, mittige Ventilkörper mit unterschiedlichen Kräften beaufschlagt. Die Kräfte entstehen am realen Ventil durch die Druckunterschiede bezogen auf die Ventilkörperfläche auf der Druck- und Saugseite. Als Ergebnis der Simulation stehen die Verschiebungen, siehe Abbildung 21 und Spannungen der Ventilmimik zur Verfügung. So kann im Vorfeld festgestellt werden, ob zum Beispiel die maximal zulässigen Spannungen bei Belastung überschritten werden.



Abbildung 21 FEM-Simulation (Verschiebung)







Die Simulationsergebnisse wurden durch Messungen am realen Ventil überprüft bzw. die FEM-Ergebnisse per Parameteränderung an die Messungen angepasst. Hierbei wurde der Ventilkörper mit einer entsprechenden Kraft belastet und die Auslenkung mittels eines Laser-Triangulationssensors gemessen. Der Messaufbau und das Messprinzip ist in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22 Messaufbau und Funktionsweise des Triangulationssensors

Die Auslenkungen des Ventilkörpers wurden bei unterschiedlichen Belastungen gemessen. Auf diese Art wurden Kennlinien für die realen Ventile ermittelt, die mit den Simulationsergebnissen verglichen werden konnten. In Abbildung 23 ist ein Vergleich zwischen Messung und Simulation im Diagramm zu sehen.









Abbildung 23 Vergleich Messung und Simulation

Es ist klar zu erkennen, dass der Simulationswert, der mit einem Elastizitätsmodul von E = 130 000 N/mm^2 vom Hersteller angegeben war, vom realen Bauteil abweicht. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen sind durch das Laserschneiden die Stege schmaler als die Sollbreite. Dementsprechend sind diese bei der Simulation etwas breiter aufgeführt. Zum anderen ergeben sich durch das Laserschneiden Änderungen im Werkstoffgefüge, was zur Verminderung des E-Moduls führt. Durch die Anpassung des E-Moduls auf einen Wert von 108 000 N/mm^2 stimmen die Ergebnisse aus Messung und Simulation gut überein. Durch diese Korrektur war es möglich, die Ventile bereits per Simulation realitätsgetreu auszulegen.

Lebensdauer der Ventile

Es gibt für diese Ventile keine Erfahrungen hinsichtlich der Lebensdauer. Die mit einer Stegbreite von rund 0,1 mm recht filigran ausgeführte Ventilkörperaufhängung ist bei diesem Ventil eine potentielle Schwachstelle in Hinblick auf die Lebensdauer. Für diese Art von Pumpen wird eine Mindestlebensdauer von rund 3000 Stunden erwartet. Bei der angestrebten Betätigungsfrequenz von 25 Hz entspricht das einer







Lastwechselanzahl von 270 Millionen. Für die Lebensdauerberechnung kommt unter anderem die Wöhlerkurve zum Einsatz. Mit einem Wöhlerversuch wird die Schwingfestigkeit von Werkstoffen oder Bauteilen ermittelt. Hierfür werden die Versuchskörper zyklisch, meistens unter einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, belastet. Die Lastamplituden sowie das Spannungsverhältnis aus Unterlast zu Oberlast sind konstant.

Zur Ermittlung der Werte werden die Versuchskörper auf mehreren Lasthorizonten geprüft. Der Versuch läuft, bis ein definiertes Versagen eintritt oder eine festgelegte Grenzschwingspielzahl erreicht wird. Versuchskörper, die die Grenzschwingspielzahl ohne erkennbares Versagen erreichen, werden als Durchläufer bezeichnet.





Die Ergebnisse des Versuchs werden in ein doppellogarithmisches Diagramm eingetragen. Üblicherweise wird im Wöhlerdiagramm die Nennspannungsamplitude S_a über der ertragbaren Schwingspielzahl aufgetragen. Den sich ergebenden Kurvenzug bezeichnet man als die Wöhlerkurve oder auch Wöhlerlinie. Abbildung 24 stellt eine solche Wöhlerkurve dar, die sich in unterschiedliche Bereiche einteilen lässt:

Der Bereich der Kurzzeitfestigkeit bzw. Kurzzeitschwingfestigkeit K (auch LCF = Low-Cycle-Fatigue) liegt unterhalb von 10^4 bis 10^5 Schwingspielen. Die Belastung führt







innerhalb von einem viertel Schwingspiel zum Bruch. Hier wird von einer statischen Festigkeit gesprochen.

Der Bereich der Zeitfestigkeit bzw. Zeitschwingfestigkeit Z befindet sich zwischen 10⁴ und materialabhängig etwa 10⁶ bis 10⁸ Schwingspielen. In diesem Bereich verläuft die Wöhlerkurve bei doppellogarithmischer Darstellung nahezu gerade. Der Bereich von über 10⁸ Schwingspielen wird als Dauerfestigkeit D bezeichnet.

Unterhalb der Dauerfestigkeit S_{aD} kann ein Bauteil prinzipiell beliebig viele Schwingspiele ertragen. Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit bewirken nach einer bestimmten Zahl an Schwingspielen ein Versagen des Bauteils.

Ansys liefert, die in Abbildung 25 dargestellte Verteilung der Spannungen im Ventil. Hier wird deutlich, dass die Spannungen in der Kreisscheibe in der Mitte des Ventils am geringsten sind. Sie betragen dort zwischen 0,500977 N/mm² und 25,811 N/mm². Die maximalen Spannungen treten am Rand des Klappmechanismus auf und erreichten einen Wert von 228,295 N/mm².



Abbildung 25 Darstellung der auftretenden Spannungen am Ventil mit Ansys







Der Ablesepunkt im Wöhlerdiagramm für Beryliumbronze mit der max. Spannung von 228,295 N/mm^2 und der Lastspielzahl ein Wert von $2,7 \cdot 10^8$ liegt unterhalb der Dauerfestigkeitslinie. Für das Plattenventil bedeutet das, dass es die vorgegebene Belastung mehr als 3000 Arbeitsstunden ohne Versagen erträgt.

Für eine Überprüfung der theoretischen Lebensdauerbetrachtung wurde ein Prüffeld aufgebaut, siehe Abbildung 26. Die mechanische Belastung, also die axiale Verschiebung des Ventilkörpers, wird am realen Ventil aufgebracht. Die Wiederholfrequenz von 25 Hz entspricht der Frequenz beim Einsatz des Ventils in der realen Pumpe. Als Stellantrieb für die Bewegung des Ventilkörpers werden elektromagnetische Hubmagneten verwendet. Diese eignen sich hierfür gut, da der Hub nur 0,1 mm beträgt und die erforderliche Kraft gering ist. Die Ansteuerung der Hubmagnete erfolgte über einen Mikrokontroller mit entsprechendem Leistungsausgang. Die Ansteuerfrequenz und die Lastspielzahlen lassen sich über eine grafische Bedienoberfläche am PC vorgeben. Für eine höhere statistische Sicherheit wurden 5 Ventile parallel geprüft. Auch bei der so nachgestellten Belastung der Ventile konnte kein Bauteilversagen durch Bruch oder bleibende Verformung festgestellt werden.



Abbildung 26 Prüffeld Ventillebensdauer







2.2.2.5 Magnetkreis

Die Dosierpumpe wird elektromagnetisch angetrieben. Die von der Ansteuerung erzeugten elektrischen Impulse werden in mechanische Energie umgewandelt. Die Bewegung des Kolbens bewirkt schlussendlich die Förderung. Durch die Wahl der Ansteuerfrequenz lässt sich der geförderte Volumenstrom gezielt einstellen.

Der für die Förderung notwendige Kolben ist gleichzeitig als magnetischer Anker ausgeführt. Der Vorteil liegt bei der Reduzierung der bewegten Massen durch den Entfall eines separaten Ankers. Die Massenreduzierung hat in Bezug auf die gewünschte hohe Förderfrequenz einen positiven Einfluss. Nachteilig wirkt sich die funktionale Vereinigung des Ankers und des Kolbens auf die erreichbare magnetische Kraft aus. Durch die erforderlichen kleinen Kolbendurchmesser fallen die magnetisch wirksamen Flächen ebenfalls klein aus.

Die magnetische Kraft hat einen entscheidenden Einfluss auf die Funktion der Pumpe. Sie realisiert die Bewegung des Kolbens in Verbindung mit der verbundenen Spannung der Feder, welche den Rückhub bewirkt. Die Größe der magnetischen Kraft ist ausschlaggebend für den erreichbaren Förderdruck und die Förderfrequenz.

Für die Optimierung des magnetischen Kreises wurde dieser mittels FEM analysiert. Die Entwicklungsschritte konnten so zielgerichtet durchgeführt werden. Exemplarisch sind die folgenden Bilder aufgezeigt. Bei den Bildern handelt es sich um Ergebnisse einer FEM-Analyse von zwei Pumpenvarianten. Die Analyse konnte auf Grund der Symmetrie der Pumpe auf ein axialsymmetrisches Modell (y-Achse) begrenzt werden. Die jeweils linke Abbildung entspricht der vorherigen Entwicklungsstufe.

Ziel bei der Untersuchung der magnetischen Flussdichte ist es, lokale Maxima zu reduzieren und so eine homogenere Verteilung zu erreichen. Die magnetischen Werkstoffe zeigen alle ein Sättigungsverhalten, d.h. sie verhalten sich ab einer bestimmten magnetischen Feldstärke nicht mehr linear. Sie gehen gegen den Maximalwert für die Flussdichte derSättigung. Dem Magnetkreis sind durch diesen Fakt Grenzen gesetzt.









Abbildung 27 Magnetische Flussdichte

Die Flussdichte bezieht sich auf eine repräsentative Fläche. Durch die lokale Anderung von Querschnitten lässt sich so eine bessere Verteilung erzielen. Die in Abbildung 27 magnetischen Flussdichte dargestellte Verteilung der zeigt eine deutliche Verbesserung in Hinblick auf die Reduzierung von lokalen Maximas nach der Untersuchung. Durch eine Umgestaltung der Kolbenfeder konnte der Kolben im oberen Bereich nunmehr massiver ausgeführt werden. Durch die Erhöhung der wirksamen Querschnitte, wurde die Flussdichte in diesem Bereich reduziert. Unter Berücksichtigung des Sättigungsverhaltens kann der Magnetkreis nach der Optimierung deutlich mehr Energie übertragen bzw. eine höhere magnetische Kraft erzeugen.



Abbildung 28 Magnetische Felddichte

Einen ebenso positiven Einfluss hat die geometrische Änderung des oberen Kolbenbereichs auf die magnetische Felddichte. Diese fällt im oberen Luftspalt zwischen Kolben und Joch deutlich homogener aus, siehe Abbildung 28. Der Luftspalt ist der eigentliche Ort der Kraftentstehung. Die Magnetfeldlinien haben das Bestreben







sich dem Verlauf des geringsten magnetischen Widerstandes anzupassen. Der Luftspalt hat einen deutlich größeren magnetischen Widerstand als der restliche Teil des Magnetkreises, der aus einem weichmagnetischen Werkstoff besteht. Als Resultat wird der Kolben in den Luftspalt gezogen, bis dieser nicht mehr vorhanden ist. Dies entspricht dann dem Zustand des geringsten magnetischen Widerstandes im Magnetkreis.

Die entstehende Kraft ist proportional zur Querschnittsfläche. In diesem Fall ist dies die obere Kolbenfläche. Durch die Vergrößerung der Fläche, was durch den Wegfall der Kolbenfeder möglich wurde, konnte die Kraft deutlich erhöht werden. Durch die gleichmäßigere Verteilung des Feldes im Luftspalt ist auch die durchschnittliche magnetische Feldstärke größer geworden, wodurch wiederum die erreichbare Kraft gestiegen ist.



Abbildung 29 Magnetische Feldlinien

In der oberen Abbildung ist der Verlauf der Feldlinien ersichtlich. Auch hier zeigt sich die positive Auswirkung der Änderung des oberen Kolbenbereichs. Die Feldlinien verteilen sich nach der Umgestaltung homogener. Dies spiegelt sich in der Darstellung der magnetischen Flussdichte wieder, siehe Abbildung 27. Dort wo die Feldlinien dichter aneinander liegen, ist auch die Flussdichte höher.

Die Resultate der Simulation flossen in die Neukonstruktion eines Funktionsmusters ein. Dieses zeigte hinsichtlich der Dynamik (Förderfrequenz) und des erreichbaren Gegendrucks deutliche Verbesserungen. Die Begründung liegt in der Steigerung der magnetischen Kraft um 111% bei verminderter elektrischer Leistungsaufnahme. Die Verringerung der elektrischen Leistungsaufnahme konnte durch das spätere erreichen der Sättigung des Magnetkreises erreicht werden. Vorher ging der Magnetkreis







deutlich früher in den Zustand der Sättigung über. Die optimierte Variante hat noch immer Reserven.

Am Funktionsmuster wurde die magnetische Kolbenkraft gemessen. Beispielhaft ist der Kraftverlauf über dem Lüftspalt in Abbildung 30 dargestellt. Hierbei handelt es sich um eine quasistatische Messung, bei der der Kolben langsam in Richtung Joch verfahren wurde. Die angelegte Spulenspannung betrug 8 V. Es stellte sich durch den ohmschen Widerstand der Spule ein Strom von 1,9 A ein. Begründet durch die Induktivität der Spule fließt bei der impulsartigen Ansteuerung der Pumpe nicht sofort der volle Strom durch die Spule, siehe auch Abbildung 17. Dementsprechend geringer fällt auch der magnetische Fluss aus, was zur Verringerung der Kraft im Einschaltzeitpunkt führt.



Abbildung 30 Magnetische Kolbenkraft

Das gezeigte Diagramm stellt somit die maximal erreichbare Kraft in Abhängigkeit vom Luftspalt dar, da der Strom bei dieser Messung als konstant anzunehmen ist.







2.3 Druckwellenausbreitungspumpen AF 2

2.3.1 Technische Ausstattung

Die im Vorfeld gewonnenen Ergebnisse im Bereich der Druckwellenausbreitungspumpen wurden aufgegriffen und weiter umgesetzt. Bei diesen Pumpen werden piezoelektrische Aktoren eingesetzt. Es gibt piezokeramische Wandler in verschiedenen Formen und Größen. Hier wurden vorzugsweise Röhrchen eingesetzt. Die Wandler werden mit einer Hochspannung mit bis zu 300 V versorgt und wandeln diese in eine mechanische Bewegung um. Durch das Funktionsprinzip der Wellenausbreitung und bedingt durch die kurzen zurückgelegten Wege der Schallwellen sind für die Ansteuerung Frequenzen im kHz-Bereich erforderlich. Für diese hohe Dynamik sind spezielle Verstärker erforderlich. Es wurden 3 unabhängige 2-Kanal-Verstärker im Rahmen dieses Projektes konzeptioniert und aufgebaut, siehe Abbildung 31 (a). Das von einem Funktionsgenerator erzeugte Eingangssignal kann mit einem konstanten Verstärkungsfaktor auf Pegel von bis zu ± 300 V verstärkt werden. Dabei werden Spitzenumladeströme von bis zu 2 A bereitgestellt. Die Verstärker zeichnen sich durch einen großen Frequenzbereich von 0 bis 200 kHz und einer Slew Rate von 200 V/ μ s bei einem Eingangsspannungsbereich von \pm 5 V aus.



Abbildung 31 Piezotechnische Ausrüstung







2.3.2 Prinzipien

Bei der einen Pumpe sollen durch die Schallwellen kleine Tröpfchen an einer Ausgangsdüse abgelöst werden. Das Prinzip entspricht dem von herkömmlichen Tintenstrahldruckköpfen, hier werden aber deutlich größere Tropfen erzeugt. Wichtig an dieser Stelle ist die Beobachtung des Düsenausganges, um das Verhalten des Tropfengenerators beurteilen zu können. Durch die in Abbildung 31 (b) aufgebaute Blitzsteuerung ist es in Verbindung mit einer starken schnell schaltenden Lichtquelle möglich die Tropfenentstehung und –ablösung mittels einer getriggerten Kamera optisch zu erfassen.

Bei dem anderen betrachteten Funktionsprinzip handelt es sich um eine peristaltische Pumpe. So eine Pumpe besteht aus mindestens 3 piezoelektrischen Aktoren, die seriell hinter einander geschalten werden, siehe Abbildung 32. Die Aktoren sind axialsymmetrisch um ein Röhrchen angeordnet und liegen an diesem an. Durch die gezielte Ansteuerung jedes einzelnen Aktors ist es möglich durch die Überlagerung der entstehenden Druckwellen Druckunterschiede im Röhrchen zu erzeugen, die schlussendlich zu einer gerichteten Förderung des im Röhrchen befindlichen Mediums führen. Die Ansteuerung aller Aktoren muss hierbei phasenverschoben und synchron erfolgen. Hierfür dienen 3 modifizierte Funktionsgeneratoren, siehe Abbildung 31 (c). Es Phasenverschiebungen, die Wiederholfrequenz können die und die Ansteuerfunktionen mittels eines PC frei definiert werden. Die so erzeugten Signale werden dann mittels der 3 Piezoverstärker verstärkt und auf die Aktoren übertragen.



Abbildung 32 Peristaltische Pumpe







2.3.3 Beschreibung, Konstruktion und Simulation des Tropfengenerators

Untersuchung der Aktoren

Die piezoelektrischen Aktoren, siehe Abbildung 33 (a), haben auf die Funktion des Tropfengenerators den größten Einfluss und bedurften daher einer genaueren Untersuchung. Betrachtet wurde die Verformung des Röhrchens bei unterschiedlichen elektrischen Spannungen. Die Verformungen wurden zum einen mittels der beiden Laservibrometer, siehe Messschema Abbildung 33 (b) und zum anderen per Simulation bestimmt und abschließend verglichen.



Abbildung 33 Piezoröhrchen und Messschema

Die Simulationsberechnungen erfolgten mittels des Programms "Ansys", hier wurde ein Modell des Piezoröhrchens erstellt. Mit dem Vergleich von Messung und Simulation sollte gleichzeitig geklärt werden, ob für weiterführende Arbeiten mit diesem Piezoröhrchen auf die mit Simulationen gewonnenen Erkenntnisse zurückgegriffen werden kann.

Für die Modellbildung wurden die vom Hersteller PI Ceramic für das Piezoröhrchen PT130.01 angegebenen Daten genutzt. Simuliert wurde nur die Keramik des Röhrchens, die mit einem statischen elektrischen Potential beaufschlagt wurde. Die Oberfläche der Innenseite des Röhrchens inklusive der ringförmigen Stirnfläche und dem 3mm breiten Ring der Umkontaktierung wurde mit dem Nullpotential verbunden,







die Oberfläche der Außenelektrode ab 4mm bis zum Ende des Röhrchens mit der positiven bzw. negativen Spannung. Die Beschichtung der Keramik mit dem Silberelektrodenmaterial wurde auf Grund der sehr kleinen Schichtdicken vernachlässigt. Zur Modellbildung wurde die radiale Querschnittsfläche über der Länge zweidimensional nachgebildet, da hier eine Rotationssymmetrie vorliegt. Die Querschnittfläche wurde radial mit 4 Knoten, die in einem Abstand von ca. 1,67mm lagen, und in Längsrichtung mit 76 Knoten im Abstand von 0,4mm belegt. Diese insgesamt 304 Knoten wurden miteinander vernetzt. Die Lage des Koordinatensystems wurde auf der Rotationsachse des Röhrchens an dessen Ende mit dem Umkontaktierungsbereich gewählt. Daher war mit dem vereinfachten 2D-Modell durch die Vorgabe der rotationssymmetrischen Eigenschaften eine Auswertung für das dreidimensionale Röhrchen möglich. Als Randbedingung wurde eine einseitige Einspannung an der Seite der Umkontaktierung gewählt. An diesem Ende war, durch die auf beiden Seiten vorhandene gleiche Elektrode, kein elektrisches Potential gegeben. Dies ist auch der Grund für die kaum vorhandene Aufweitung in diesem Bereich. Für das andere Ende der Elektrode wurde ein freies Ende gewählt, um die Ausdehnung des Röhrchens nicht zu beeinflussen. Die Werte für die Materialeigenschaften mussten für "Ansys" angepasst werden. Da die Umrechnungen bereits bei früheren Simulationsrechnungen durchgeführt wurden, konnte auf diese Werte zurückgegriffen werden.

Die Spannungswerte, mit denen das Röhrchen in der Simulation beaufschlagt wurde, entsprechen denen bei den Lasermessungen. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte in grafischer Form als Diagramm, siehe Abbildung 34, und in der 3D-Darstellung des Röhrchens, an deren Farbverläufen zum Beispiel die Verschiebungen, siehe Abbildung 35, und die elektrischen Potentiale, siehe Abbildung 36, veranschaulicht worden sind.









Abbildung 34 Vergleich Messung und Simulation

Im generellen stimmen die Messungen mit den Simulationsergebnissen gut überein. Die bei den Messungen vorhandenen Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Graphen ab einer Röhrchenlänge von 10 mm sind auf Inhomogenitäten der Oberfläche und des Materials der Röhrchen zurückzuführen. Diese werden bei der Simulation nicht mit berücksichtigt. Leichte Abweichungen treten bei der maximalen Aufweitungen auf. Diese Abweichungen lassen sich aber durch Korrekturfaktoren bei der Simulation ausgleichen. Insgesamt ist die Simulation geeignet um das Verhalten der Aktoren zu beschreiben.



Abbildung 35 FEM-Darstelung der Verschiebungen

Die dreidimensionalen Darstellungen der Ergebnisse der Simulationsrechnung für das Aufweitungsverhalten des Piezoröhrchens ergaben, dass sich das Röhrchen in dem







Bereich der Umkontaktierung (oben rechts in den Abbildungen) nicht aufweitet. In dem Bereich, in welchem beide Elektroden ein Potential in das Material einleiten, reagiert die Keramik mit einer konstanten Aufweitung. Der ringförmige Bereich des Röhrchens, der beide Elektroden voneinander trennt, stellt einen Übergangsbereich zwischen dem unverformten und dem verformten Bereich dar.



Abbildung 36 FEM-Darstellung der elektr. Potentiale

Die Abweichung zum realen Bauteil wird auch bei der Darstellung der elektrischen Potentiale ersichtlich. Abbildung 36 zeigt sehr homogene Spannungspotentiale. Bei den vorhandenen Röhrchen entstehen durch die aufgebrachten Silberkontaktierungen Abweichungen von der Simulation. Bedingt durch die unterschiedlichen elektrischen Widerstände im Bereich der Kontaktierungen, ergeben sich im Kontaktmaterial bereits Spannungsabfälle. Dies führt dazu, dass die elektrische Spannungsverteilung auf der Oberfläche bereits Inhomogenitäten aufweist. Die Folge ist eine unterschiedliche Aufweitung über die Länge des Röhrchens.

Funktionsbeschreibung und Aufbau des Tropfengenerators

Der Aufbau ist in der Abbildung 39 dargestellt. Mit dem im inneren liegenden Kern bildet das Piezoröhrchen einen konzentrischen Ringraum für das Fluid. Das rechte Ende ist als ein akustisch offenes Ende ausgeführt. Auf der linken Seite befindet sich die Düse mit der Austrittsöffnung. Das Röhrchen wird elektrisch kontaktiert, damit die Spannung zugeführt werden kann.







Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 37 schematisch dargestellt. In (a) ist die Ausgangslage gezeigt. Im Zustand (b) wird das Piezoröhrchen so mit Spannung versorgt, dass es sich aufweitet. Durch die schlagartige Aufweitung entsteht im konzentrischen Ringraum eine Unterdruckwelle, die sich von der Mitte aus in beide Richtungen ausbreitet. Die Unterdruckwelle wird am offenen Ende auf der rechten Seite reflektiert und läuft als Überdruckwelle in Richtung Mitte zurück. Die nach links laufende Unterdruckwelle läuft in der Düse aus. Diese Phase ist in (c) ersichtlich. Wenn die am offenen Ende entstandene Überdruckwelle die Mitte erreicht hat (d), wird die elektrische Spannungszuführung am Röhrchen unterbrochen bzw. umgepolt. Dadurch kommt es zum Zusammenziehen des Röhrchens. Es entsteht ein Überdruck, der sich mit dem rücklaufendenden Überdruck in der Mitte des Röhrchens überlagert. Diese Überdruckwelle läuft wiederum in beide Richtungen (f). Nur die in Richtung Düse laufende Überdruckwelle wird weiterbetrachtet, da nur diese zur Tropfenablösung führt. Die Überdruckwelle wird in der Düse gebündelt (g) und trifft auf die Ausgangsbohrung. Die dort auftreffende Energie ist so stark, dass die Oberflächenkraft der Flüssigkeit überwunden wird und als Ergebnis ein Tropfen abgeschleudert wird.



Abbildung 37 Funktionsschema Tropfengenerator

Der eigentliche Ort der Tropfenentstehung ist die Ausgangsbohrung von der Düse mit einem Durchmesser von 50 µm. Im speziellen ist die zeitliche Druckänderung in diesem Bereich ausschalggebend für die Funktion. Für vorherige Untersuchungen wurden FEM-Simulationen angestellt. Es wurde ein Modell der Pumpe aufgestellt, welches den Aktor, den Kern, die Düse und das Reservoir beinhaltet. Die gegebenen Randbedingungen wurden integriert. Die Berechnung erfolgte über einen gewissen







Zeitbereich. Das Ergebnis in Form eines Diagramms ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.



Abbildung 38 Druckverlauf im Düsenbereich

Zu Beginn ist die einlaufende Unterdruckwelle für das Absinken des Druckes verantwortlich. Anschließend steigt zunächst der Druck durch die Reflektion der Unterdruckwelle am offenen Rohrende. Bedingt durch das Zusammenziehen des Röhrchens erhöht sich der Druck nochmals schlagartig, was zur Tropfenablösung führt. Der nachfolgende Druckverlauf resultiert aus dem akustischen Nachschwingen innerhalb des Röhrchens und klingt mit der Zeit ab.

Die entwickelte Konstruktion ist in Abbildung 39 dargestellt. Im CAD-Schnitt sind die einzelnen Komponenten gezeigt. Auf die folgenden Elemente soll näher eingegangen werden. Die Düse (1) dient neben der Bündelung der Druckwellen und der Tropfenablösung auch der Aufnahme vom Piezoröhrchen (3) und des innenliegenden Kernes (4). Das Röhrchen wird an der Lagerstelle in der Düse nach außen abgedichtet. Die elektrische Kontaktierung des Röhrchens erfolgt durch zwei elektrisch voneinander isolierten und elektrisch leitenden Elastomeren (5), die im hinteren Gehäuse (6) in das Reservoir integriert sind. Der Vorteil der Elastomere besteht darin, dass sich diese der Bewegung des piezoelektrischen Aktors anpassen können. Für das empfindliche Röhrchen ist es wichtig, dass dieses spannungsfrei eingebaut ist. Dieser Anforderung entspricht die elastische Kontaktierung. Neben der radialen







Aufweitung erfolgt zusätzlich eine Verschiebung in axialer Richtung. Aufgrund dieser Bewegung darf das Röhrchen nicht in axialer Richtung starr eingespannt sein. Für die erforderliche quasistatische thermische Verschiebung der Lagerstellen des Röhrchens wurden das Düseteil und das restliche Gehäuse über einen Wellbalg mit geringer Federsteifigkeit verbunden. Im rechten Teil der Abbildung 39 ist ein Bild des Funktionsmusters ersichtlich. Vor mechanischer Beschädigung der Düse, des Piezoröhrchens und des Wellbalges schützt ein am Gehäuse befestigtes Plexiglasrohr.



Abbildung 39 Tropfengenerator, CAD Modell und Funktionsmuster







3. Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden.

4. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Teilergebnisse des Forschungsvorhabens konnten bereits auf verschiedenen öffentlichen Veranstaltungen vorgestellt werden. Dies waren:

- Venturesail 2004 (Teilnahme als Forscherteam, keine Prämierung)
- Venturesail 2005 (5. Platz und 30.000 € als Gründerteam)
- Venturesail 2006 (5.Platz und 15. 000 € als Forscherteam)
- Kongress "Innovation durch Kooperation" 2005, Stuttgart
- Messe f-cell 2005, Stuttgart
- Kontaktbörse "Wissen schafft Wirtschaft" 2005 und 2006, Rostock
- Innovationswoche "Im Osten viel Neues!" 2006, Berlin

Eine Veröffentlichung in der Fachzeitschrift O+P wurde eingereicht.