

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5986

**Entwicklung eines
LIGA-Mikrosystems zur
Messung mechanischer
Eigenschaften von
Mikroproben**

P. Ruther, W. Bacher, K. Feit
Institut für Mikrostrukturtechnik

August 1997

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 5986

Entwicklung eines LIGA-Mikrosystems zur Messung mechanischer Eigenschaften von Mikroproben

P. Ruther *), W. Bacher, K. Feit

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

Bei der Entwicklung der Mikroelektronik standen zunächst nur die elektrischen und thermischen Materialkenndaten im Vordergrund. Im Zuge der Weiterentwicklung zur Mikrosystemtechnik, bei der mikromechanische Komponenten mit der entsprechenden Auswertelektronik kombiniert werden, ergibt sich die Notwendigkeit, daß auch die mechanischen Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe bekannt sind. Da diese Kenndaten aufgrund der spezifischen Herstellungsverfahren der Mikrosystemtechnik und charakteristischer Dimensionen nicht ohne weiteres von der Makromechanik auf Dimensionen im Mikrometerbereich übertragen werden können, müssen sie an mikrostrukturierten Proben ermittelt werden.

Um die Handhabung der Mikroproben hinsichtlich Montage und Justage bei der Materialprüfung zu erleichtern, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Prüfsystem entwickelt, dessen laterale Dimensionen mit denjenigen des Prüflings vergleichbar sind. Mit diesem sog. Mikroprüfsystem wird der Elastizitäts-Modul von Mikrobalken in einem Biegeexperiment ermittelt. Das Prüfsystem besteht aus einem Mikroaktor mit integriertem Kraftsensor auf der Basis von Dehnmeßstreifen (DMS), einer optischen Wegmeßeinheit und einer Probenhalterung. Es stellt das erste nach dem LIGA-Verfahren gefertigte Mikrosystem dar, das fluidische Aktorik mit optischer und elektrischer Sensorik kombiniert. Die Gesamtabmessungen des Systems betragen $6.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$ bei einer Strukturhöhe von ca. $250 \mu\text{m}$. Für die Realisierung einer optimierten Fluidankopplung wurde das LIGA-Verfahren mit dem hierfür entwickelten Opferstrukturverfahren kombiniert. Die DMS werden über einen neuen, zum LIGA-Verfahren kompatiblen Herstellungsprozeß gefertigt, bei dem zunächst die DMS auf dem Substrat realisiert und anschließend die Mikrostrukturen auf diesen galvanisch aufgebaut werden.

Für das Mikroprüfsystem wurde ein druckbetriebener Mikroaktor entwickelt, der Prüfkräfte im Bereich mehrerer 10 mN auf die Mikrobalken übertragen kann. Er besteht aus einer Aktorkammer und einem beweglichen Kolben, der sich aufgrund einer Druckdifferenz zwischen Kammer und Außenraum parallel zum Substrat bewegen kann. Wesentlicher Vorteil im Vergleich zu bestehenden Mikroaktoren ist, daß die übertragbaren Kräfte unabhängig vom Stellweg des Kolbens sind. Um die am Prüfling angreifenden Kräfte ermitteln zu können, wurden Kraftsensoren auf dem Kolben integriert. Dabei handelt es sich um DMS, die die Relativbewegung einer beweglichen Komponente innerhalb des beweglichen Kolbens detektieren.

Die Wegmeßeinheit ermittelt die Balkenverbiegung indirekt über den Stellweg des Kolbens. Ihr Funktionsprinzip beruht auf der Reflexion eines divergenten Lichtstrahls an einem beweglichen Spiegel und der entsprechenden Detektion der reflektierten Lichtintensität als Funktion der Spiegelposition. Die Ankopplung der Mikrostruktur an die erforderliche Lichtquelle und Detektoren erfolgt über Lichtleitfasern. Die Balkenverbiegung kann mit diesem optischen Meßaufnehmer mit einer Genauigkeit von 200 nm bestimmt werden.

Alternativ zum Einsatz des druckbetriebenen Mikroaktors im Mikroprüfsystem konnte dessen mögliche Anwendung in der minimal invasiven Chirurgie nachgewiesen werden. Dabei wird der Aktor die Antriebseinheit für ein Schneidwerkzeug auf einem Herzkatheter bilden.

Development of a LIGA-made microtest system to determine mechanical properties of micro samples

Abstract

The development of microelectronics was concentrated initially on the electric and thermal characteristics of materials. In the course of its advanced development into microsystems technology, which is a combination of micromechanical components and the corresponding evaluation electronics, also the mechanical properties of the materials used must be known. As a consequence of the special manufacturing techniques in microsystems technology, and also of the characteristic dimensions involved, it is not possible to transfer these characteristics simply from macromechanics to dimensions in the micrometer range. Hence, the characteristics must be determined from microstructured samples.

To facilitate handling of the micro samples during set-up and adjustment in materials tests, a test system has been developed in this study whose lateral dimensions are comparable to those of the sample being tested. This so-called microtest system is used to determine the Young's modulus of microbeams in a bending experiment. The test system is composed of a micro actuator with an integrated force sensor based on strain gauges, an optical displacement measuring unit, and a sample holder. This is the first microsystem made by the LIGA-process to combine fluidic actuators with optical and electric sensors. The overall dimensions of the system are $6.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$; the structural height is approx. $250 \mu\text{m}$. To achieve an optimum connection to the fluid supply, the LIGA-process was combined with the sacrificial structure technique specially developed for the process. The strain gauges are manufactured in a new process compatible with the LIGA process; first, the strain gauges are made on the substrate, and then the microstructures of the force sensor are added by an electrodeposition process.

A pressure-operated micro actuator has been developed for the microtest system which can transfer to the microbeams test forces on the order of several 10 mN. It is made up of an actuator chamber and a movable piston able to move parallel to the substrate under the differential pressure between the chamber and the outer environment. One major advantage over existing micro actuators is the independence of the piston movement of the forces that can be transmitted. To determine the forces acting on the test sample, force sensors have been integrated into the piston. These are strain gauges detecting the relative motion of a movable component within the movable piston.

The displacement measuring unit determines the extent of bending of the beam indirectly through the displacement of the piston. It works on the principle of a divergent beam of light being reflected by a movable mirror, with the corresponding detection of the intensity of the reflected light as a function of the position of the mirror. The microstructure is coupled to the necessary light source and the detectors by means of optical fibers. This optical transducer is able to determine the amount of bending of the beam to an accuracy of 200 nm.

The pressure-operated micro actuator has not only been employed in a microtest system but also has been shown to have potential use in minimally invasive surgery. In that case, the actuator will constitute the drive for a cutting tool on a cardiac catheter.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Mikromechanisches Materialverhalten und Materialprüfung | 4 |
| 2.1 Eigenschaften von „Mikrowerkstoffen“ | 4 |
| 2.2 Prüfmethoden für Mikroproben | 4 |
| 3. Konzeption des Mikroprüfsystems | 9 |
| 3.1 Auswahl des Prüfprinzips | 10 |
| 3.2 Probengeometrie | 10 |
| 3.3 Aktorik | 12 |
| 3.3.1 Aktorprinzipien | 12 |
| 3.3.2 Umsetzung des druckbetriebenen Aktorprinzips | 15 |
| 3.4 Sensorik | 18 |
| 3.4.1 Kraftmessung | 18 |
| 3.4.1.1 Funktionsprinzip der Kolben | 19 |
| 3.4.1.2 Auslegung der Kolben | 20 |
| 3.4.1.3 Thermisches Verhalten des Kolbens | 23 |
| 3.4.2 Wegmessung | 25 |
| 3.4.2.1 Versuchsdurchführung | 25 |
| 3.4.2.2 Meßaufnehmer | 26 |
| 3.4.2.3 Konstruktive Auslegung der optischen Wegmeßeinheit | 29 |
| 3.5 Probenhalterung | 33 |
| 3.5.1 Konzeption einer Balkenhalterung | 33 |
| 3.5.2 Konstruktive Auslegung der Balkenhalterung | 34 |
| 3.6 Gesamtsystem | 35 |
| 4. Herstellung und Montage | 37 |
| 4.1 Herstellungsprozeß | 37 |
| 4.2 Montage | 41 |
| 4.2.1 Deckel | 42 |
| 4.2.2 Fluidanschlüsse | 44 |
| 4.2.3 Lichtleitfasern | 45 |
| 4.2.4 Kraftmeßkolben | 46 |
| 5. Experimentelle Ergebnisse und Diskussion | 48 |
| 5.1 Testaktor | 48 |
| 5.1.1 Antriebsmedium | 48 |
| 5.1.2 Kraftübertragung des Aktors | 50 |
| 5.1.3 Wegmeßeinheit | 51 |
| 5.1.4 Kolbendesign | 53 |
| 5.1.5 Dynamisches Verhalten des Aktors | 54 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 Mikroprüfsystem | 55 |
| 5.2.1 Wegmeßeinheit | 55 |
| 5.2.1.1 45°-Spiegel | 55 |
| 5.2.1.2 Senkrechter Spiegel | 60 |
| 5.2.2 Kraftmeßkolben | 62 |
| 5.2.2.1 Teststrukturen für die DMS-Herstellung | 62 |
| 5.2.2.2 Test der Kraftmeßkolben..... | 64 |
| 5.2.3 Gesamtsystem | 69 |
| 6. Alternative Anwendungsmöglichkeit für den Aktor | 72 |
| 6.1 Aufbau und Herstellung | 72 |
| 6.2 Experimentelle Ergebnisse | 75 |
| 6.2.1 Versuchsaufbau..... | 75 |
| 6.2.2 Geschwindigkeitsmessungen | 77 |
| 6.2.3 Kraftmessung..... | 78 |
| 7. Zusammenfassung | 80 |
| Literaturverzeichnis | 84 |
| Anhang | 88 |
| Liste der verwendeten Symbole | 91 |

1 Einleitung

Die Entwicklung der Mikrosystemtechnik, bei der Komponenten der Mikroelektronik, der Mikromechanik, der Mikrooptik und der Mikrofluidik zu kommunizierenden Systemen kombiniert werden, steht noch an ihren Anfängen. Doch analog zur Mikroelektronik, die in den letzten Jahrzehnten wie kaum eine andere technologische Entwicklung sowohl die Arbeitswelt als auch den privaten Bereich geprägt hat, läßt die Mikrosystemtechnik ein weites Feld von Anwendungen erkennen, die zunehmend an Einfluß gewinnen. Dies wird in der Medizintechnik im Bereich der minimal invasiven Chirurgie der Fall sein, wo z.B. auf einem Herzkatheter diagnostische und therapeutische Komponenten zusammenwirken, deren Realisierung erst durch die fortschreitende Miniaturisierung von Sensoren und Aktoren ermöglicht wird. Ähnliches gilt auch in der Automobilindustrie, wo immer mehr Betriebsparameter des Motors und des gesamten Fahrzeugs über intelligente Sensoren erfaßt werden. Dabei werden z.B. Beschleunigungssensoren in Air-Bag-Systemen und bei der Regelung der Fahrzeugdynamik eingesetzt.

Der mögliche Einsatz der Mikrosysteme wird dabei von deren elektrischer und mechanischer Zuverlässigkeit bestimmt. In den Anfängen der Mikroelektronik wurde den mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien zunächst wenig Beachtung geschenkt. Entscheidend waren das elektrische und thermische Verhalten. Mit zunehmender Miniaturisierung der elektronischen Schaltkreise und Einführung verschiedener Metallisierungsschichten gewannen die mechanischen Eigenschaften im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Komponenten zunehmend an Bedeutung. So können z.B. metallische Leiterbahnen in integrierten Schaltkreisen aufgrund von Elektromigration und mechanischer Spannungen, die ihre Ursache in den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien haben, zerstört werden [Arz 91].

Mit dem Übergang von der Mikroelektronik zur Mikromechanik traten die mechanischen Eigenschaften der Materialien in den Vordergrund, da diese z.B. als dünne Schichten in Sensoren und Aktoren zu echten Strukturwerkstoffen werden, die dann in erster Linie mechanische Stabilität gegenüber äußeren Kräften garantieren müssen.

Bei der Auslegung mikromechanischer Bauteile und Systeme kommt daher den mechanischen Werkstoffeigenschaften wie Verformungs-, Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit der Systeme eine grundlegende Bedeutung zu. Dabei können die Werkstoffkennwerte nicht ohne weiteres direkt aus der Makromechanik übertragen werden. Bedingt durch das Herstellungsverfahren und die charakteristischen Dimensionen der Komponenten kann sich das Materialverhalten deutlich von dem makroskopischer Proben unterscheiden (vergl. Kap. 2). Dies bedingt, daß die mechanischen Eigenschaften der Strukturwerkstoffe an Proben ermittelt werden müssen, die vergleichbare laterale Abmessungen wie das geplante Bauteile aufweisen und den gleichen Herstellungsbedingungen

unterworfen waren. Hierdurch wird sichergestellt, daß Oberflächen- und Korngrößeneffekte entsprechende Auswirkungen auf das Verhalten der untersuchten Probe und des geplanten Bauteils haben.

Im Zuge der Miniaturisierung in der Mikroelektronik wurden Prüfverfahren entwickelt, die sich aufgrund der typischen Herstellungsverfahren in der Halbleiterindustrie zunächst an Schichtstrukturen orientierten. Als Beispiel sei hier der Bulge-Test genannt, mit dem der biaxiale Elastizitäts-Modul von dünnen Filmen ermittelt wird. Mit der Möglichkeit, über Ätzprozesse freistehende Balkenstrukturen zu erzeugen, und der Entwicklung des Nano-indenters konnte der Biegeversuch auf die Mikromechanik übertragen werden.

Für den Großteil der Prüfverfahren (vergl. Kap. 2), die für die Untersuchung von Mikroproben entwickelt wurden, gilt, daß der mikromechanisch gefertigte Prüfling in einem makroskopischen Prüfgerät untersucht wird. Mit dem Übergang von großflächigen Schichten zu 2-dimensional strukturierten Mikrokomponenten gehen Probleme bei der Handhabung und der exakten Ausrichtung der Proben innerhalb der verwendeten Prüfanordnung einher. So ist die Umsetzung des Zugversuchs auf Mikroproben nur mit erheblichem Aufwand zu bewerkstelligen.

Um diese Problematik zu umgehen, muß die Prüfanordnung vergleichbare Dimensionen wie die zu prüfende Komponente aufweisen, d.h. es müssen Mikrosysteme zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Mikroproben entwickelt werden. Bei den aus der Literatur bekannten *Mikroprüfsystemen*, die auf Herstellungsverfahren der Mikroelektronik basieren, wird die krafterzeugende Komponente, der sog. Aktor, zusammen mit der Probe hergestellt [Bie 95, Pet 87, Sai 95]. Hierdurch ist die Justage der Probe gegenüber dem Aktor bereits gewährleistet.

Der wesentliche Nachteil dieser Prüfsystem-Proben-Kombinationen ist allerdings, daß für jede Probe ein komplettes Prüfsystem gefertigt werden muß. Zudem wird das Verhalten der kraftübertragenden Komponente als bekannt vorausgesetzt, d.h. die einzelnen Systemkomponenten können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. So hätte eine Wärmebehandlung der Probe auch Auswirkungen auf das Prüfsystem bzw. den Mikroaktor, die im Meßsignal nicht ohne weiteres zu unterscheiden sind.

Aus diesen Gründen wurde in der vorliegenden Arbeit für das zu entwickelnde Mikroprüfsystem ein konträrer Ansatz gewählt. Das Prüfsystem wird aus einer krafterzeugenden Komponente, dem Mikroaktor und den Sensoren für die Ermittlung der übertragenen Kräfte und hierdurch hervorgerufenen Probendeformationen bestehen. Die Mikroproben werden unabhängig vom Mikroprüfsystem gefertigt, so daß im Hinblick auf eine Wärmebehandlung der Proben bzw. die Materialauswahl eine größtmögliche Flexibilität gewährleistet wird. Für die exakte Ausrichtung und Justage der Prüflinge innerhalb des Systems ist eine mikrostrukturierte Halterung vorgesehen, in die die Proben definiert eingesetzt werden.

Der Konzeptionsphase des Mikroprüfsystems ging zunächst die Auswahl eines geeigneten Prüfverfahrens voraus, das die wesentlichen Randbedingungen hinsichtlich der erforderlichen Prüfkräfte und der zu erwartenden Probendeformationen vorgab. Die Auswahl bzw. Entwicklung eines entsprechenden Mikroaktors ebenso wie die Konzeption der Wegmeßeinheit und des Kraftaufnehmers orientierte sich an diesen Randbedingungen.

Mit dem LIGA-Verfahren [Bec 86] wurde ein Mikroprüfsystem bestehend aus einem hydraulisch betriebenen Mikroaktor und einer optischen Wegmeßeinheit hergestellt, mit dem der Elastizitäts-Modul von LIGA-Materialien in einem Biegeexperiment an Mikrobalken ermittelt werden kann. Zur Messung der übertragenen Prüfkräfte wurde ein Kraftaufnehmer entwickelt, der auf dem Prinzip von Dehnmeßstreifen beruht. Für die Realisierung des Kraftaufnehmers sowie die optimierte Fluidversorgung des Aktors über Mikrotunnel wurden entsprechende Herstellungsprozesse entwickelt.

Das realisierte Mikroprüfsystem zeichnet sich durch die Möglichkeit aus, sowohl Kraft als auch Probendeformation unabhängig von einander zu bestimmen. Die Funktionsfähigkeit dieser Prüfanordnung, die erstmals in einem Mikrosystem fluidische Aktorik sowie optische und elektrische Sensorik miteinander vereint, wurde nachgewiesen.

Aufgrund der experimentellen Ergebnisse des Mikroaktors im Hinblick auf Leckrate des Antriebsmediums und die übertragbaren Kräfte, wurde parallel zu den Entwicklungen des Prüfsystems ein hydraulisch betriebener Linearaktor entworfen und getestet. Dieser ist als Antriebseinheit für ein linear arbeitendes Schneidwerkzeug auf einem Herzkatheter in der minimal invasiven Chirurgie vorgesehen.

2 Mikromechanisches Materialverhalten und Materialprüfung

2.1 Eigenschaften von „Mikrowerkstoffen“

Bedingt durch die charakteristischen Dimensionen und die spezifischen Herstellungsverfahren können sich die mechanischen Eigenschaften wie Duktilität, Festigkeit und Steifigkeit der Materialien mit dem Übergang von der Makro- zur Mikromechanik erheblich ändern. Hierfür kommen folgende Ursachen in Betracht [Arz 91, Som 95]:

- Oberflächeneffekte dominieren aufgrund des größer werdenden Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen.
- Bedingt durch die charakteristischen Geometrien der Mikrobauteile sind die Laufwege von Gitterversetzungen stark eingeschränkt. Hierdurch ist im Gegensatz zu Makroproben ein erschwerter Fließbeginn und damit eine höhere Festigkeit verbunden.
- Bei dünnen Schichten werden häufig Eigenspannungen beobachtet, die intrinsischen, d.h. herstellungsbedingten und/oder thermischen Ursprungs sind. Die Verformbarkeit des Materials wird durch diese Eigenspannungen beeinflusst.
- Aufgrund dieser Eigenspannungen werden Ausscheidereaktionen und die Kinetik anderer Vorgänge im Werkstoff aus ihrem thermodynamischen Gleichgewicht heraus verschoben.
- Herstellungsbedingt sind Mikrowerkstoffe häufig feinkristallin, so daß die Korngröße in der Größenordnung der Schichtdicke liegt, wodurch sich die Festigkeit der Materialien erhöht („Hall-Petch-Effekt“). Weisen die einzelnen Körner zudem eine Vorzugsorientierung auf, so kann dies Anlaß zu anisotropem Materialverhalten sein.

Als Konsequenz hiervon können für die Auslegung von Mikrokomponenten die makromechanischen Werkstoffkenndaten nicht ohne weiters auf den Mikrometermaßstab übertragen werden. Vielmehr ist es notwendig, die Eigenschaften der verwendeten Materialien an Proben zu untersuchen, die Dimensionen im Mikrometerbereich aufweisen. Dabei ist zu beachten, daß die Proben den Herstellungsschritten unterzogen werden, die auch bei der Fertigung der Mikrokomponenten zum Tragen kommen.

2.2 Prüfmethoden für Mikroproben

Für die mechanische Charakterisierung von Materialien der Mikroelektronik und Mikromechanik müssen konventionelle Testverfahren, die bei der Untersuchung makroskopischer Proben Anwendung finden, auf die „Mikrowelt“ übertragen bzw. neue Meßmethoden entwickelt werden, die auf Proben im Mikrometermaßstab abgestimmt sind. Diese sog. Mikroprüfverfahren müssen den miniaturisierten Prüfgeometrien Rechnung tragen. Dies äußert sich in Konzepten für die Handhabung der Proben, die ein präzises Aufbringen der entsprechend kleinen Prüfkraft garantieren. Ferner ist ein sehr hoher Präzisionsgrad bei der experimentellen

Ermittlung der entsprechenden Eingangsdaten¹ und der Probendeformationen gefordert. Im folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, verschiedene Testverfahren für die Ermittlung mechanischer Werkstoffkenngrößen von Mikroproben vorgestellt. Als Mikroproben werden hierbei Komponenten verstanden, bei denen mindestens eine laterale Abmessung im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-9} m liegt [Som 94].

Das in der makroskopischen Werkstoffprüfung bedeutendste Verfahren zur Ermittlung mechanischer Materialeigenschaften, der *Zugversuch* mit einem homogenen, einachsigen Spannungszustand, läßt sich nur bedingt auf die Mikrowelt übertragen. Dies ist im wesentlichen durch Probleme bei der Einspannung der Mikroproben bedingt. Allen et al. [All 87] lösten die Einspannprobleme sowie die Frage der Kraftaufbringung sehr elegant durch Verwendung einer zweiseitig eingespannten, rechteckigen Membran. Diese Membran ist derart strukturiert, daß die Verbindung zum Substrat auf einer Seite nur über schmale Stege erfolgt. Diese Stege bilden die Zugproben, wobei die zu deren Dehnung erforderlichen Kräfte von der Membran selbst aufgrund intrinsischer Spannungen aufgebracht werden. Mit dem Freiätzen der Membran vom Substrat werden die Spannungen auf die Zugproben übertragen und diese entsprechend ihres Elastizitäts-Moduls gedehnt. Diese einfache Prüfanordnung besitzt allerdings den wesentlichen Nachteil, daß nur der Endzustand der Zugprüfung experimentell zugänglich ist.

In der von Greek et al. [Gre 95] vorgeschlagenen Meßanordnung können dagegen die Kräfte quasi-statisch auf die Probe übertragen und gemessen werden. Die Zugproben werden auch bei dieser Versuchsanordnung direkt auf einem Substrat hergestellt und sind mit diesem auf einer Seite fest verbunden. Die Kräfte werden auf die balkenförmigen Proben über einen ebenfalls mikrostrukturierten Ring übertragen, in den ein Stift eines piezoelektrischen Mikromanipulators greift. Die Ausrichtung des Manipulators bezüglich der Probe erfolgt in einem Rasterelektronenmikroskop.

In strenger Analogie zum klassischen Zugversuch führten Rosenmayer et al. [Ros 89] Zugversuche an dünnen Schichten durch, wobei hier die Einspannprobleme bei den $1 \mu\text{m}$ dicken Filmen durch deren laterale Ausdehnung von $3 \times 1 \text{ cm}^2$ umgangen wurden. Als ein weiteres Beispiel in diesem Zusammenhang sei die von Ilzhöfer et al. [Ilz 95] vorgeschlagene Mikro-Zugprüfmaschine erwähnt. Hierbei werden LIGA-Mikroproben indirekt über einen Lastrahmen mit integriertem Kraft- und Wegmeßsystem in einer kommerziell erhältlichen Zugprüfmaschine getestet. Die Zugproben besitzen hierbei eine Querschnittsfläche von 0.01 mm^2 .

Mit Hilfe des sog. *Bulge-Tests* [Bea 59] wird der biaxiale Elastizitäts-Modul von dünnen Filmen bestimmt. Bei diesem Testverfahren ist eine Membran über eine kreisförmige Öffnung gespannt und einseitig mit Druck beaufschlagt. Über die Auslenkung des Films als Funktion des angelegten Drucks läßt sich der Elastizitäts-Modul berechnen. Werden sowohl kreisförmige als auch rechteckige Membranen des gleichen Films getestet, so kann zudem die

¹ Z.B. die äußeren Kräfte und die geometrischen Abmessungen der Probe.

Poisson-Zahl bestimmt werden [Vla 92]. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß Substrateffekte ausgeschlossen werden können und eine aufwendige Probenausrichtung wie z.B. beim Mikro-Biegetest entfällt. Allerdings beeinflussen die in der Schicht vorhandenen intrinsischen Spannungen die Messung [Sma 92].

Intrinsische Spannungen dünner Filme werden häufig über die Krümmung eines homogen beschichteten Substrats bestimmt. Hierbei muß nur der Elastizitäts-Modul des Substrats und die Dicke von Substrat und Film bekannt sein. Die Krümmung des Substrats wird im sog. *Laser-Scan-Verfahren* bestimmt, wobei Laserlicht über die Probenoberfläche geführt wird. Über die Änderung des Reflexionswinkels als Funktion der lateralen Position des Laserspots kann auf die Krümmung des Substrats geschlossen werden. Die meßbaren Krümmungsradien liegen bei 40 km [Fli 87]. Durch Messung der Substratkrümmung vor und nach der Filmherstellung können die inneren Spannungen des Films bestimmt werden.

Im Gegensatz zum Laser-Scan-Verfahren, das den Mittelwert der inneren Spannungen über den gesamten Film liefert, können mit Hilfe der *Röntgenbeugung* dagegen die Spannungen ortsaufgelöst detektiert werden. Wird der Röntgenstrahl zudem in streifendem Einfall verwendet (GIXS, Grazing Incidence X-ray Scattering [Doe 88]), so sind die Spannungen über der Schichtdicke zugänglich.

Als weitere Methode zur Ermittlung elastischer und plastischer Eigenschaften extrem kleiner Volumenbereiche in Oberflächen, dünnen Schichten und Mikrobautteilen hat sich der *Mikro-Eindruckversuch* bewährt. Bei diesem ortsempfindlichen Meßverfahren wird eine Diamantspitze kontinuierlich ins Material gedrückt und die Kraft als Funktion der Eindringtiefe aufgezeichnet. Im Gegensatz zu konventionellen Härteprüfungen ist im sog. Nanoindenter die Messung der Eindringtiefe notwendig, da die erhaltenen Eindrücke in der Regel zu klein sind und mikroskopisch sehr schlecht ausgewertet werden können. Aus den erhaltenen Belastungs- und Entlastungskurven als Funktion der Eindringtiefe können neben der Härte des Materials, das Fließverhalten und elastische Kenngrößen [Doe 86] bestimmt werden. Da in der Regel komplizierte Spannungszustände beim Eindringen der Diamantspitze vorliegen und zudem der Einfluß des Substrats nicht unerheblich ist, muß die Auswertung der gewonnen Daten mit Finite-Element-Simulationen unterstützt werden.

Mit dem Nanoindenter werden neben den Mikro-Eindruckversuchen auch *Mikro-Biegeversuche* durchgeführt. Weihs et al. [Wei 88] und Johansson et al. [Joh 88] untersuchten hiermit erstmals freistehende Mikrobalken. Entscheidender Vorteil der Biegeprüfung an diesen einseitig eingespannten Mikrobalken ist, daß störende Einflüsse des Substrats ausgeschlossen werden können. Mit den Biegeversuchen läßt sich sowohl elastisches als auch plastisches Materialverhalten untersuchen, wobei bei deren Auswertung wiederum auf Finite-Element-Simulationen zurückgegriffen werden muß, die den im Experiment vorhandenen Randbedingungen Rechnung tragen [Som 94].

Neben diesen quasi-statischen Prüfverfahren können die elastischen Materialkonstanten von Mikroproben durch die Messung ihrer *Resonanzfrequenz* ermittelt werden. Petersen et al. [Pet 79] regten mikromechanisch gefertigte Balken elektrostatisch zu Schwingungen an und ermittelten die Resonanzfrequenz der Balken über die Reflexion eines Laserstrahls. Bei Biebl et al. [Bie 95] wird ein mikromechanisch gefertigter Resonator über eine kammartige Kondensatorstruktur angetrieben. Die Detektion der mechanischen Resonanzfrequenz erfolgt über eine zweite Kondensatorstruktur. Die Komponenten der Krafterzeugung und Frequenzmessung sowie die Teststruktur werden hier auf einem gemeinsamen Substrat hergestellt, so daß Montage- und Justage der verschiedenen Komponenten zueinander entfällt.

Als ein weiteres Verfahren zur Ermittlung elastischer Werkstoffeigenschaften sei an dieser Stelle die *Ultraschall-Mikroskopie* erwähnt, die den wesentlichen Vorteil einer berührungslosen und zerstörungsfreien Untersuchung der Mikrokomponenten erlaubt. Bei diesem Verfahren wird ein fokussierter Ultraschallstrahl über die Probe geführt. Bei bekannter Poisson-Zahl und Dichte des Materials kann der E- und G-Modul bestimmt werden [Mey 95].

Die vorgestellten Prüfverfahren (siehe Zusammenfassung Tab. 2.1) für Mikroproben weisen, bis auf wenige Ausnahmen, die Notwendigkeit auf, daß die Prüflinge innerhalb einer makroskopischen Anordnung ausgerichtet werden. Hiermit ist immer ein erheblicher Justage- und Montageaufwand verbunden.

Versteht man unter einem *Mikroprüfsystem* allerdings ein Mikrosystem zur Prüfung von Mikrokomponenten, so erfüllt von obigen Prüfverfahren lediglich die Anordnung von Biebl et al. [Bie 95] diese Anforderung. Hierbei erfolgt die Krafterzeugung sowie die Detektion der durch diese Kraft verursachten Wirkung (hier: Schwingung der Mikrostruktur) über mikrostrukturierte Komponenten, die zusammen mit der Probe hergestellt und relativ zu dieser ausgerichtet sind. Zu dieser Kategorie von Mikroprüfsystemen kann ebenfalls die Mikrostruktur von Saif et al. [Sai 95, Sai 96] gezählt werden. Bei dieser Anordnung dient ebenfalls ein elektrostatischer Mikroaktor zur Erzeugung der in einem Biegeexperiment erforderlichen Kräfte. Die Probendeformation wird bei dieser Struktur über die Kapazitätsänderung eines kammförmigen Kondensators ermittelt.

Als Konsequenz obiger Darstellungen ergibt sich, daß die laterale Dimension der Prüfanordnung der zu prüfenden Mikrokomponente angepaßt werden sollte. Hierdurch können die Anforderungen hinsichtlich der Ausrichtung der Prüflinge innerhalb des Prüfsystems einfacher erfüllt werden.

| Verfahren | Meßgröße | Zugängliche Kennwerte | Vorteil | Nachteil |
|---------------------------------|-----------------------|--|--|---|
| Zugversuch | $\sigma(\varepsilon)$ | E-Modul, Zugfestigkeit, Streckgrenze, Elastizitätsgrenze, etc. | Homogen einachsiger Spannungszustand, ohne Substrateffekte | Einspannprobleme, Handhabung |
| Biegeversuch | $f(F)$ | E-Modul, Biegefestigkeit, Biegefließgrenze | ohne Substrateffekte | Mikrostrukturierung, inhomogener Spannungszustand |
| Nanoindenter, Härteprüfung | $f(F)$ | Härte, E-Modul | laterale Auflösung | Substrateffekte, komplizierter Spannungszustand |
| Laser-Scan | $R(T)$ | Eigenstressungen in dünnen Filmen | thermisches Verhalten ist zugänglich | Mittelwertbildung, Substrateinfluß |
| Bulge-Test | $f(p)$ | Biaxialer E-Modul dünner Filme | ohne Substrateffekte | Eigenstressungen |
| Röntgenbeugung | $I(\alpha)$ | Eigenstressungen in dünnen Filmen | ortsaufgelöste Messung | hoher zeitlicher Meßaufwand |
| Resonatoren | $f^*(E, T)$ | E-Modul | Resonanzfrequenz gut meßbar | Geometrie muß genau bekannt sein |
| Akusto-Mikroskopie ² | v_R | E- und G-Modul | zerstörungsfrei und berührungslos | Schichtdicke größer Rayleighwellenlänge |

Tab. 2.1: Prüfverfahren zur mechanischen Charakterisierung von Mikroproben und dünnen Schichten ($f(F)$ Auslenkung bzw. Eindringtiefe, R Krümmungsradius, $f(p)$ Deformation der Membran, $I(\alpha)$ Intensität als Funktion des Beugungswinkels, f^* Frequenz, v_R Rayleighwellengeschwindigkeit).

² SAM = Scanning Acoustic Microscopy.

3 Konzeption des Mikroprüfsystems

Inhalt dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Mikrosystems zur mechanischen Prüfung von LIGA-Mikroproben. Das Mikrosystem, für das synonym der Begriff *Mikroprüfsystem* verwendet wird und das schematisch in Abb. 3.1 dargestellt ist, soll folgende Eigenschaften und Komponenten aufweisen:

- Das Mikroprüfsystem muß als Hauptbestandteil eine Komponente aufweisen, den sog. *Mikroaktor*, der die für die mechanische Prüfung benötigte Kraft zur Verfügung stellt.
- Die durch den Aktor übertragenen Kräfte und die hierdurch an der Probe verursachte Deformation muß mit geeigneten Meßaufnehmern (*Sensoren*) detektiert werden. Die Sensoren sind ebenfalls im Mikroprüfsystem integriert.
- Für die Fixierung der Proben und deren exakte Ausrichtung innerhalb des Systems muß eine *Halterung* vorgesehen werden, die eine einfache Montage der Proben gewährleistet.
- Das Gesamtsystem soll nach dem LIGA-Verfahren hergestellt werden, wobei der Standard LIGA-Prozeß mit weiteren Techniken kombiniert werden kann.

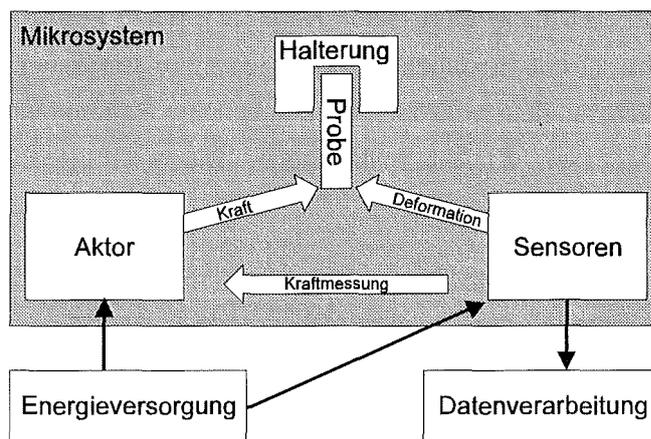


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Mikroprüfsystems bestehend aus Aktor, Sensoren und Probenhalterung.

Die Funktionsprinzipien des Aktors sowie der Sensoren waren zu Beginn der Arbeit nicht festgelegt. Vielmehr ergab sich während der Abschätzung der benötigten Kräfte und der Anforderungen hinsichtlich der Kraftaufbringung ein hierfür geeignetes Aktorprinzip, das in dieser Arbeit erstmals in einem LIGA-Mikroaktor umgesetzt wurde.

Im folgenden werden die Überlegungen im Hinblick auf das Prüfprinzip, die Auslegung der Probengeometrie und die sich hieraus ergebende Abschätzung der erforderlichen Kräfte sowie die Auslegung und Konzeption des Aktors, der Sensoren für die Kraft- und Wegmessung und der Probenhalterung dargelegt.

3.1 Auswahl des Prüfprinzips

Da mit dem Mikroprüfsystem zunächst nur der Elastizitäts-Modul von LIGA-Mikroproben bestimmt werden soll, kommen als Prüfverfahren der Zug- und Biegeversuch in Betracht. Diese Verfahren können in einem Mikrosystem relativ leicht umgesetzt werden, da sowohl die Krafteinleitung als auch die hierdurch hervorgerufene Probendeformation in einer Ebene erfolgt. Die Herstellung des Systems nach dem LIGA-Verfahren, das sich durch die freie laterale Strukturierung auszeichnet, wird daher durch die Charakteristik des Prüfverfahrens begünstigt.

Betrachtet man die Probendeformationen der unterschiedlichen Prüfverfahren, so scheidet die Umsetzung des Zugversuchs sowohl an der Auflösung bei der Wegmessung als auch an den erforderlichen Kräften. Die zu erwartende Auflösung bei der Wegmessung wird bei einem integrierten Meßaufnehmer im Bereich von 200 bis 500 nm liegen, die Probendeformationen im Vergleich dazu bei wenigen Mikrometern³. Zudem müßten Kräfte im Bereich von 100 mN aufgebracht werden⁴.

Im Gegensatz dazu werden für die Biegeprüfung Kräfte im Bereich von 10 mN bei einer Probendeformation von 30 µm erwartet (siehe Kap. 3.2). Diese können mit einem Mikroaktor aufgebracht werden. Im zu entwickelnden Mikroprüfsystem soll daher die Biegeprüfung umgesetzt werden, die sich an den Mikrobiegeversuchen im Nanoindenter [Wei 88] orientiert. Hierbei werden, im Gegensatz zur makroskopischen Biegeprüfung [Nit 68], einseitig eingespannte Balken verwendet.

3.2 Probengeometrie

Bei den für das Mikroprüfsystem konzipierten Proben handelt es sich um einseitig eingespannte Balken mit einer Länge L von 1550 µm, einer Breite b von 50 µm und einer Höhe h von 200 µm (siehe Abb. 3.2). Das freie Ende der Balken wird über eine linienförmige Kraft F belastet.

Für die maximale Balkenverbiegung f_{max} bei Belastung des freien Balkenendes mit der Kraft F ergibt sich nach der klassischen Balkentheorie [Tim 72]:

$$f_{max} = \frac{F L^3}{3 E I} \quad (3.1)$$

mit L der Balkenlänge, E dem Elastizitäts-Modul und I dem Flächenträgheitsmoment.

³ Bei einer Probenlänge von 2 mm und einer Dehnung von 0.2 % im elastischen Bereich wird die Deformation bei 4 µm liegen, so daß die Genauigkeit in der Wegmessung bestenfalls bei 5 % liegt.

⁴ Hierbei wurde ein Probenquerschnitt von 20 x 20 µm² und ein Elastizitäts-Modul von 125 · 10⁹ N/m² angenommen. Eine weitere Reduktion des Querschnitts würde bei dem vorliegenden Konzept des Mikroprüfsystem die Handhabung zu sehr erschweren.

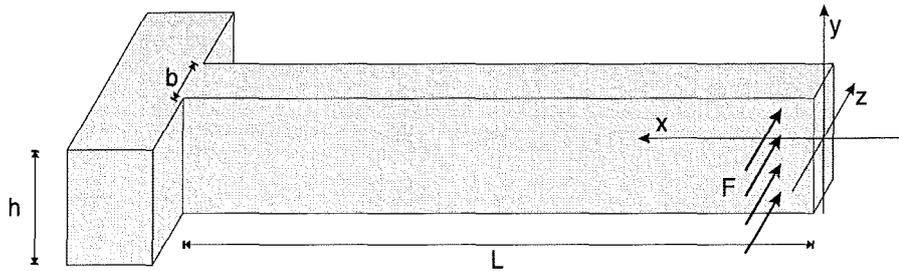


Abb. 3.2: Balkengeometrie mit der Höhe h , der Länge L und der Breite b des Balkens. Die linienförmige Kraft wird in z -Richtung aufgebracht.

Da bei der Messung des Elastizitäts-Moduls die Zug- und Druckbelastungen innerhalb des elastischen Bereichs des verwendeten Materials liegen sollen, wird eine maximale Dehnung ϵ von 0.1 % im Bereich der Einspannstelle zugelassen. Mit dem Widerstandsmoment W und der zulässigen Spannung σ_{zul} ergibt sich für die Obergrenze der Kraft F_{max}^{zul} :

$$F_{max}^{zul} = \frac{\sigma_{zul} W}{L} \quad (3.2)$$

Mit dem Flächenträgheitsmoment I , dem Widerstandsmoment W für Biegeproben mit Rechteckquerschnitt [Dub 81]:

$$I = \frac{h b^3}{12}, \quad W = \frac{h b^2}{6} \quad (3.3)$$

und den Elastizitäts-Moduli von Kupfer $E_{Cu} = 125 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ und Nickel $E_{Ni} = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$, wie sie aus makroskopischen Messungen bekannt sind, ergeben sich maximal zulässige Kräfte für die Biegeprüfung von ca. 7 mN für Kupferproben und von ca. 12 mN für Nickelproben. Dies bedeutet, daß der im Mikroprüfsystem integrierte Mikroaktor für einen Kraftbereich bis 20 mN ausgelegt werden sollte.

Die bei diesen Kräften erzielbaren Balkenverbiegungen liegen nach (3.1) für Kupfer- oder Nickelbalken bei ca. 30 μm , die mit dem im Mikroprüfsystem integrierten Meßaufnehmer mit entsprechender Genauigkeit aufgelöst werden können.

Für eine bessere Handhabung und optimale Fixierung der Proben in der Halterung werden die Balken zusammen mit der sog. Balkenplatte hergestellt (siehe Abb. 3.13). Der Übergang vom Balken zur Balkenplatte ist mit einem Kerbradius von 5 bzw. 10 μm versehen, um die Spannungsüberhöhung an der Einspannstelle des Balkens zu reduzieren. In der Balkenplatte ist zudem ein Loch mit einem Durchmesser von 300 μm strukturiert, das zur Aufnahme eines Stifts vorgesehen ist, der beim Einsetzen des Balkens in die Halterung verwendet werden soll.

3.3 Aktorik

Bei der Auswahl des Aktorprinzips und der Konzeption des Mikroaktors für das Mikroprüfsystem standen folgenden Gesichtspunkte im Vordergrund:

- **Stellweg**
Der zu entwickelnde Aktor soll Stellwege im Bereich mehrerer 10 μm ermöglichen, da die maximal zulässige Probedeformation bei 30 μm liegt (siehe Kap. 3.2).
- **Kraft**
Der im Mikroprüfsystem integrierte Mikroaktor muß Kräfte im Bereich von 20 mN übertragen können.
- **Richtung der Krafteinleitung**
Da im Mikroprüfsystem die Probedeformation in der Ebene der Krafteinleitung erfolgt, sollte die Kraft in der Substratebene auf die Probe übertragen werden. Der wesentliche Vorteil hierbei ist, daß die Wegmeßeinheit justiert zum Aktor auf dem Substrat hergestellt werden kann.
- **Kraft-Stellweg-Kennlinie**
Die maximal übertragbare Kraft des Aktors sollte unabhängig vom Stellweg des Aktors zur Verfügung stehen.

3.3.1 Aktorprinzipien

Die in Tab. 3.1 aufgelisteten Aktorprinzipien, die bereits in der Mikrotechnik umgesetzt sind, wurden im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit innerhalb des Mikroprüfsystems entsprechend obiger Gesichtspunkte untersucht.

Thermisch betriebener Aktor

Bei diesem Aktorprinzip wird der Unterschied in der thermischen Längenausdehnung zweier Bauelemente zueinander ausgenutzt. Die Elemente besitzen dabei aufgrund ihrer Geometrie unterschiedliche elektrische Widerstände, so daß es bei Stromdurchfluß zu einer ungleichen Erwärmung der Elemente kommt. Mit Aktoren dieses Funktionsprinzips können Kräfte von 0.5 mN übertragen werden, wobei der Aktor eine Länge von 10 mm besitzt [Fie 95]. Gegen die Umsetzung dieses relativ einfachen Funktionsprinzips im Mikroprüfsystem spricht neben den geringen Kräften im wesentlichen der hohe Temperaturunterschied⁵, der beim Betrieb dieser Aktoren erforderlich ist.

⁵ Die Temperaturdifferenzen liegen bei 50 bis 100 °C [Fie 95].

| Physikalisches Prinzip | Realisierung / Bsp. | Vorteile | Nachteile |
|----------------------------|----------------------|--|---|
| thermisch | [Guc 92] [Fie 95] | einfaches Funktionsprinzip, keine Verschleißteile | geringe Kräfte, relativ große Strukturen, thermi- sche Belastung der Probe |
| elektrostatisch | [Koh 95, Kow 91] | geringe Leistungsaufnahme | geringe Kräfte |
| magnetostatisch | [Rog 96] | große Kräfte | komplexes Herstellungs- verfahren |
| pneumatische / hydraulisch | [Sni 91, Rut 94] | große Kräfte und Stellwege, Kraft unabhängig vom Stellweg, einfaches Funk- tionsprinzip | Leckrate |
| magnetostruktiv | [Qua 95] | Kontaktlose Ansteuerung | Einkopplung von Magnetfeldern (Feld- spulenintegration), hoher Leistungsbedarf, kleine Kräfte |
| piezoelektrisch | [Jen 95] | leistungsarme Ansteuerung | komplexer Aufbau |
| Formgedächtnislegierung | [Joh 91] | große Kräfte und Stellwege | Temperatureinkopplung, schwierige Herstellung |

Tab. 3.1: Verschiedene Funktionsprinzipien für Mikroaktoren.

Elektrostatischer Aktor

Elektrostatische Aktoren nutzen die Kräfte zwischen unterschiedlich geladenen Kondensatorplatten. Als Beispiele von in LIGA-Technik realisierten Aktoren seien hier die Arbeiten von Kowanz [Kow 91] und Kohl [Koh 95] erwähnt. Die erreichbaren Stellkräfte liegen hier im Bereich weniger mN, wobei die maximal übertragbaren Kräfte stark vom Stellweg des Aktors abhängig sind. Trotz des wesentlichen Vorteils der geringen Leistungsaufnahme sprechen der relativ große Platzbedarf⁶ bezogen auf die übertragbaren Kräfte und die starke Abhängigkeit der Kräfte vom Stellweg des Aktors gegen eine Verwendung dieses Funktionsprinzips im Mikroprüfsystem.

Magnetostatischer Aktor

In magnetostatischen Aktoren wird ein Weichmagnet durch das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule angezogen. Aktoren dieser Bauart werden heute industriell in Ventilen eingesetzt. Beispiele für die Umsetzung dieses Aktorprinzips im Mikrobereich finden sich z.B. bei [Wag 92, Guc 93, Guc 95, Ahn 93, Rog 96]. Da zum Aufbau des Magnetfelds eine Spule benötigt wird, weisen die magnetostatischen Aktoren im Gegensatz zu den elektrostatischen eine 3-dimensionale Struktur auf, was den Herstellungsaufwand bei diesem Aktorprinzip deutlich erhöht.

⁶ Der Platzbedarf liegt bei ca. 4 x 4 mm² [Koh 93].

Die Kräfte, die mit diesen Aktoren übertragen werden können, decken einen Bereich bis mehrere 10 mN [Rog 96] ab. Dabei ist allerdings die maximal übertragbare Kraft stark abhängig vom Stellweg des Aktors. Gegen eine Umsetzung dieses Aktorprinzips im Mikroprüfsystem spricht das relativ komplexe Herstellungsverfahren und die Kraft-Stellweg-Kennlinie.

Hydraulisch / pneumatisch betriebener Aktor

Bei einem pneumatisch oder hydraulisch betriebenen Mikroaktor (im folgenden als druckbetriebener Aktor bezeichnet) wird analog zu makroskopischen Kolbenmaschinen auf den beweglichen Kolben eine Kraft F ausgeübt, die proportional zur Druckdifferenz Δp an gegenüberliegenden Kolbenfläche ist. Das Aktorprinzip konnte von Sniegowski [Sni 91] in einer mikromechanisch gefertigten Dampfmaschine auf Silicium-Basis umgesetzt werden. Die mit diesem Aktor erzielten Stellwege liegen bei 20 μm , die Kräften bei 0.6 μN . Durch Verdampfen einer Flüssigkeit wird der für den Antrieb des Aktors benötigte Druck erzeugt.

Legt man bei dem für das Mikroprüfsystem zu realisierenden Aktor eine Kolbenquerschnittsfläche von $200 \times 500 \mu\text{m}^2$ zugrunde, so wirkt bereits bei einer Druckdifferenz von 2000 hPa eine Kraft von 20 mN auf den Kolben. Sofern Reibungskräfte vernachlässigbar sind, kann diese Kraft vollständig auf die Probe übertragen werden. Die Kraft ist dabei unabhängig vom Stellweg des Aktors, der wiederum nur von der Geometrie des Aktors abhängig ist. Bezogen auf die übertragbaren Kräfte kann der Aktor zudem sehr kompakt ausgelegt werden.

Alternative Aktorprinzipien

Alternativ zu obigen Aktorprinzipien werden derzeit in Dünnschichttechnik unter anderem magnetostruktive oder piezoelektrische Aktoren und Aktoren mit Formgedächtnislegierungen entwickelt (siehe Tab. 3.1). Die Kraftübertragung bei den magnetostruktiven und piezoelektrischen Aktoren erfolgt dabei senkrecht zur aktiven Schicht, d.h. senkrecht zur Substratebene. Die Umsetzung dieser Aktorprinzipien im Mikroprüfsystem scheitert daher am Herstellungsaufwand, der durch das eigentliche Funktionsprinzip dieser Dünnschichtaktoren bedingt ist.

Die obigen Überlegungen zeigen deutlich, daß im wesentlichen der druckbetriebene Aktor für den Einsatz im Mikroprüfsystem in Betracht kommt. Die erforderlichen Kräfte und Stellwege können ohne Probleme realisiert werden. Zudem ist die Kraft, die auf die Probe übertragen wird, unabhängig vom Stellweg des Aktors. Als weiterer Vorteil kann der Aktor relativ kompakt gestaltet werden. Im folgenden wird die konstruktive Umsetzung des druckbetriebenen Mikroaktors und die Konzeption eines Testaktors dargestellt.

3.3.2 Umsetzung des druckbetriebenen Aktorprinzips

Die Umsetzung des druckbetriebenen Aktorprinzips in LIGA-Technik gestaltet sich relativ einfach, da das LIGA-Verfahren als entscheidenden Vorteil in diesem Anwendungsfall extrem glatte und senkrechte Strukturwände liefert. Zudem konnte die Funktionsfähigkeit pneumatisch betriebener LIGA-Mikroturbinen [Wal 92] bereits nachgewiesen werden. Im Gegensatz zum makroskopischen Analogon weist der druckbetriebene Mikroaktor herstellungsbedingt im wesentlichen eine 2-dimensionale Struktur auf. In Abb. 3.3 ist das Funktionsprinzip eines derartigen Mikroaktors schematisch dargestellt. Er besteht im wesentlichen aus einem Kolben, der sich innerhalb eines nach oben geschlossenen Kanals bewegen kann. Der Stellweg des Kolbens ist nur von der Geometrie des Aktors abhängig und unterliegt ansonsten keinerlei Beschränkungen. Der Flächenbedarf beschränkt sich im wesentlichen auf die Größe des Kolbens und den Bereich des Kolbenkanals.

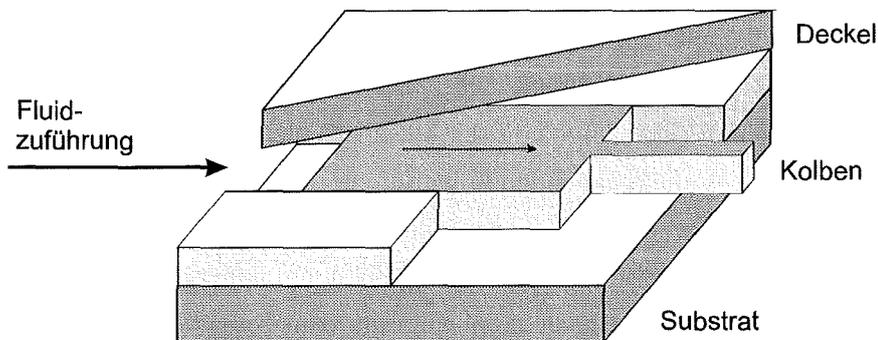


Abb. 3.3: Schematische Darstellung eines hydraulisch oder pneumatisch betriebenen Mikroaktors (die Deckplatte ist nur teilweise dargestellt).

Um dieses Aktorprinzip in einem Mikroaktor umsetzen zu können, müssen die folgenden Punkte erfüllt werden:

- Der Spalt zwischen Kolben und Kolbenkanal muß so gering wie möglich ausfallen, um die Leckrate des Antriebsmediums zu minimieren, da beim Mikroaktor im Gegensatz zum makroskopischen Analogon keine Dichtringe o.ä. eingesetzt werden können.
- Um den Deckel möglichst dicht auf den Aktor aufbringen zu können, muß die Oberfläche der Aktorstrukturen eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit und über eine Fläche von ca. $2 \times 2 \text{ mm}^2$ eine zu vernachlässigende Welligkeit aufweisen.
- Der bewegliche Kolben sollte geringfügig niedriger als der Kolbenkanal ausfallen. Neben glatten Seitenwänden muß die Ober- und Unterseite des Kolbens ebenfalls eine geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen, um die Gleitreibung im Kanal zu verringern.

Diese Anforderungen können durch herstellungstechnische und konstruktive Maßnahmen erfüllt werden:

- Im Gegensatz zu den Mikroturbinen [Wal 92], die einen Spalt zwischen den Turbinenschaufeln und der Seitenwand von ca. 10 μm aufweisen, ist die direkte Herstellung der Kolben innerhalb des Kolbenkanals nicht möglich. Dies ist bedingt durch die Tatsache, daß für die dünnen Spalte zwischen Kolben und Seitenwand bei der Herstellung 1-2 μm breite und ca. 1 mm lange Stege in der PMMA-Negativstruktur vorhanden sein müßten. Diese Stege sind bei einer Strukturhöhe von bis zu 300 μm jedoch zu instabil. Um dennoch die geforderte geringe Spaltbreite zu erzielen, werden die Kolben außerhalb des Kolbenkanals gefertigt und in einem späteren Prozeßschritt manuell in den Aktor eingesetzt.
- Die Oberfläche der galvanisierten Struktur ist nach der Herstellung rau und die Strukturen weisen je nach Position auf dem Substrat unterschiedliche Höhen auf („Badewanneneffekt“ [Kiw 94]). Durch Diamantfräsen⁷ können diese Unebenheiten ausgeglichen und eine Oberflächenrauigkeit im Bereich von 40 nm erzielt werden.
- Die glatte Oberseite des Kolbens wird ebenfalls durch Diamantfräsen erzielt. Die Rauigkeit der Unterseite hängt von der Beschaffenheit des Substrats ab und kann nur durch die Wahl eines entsprechenden Substratmaterials beeinflusst werden.
- Kolben und Aktoren werden auf die gleiche Gesamthöhe, ausgehend von der Galvanikstartschicht, diamantgefräst. Da sich die Kolben auf einer 5 μm dicken Opferschicht befinden, haben die Kolben nach dem Ablösen vom Substrat eine um 5 μm geringere Höhe (siehe Herstellungsverfahren Kap. 4).

Um die Realisierbarkeit des gewählten Aktorprinzips aufzuzeigen, wurde das in Abb. 3.4 dargestellte Mikrosystem entworfen [Wei 93] und im Zuge dieser Arbeit in LIGA-Technik hergestellt und getestet [Rut 94]. Es dient der Charakterisierung des druckbetriebenen Aktors. Bei diesem System wird der Aktor zusammen mit einem Testsystem hergestellt, das aus einem Biegebalken und einem Faserführungsschacht für die optische Wegmessung besteht. Diese Kombination aus Aktor und Aktortestsystem kann als Prototyp für das Mikroprüfsystem angesehen werden, was dadurch gerechtfertigt wird, daß man bei Austausch des festen Biegebalkens durch eine Probenhalterung ein - wenn auch einfaches - Mikroprüfsystem erhält.

Der Mikroaktor besteht aus dem zweiteiligen Aktorgehäuse, das nach der Herstellung nach oben offen ist und über eine Deckplatte verschlossen werden muß. Das äußere und innere Aktorgehäuse werden durch die sog. Stopfnut voneinander getrennt. Diese verhindert bei der Montage des Deckels durch Verkleben (siehe Kap. 4) das Vordringen des Klebstoffs bis zum Kolben. Die Fluidversorgung des Aktors kann über ein Loch im Substrat erfolgen, das im Bereich der Aktorkammer angebracht ist. Es zeigte sich jedoch, daß das Substrat beim Ver-

⁷ Die einzige Einschränkung dieses zusätzlichen Prozeßschritts ist, daß das System aus Kupfer oder Gold gefertigt werden muß. Bei Nickel werden die Standzeiten der verwendeten Diamanten drastisch reduziert, so daß Diamantfräsen bei Nickel nicht sinnvoll ist.

pressen der Deckplatte häufig Risse bildete, die von diesem Loch ausgingen. Für die Lösung dieses Problems wurde das Opferstrukturverfahren entwickelt (siehe Kap. 4, [Rut 95]), mit dem Mikrotunnel hergestellt werden, die parallel zum Substrat durch die Seitenwände des Aktors verlaufen (siehe Abb. 3.4). Die Mikrotunnel bieten den entscheidenden Vorteil, daß die Fluidversorgung in der Substratebene erfolgt und sich somit der Montageaufwand erheblich vereinfacht. Zudem können mit dem Opferstrukturverfahren die Mikrotunnel bei allen Aktoren eines Substrats parallel gefertigt werden.

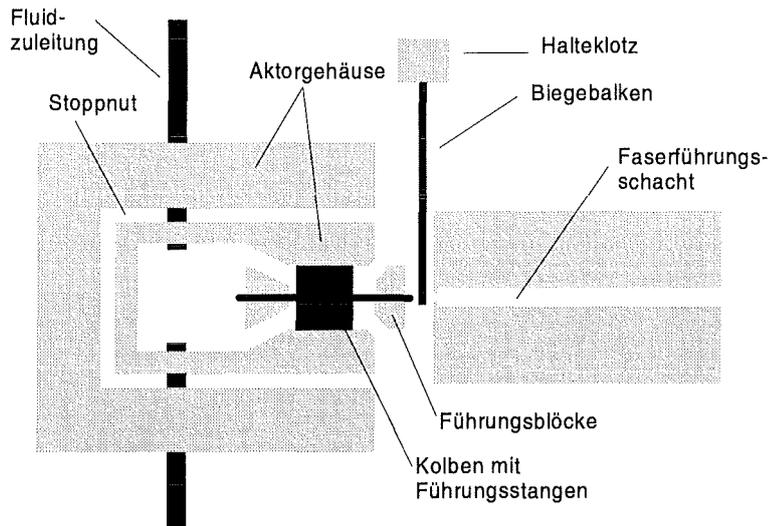


Abb. 3.4: Testsystem für den druckbetriebenen Mikroaktor. Die beweglichen Bereiche der Struktur und die Fluidzuleitungen sind schwarz dargestellt.

Der bewegliche Kolben, der einen Spalt zu den Seitenwänden des inneren Aktorgehäuses im Bereich von 1 bis 2 μm aufweist, kann sich parallel zum Substrat zwischen den beiden Führungsblöcken bewegen. Um ein Verkanten des Kolbens innerhalb des Kolbenkanals zu verhindern, mußte dieser entsprechend lang ausgelegt werden. Um dabei die Kolbengrundfläche möglichst klein halten und die Reibung minimieren zu können, wurde der Kolben mit Führungsstangen ausgestattet, die innerhalb der Führungsblöcke geführt werden. Die Führungsstange, die aus dem Aktor herausragt, wird zur Übertragung der Kraft auf die Biegeprobe verwendet. Die Führungsstange ist dabei so ausgelegt, daß bei den auftretenden Kräften ein Knicken der Führungsstange ausgeschlossen werden kann. Der Stellweg des Kolbens innerhalb des Kolbenkanals liegt bei max. 200 μm , wobei der Biegebalken so angeordnet ist, daß dieser nur um maximal 50 μm ausgelenkt werden kann.

Der Biegebalken, der im Testsystem zur Messung der übertragenen Kraft verwendet wird, hat eine Länge von 1550 μm und ist über den Halteklotz mit einer Fläche von 350 x 300 μm^2 fest mit dem Substrat verbunden. Der bewegliche Teil des Balkens wird mit Hilfe des Opferstrukturverfahrens realisiert (siehe Herstellung und Montage, Kap. 4) und besitzt daher eine um die Dicke der Opferschicht verminderte Höhe gegenüber dem Halteklotz.

Der Faserführungsschacht dient der exakten Positionierung einer Lichtleitfaser, die zur Detektion der Balkenverbiegung verwendet wird (siehe Kap. 3.4.2). Hierbei wird durch die Faser Licht an die Probe herangeführt und an dieser in die Faser zurückreflektiert. Aus der relativen Änderung der reflektierten Intensität kann auf die Balkenverbiegung geschlossen werden.

3.4 Sensorik

Für die Bestimmung des Elastizitäts-Moduls mit Hilfe des Mikroprüfsystem muß in einem Biegeexperiment die auf die Probe einwirkende Kraft F und die hierdurch verursachte Probendeformation f bestimmt werden.

In den folgenden Kapiteln wird die Konzeption der hierfür erforderlichen Meßaufnehmer beschrieben. Es wurden verschiedene Aufnehmerprinzipien hinsichtlich Herstellungsbedingungen und charakteristischen Abmessungen untersucht, die durch das LIGA-Verfahren vorgegebenen sind. Die Kombinationsmöglichkeit neuer Materialien und Herstellungsschritte mit dem LIGA-Verfahren, sowie Prozeßsicherheit und Herstellungs- und Montageaufwand standen dabei im Vordergrund.

3.4.1 Kraftmessung

Die auf den Kolben wirkende Kraft F kann im Mikroprüfsystem über den Druck p in der Aktorkammer und die Kolbenquerschnittsfläche A_{Kolben} nach $F = p \cdot A_{\text{Kolben}}$ bestimmt werden. Geht man von einer Genauigkeit bei der Druckmessung im Bereich von 20 hPa und bei der Bestimmung der Kolbenquerschnittsfläche von 10^{-10} m^2 aus, so ergibt sich eine Genauigkeit in der Kraftmessung von ca. 400 μN . Können Reibungseinflüsse vernachlässigt werden, so ist die auf den Kolben wirkende Kraft identisch mit derjenigen, die auf den Prüfling einwirkt. Hierbei muß allerdings vorausgesetzt werden, daß der Druck in der Aktorkammer gemessen werden kann. Da je nach Antriebsfluid die Leckrate und damit der Druckverlust in der Zuleitung (siehe Kap. 5) nicht mehr vernachlässigt werden kann, soll die Kraftmessung beim Mikroprüfsystem nicht indirekt über den Druck erfolgen. Die Ermittlung der Kraft über eine Druckmessung wird allerdings zu Kontrollzwecken angewandt.

Die direkte Kraftmessung muß durch Integration eines entsprechenden Kraftsensors auf dem Kolben erfolgen, so daß als Konsequenz der Kolben im Mikroprüfsystem zwei Funktionen erfüllen muß. Wie bereits beim Testaktor wird mit dem Kolben die Kraft zur Prüfung auf die Mikrobalken übertragen, die nun direkt mit den Mikrokolben gemessen werden kann. Dies bedeutet, daß der Kolben im Mikroprüfsystem neben seiner Funktion im Aktor als bewegliches Bauteil noch eine sensorische Aufgabe übernimmt.

3.4.1.1 Funktionsprinzip der Kolben

Die Grundidee für diesen sog. Kraftmeßkolben besteht darin, daß im für sich genommen beweglichen Kolben ein bewegliches Teilelement integriert wird. Dieses Element ist elastisch im Kolben gelagert, wobei der Stempel für die Kraftübertragung mit diesem Element starr verbunden ist. Bei der Bewegung des Kolbens gegen die Biegeprobe wird das bewegliche Element innerhalb des Kolbens verschoben und damit die elastische Aufhängung entsprechend der angelegten Kraft verformt. Über die Deformation der elastischen Aufhängung bzw. die Relativbewegung des beweglichen Teilelements im Kolben kann auf die übertragene Kraft geschlossen werden.

Bei der Auslegung des Kolbens und der elastischen Aufhängung müssen die Anforderungen berücksichtigt werden, die sich aus der Versuchsdurchführung bei der Wegmessung ergeben (siehe Kap. 3.4.2.1). Da die Probendeformation indirekt über einen am Kolben befestigten Ausleger bestimmt wird, muß die Relativbewegung des beweglichen Teilelements, das die Kraft auf die Probe überträgt, minimal ausfallen. Als obere Grenze für die Relativbewegung werden 500 nm festgesetzt.

Das grundlegende Design des Kraftmeßkolbens ist in Abb. 3.5 dargestellt. Der Kolben besteht aus dem Rahmen R innerhalb dessen der Anker A als bewegliches Teilelement verschoben werden kann. Der Anker ist über die beiden Aufhängungen Au1 und Au2 elastisch mit dem Rahmen verbunden. Der Stempel S zur Kraftübertragung auf die Biegeprobe ist starr mit dem Anker verbunden. Der Ausleger für die Wegmessung wird am Rahmen angebracht sein (siehe Abb. 3.7). Bei der Bewegung des Kolbens gegen ein Hindernis wird aufgrund der auf den Kolben einwirkenden Kraft F und der entsprechenden Gegenkraft F^* der Anker innerhalb des Rahmens nach links verschoben (siehe Abb. 3.5).

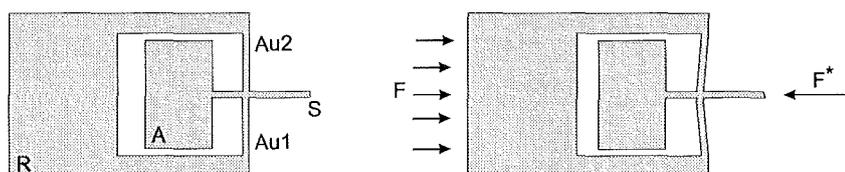


Abb. 3.5: Schematische Darstellung des Grunddesigns für den sog. Kraftmeßkolben. Die Verschiebung des beweglichen Elements ist überhöht dargestellt.

Für die Bestimmung der Kraft, die auf den Stempel S wirkt, kann die Relativbewegung des Ankers oder die Verbiegung der Aufhängungen verwendet werden. Die Verbiegung der Aufhängung könnte, wie in makroskopischen Messung angewandt, über piezoelektrische Schichten P bestimmt werden. Da diese Schichten senkrecht zur Substratebene auf den elastischen Aufhängungen angebracht werden müßten (siehe Abb. 3.6a), scheidet eine Umsetzung dieses Meßprinzips an der Dimension der Kolben.

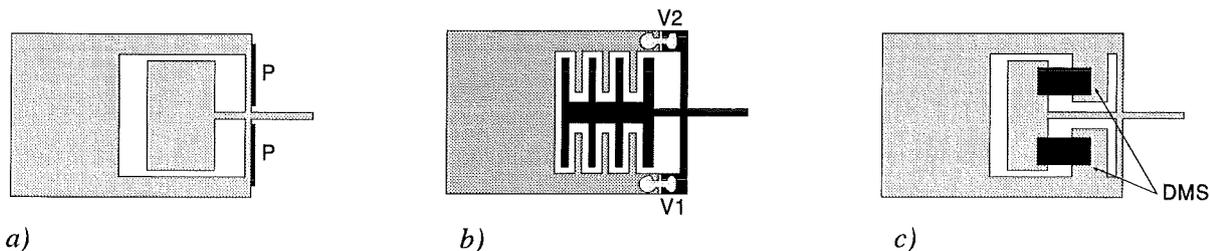


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Kraftmeßkolbens. a) Kraftmessung über piezoelektrische Schichten P, b) kapazitive Messung der Relativbewegung des Ankers, c) Messung der Relativbewegung des Ankers über DMS. Der Kraftmeßkolben übernimmt sowohl sensorische als auch aktorische Aufgaben.

Die Messung der Relativbewegung des Ankers kann einfacher realisiert werden. Eine Möglichkeit besteht in der kapazitiven Auswertung der Relativbewegung. Hierbei wird die Kombination aus Rahmen und Anker als Plattenkondensator ausgebildet. Die beiden Komponenten müßten dabei über PMMA-Verbindungsstücke (V1 und V2 in Abb. 3.6b) mechanisch miteinander verbunden, jedoch elektrisch voneinander isoliert sein. Diese PMMA-Verbindungsstücke müßten über eine zweite justierte Synchrotronbestrahlung hergestellt werden. Neben dem hohen Herstellungsaufwand spricht gegen dieses Meßprinzip die erreichbare Grundkapazität der Anordnung, die direkt in die Auflösung bei der Kraftmessung eingeht.

Die Bewegung des Ankers innerhalb des Rahmens wird daher in Anlehnung an makroskopische Kraftmeßdosen über Dehnmeßstreifen (DMS) ermittelt. Diese DMS verbinden zusätzlich zu den elastischen Aufhängungen Au1 und Au2 den Rahmen mit dem Anker (siehe Abb. 3.6c). Wird der Anker innerhalb des Rahmens verschoben, so kommt es zu einer Dehnung der DMS, die proportional zur anliegenden Kraft ist und die über die Widerstandsänderung des DMS detektiert werden kann.

3.4.1.2 Auslegung der Kolben

Vorversuche ergaben, daß die Herstellung der DMS auf Mikrostrukturen gesichert ist (siehe Kap. 5). Daher wurde der Kraftmeßkolben aufbauend auf obiges Funktionsprinzip ausgelegt, wobei neben herstellungs- und meßtechnischen Erfordernissen auch Anforderungen von Seiten der Aufbau- und Verbindungstechnik beachtet wurden. Die wesentlichen Randbedingungen sind im folgenden aufgeführt:

- Da der Aktor des Mikroprüfsystem ähnliche Dimensionen wie der Testaktor aufweisen sollte, wurde die Kolbenbreite b_{Kolben} auf $600 \mu\text{m}$ beschränkt. Ebenso wurde die maximale Länge L_{Kolben} auf $1500 \mu\text{m}$ festgesetzt (beim Prototyp: $b_{\text{Kolben}} = 450 \mu\text{m}$, $L_{\text{Kolben}} = 1200 \mu\text{m}$).
- Um bei der Herstellung eine gewisse Prozeßsicherheit gewährleisten zu können, wurde die minimale Breite von freistehenden Wänden in der Negativstruktur aus PMMA auf $25 \mu\text{m}$ beschränkt. Entsprechende Gräben sollten ebenfalls nicht schmaler als $25 \mu\text{m}$ ausfallen, um hier die Entwicklungszeiten für das PMMA nicht zu stark zu erhöhen.

- Aufgrund der einfacheren Verfügbarkeit von Gold wird dieses trotz des hohen Temperaturgradienten als Mäander-Material verwendet. Zur Temperaturgangkompensation wird dann im Mikroprüfsystem der DMS eines zweiten Kraftmeßkolbens als Referenzwiderstand in der Wheatstone'schen Meßbrücke verwendet (siehe Anhang).
- Die Kolben werden so ausgelegt, daß bei einer maximalen Kraft von 30 mN die Dehnung des DMS innerhalb des elastischen Bereichs liegt. Als Vorgabe wurde eine maximale Dehnung von 0.2 % festgesetzt.

Das realisierte Design des Kraftmeßkolbens ist in Abb. 3.7 dargestellt. Der Kraftmeßkolben besteht aus einem Grundkörper R aus Kupfer, einer Gold-Mäander, die den metallischen DMS bildet und einer Trägerfolie aus Polyimid, die die Isolation des Mäander-Materials gegenüber dem metallischen Grundkörper gewährleistet. Der Anker A ist über die gefalteten Blattfedern F1 und F2 elastisch mit dem Grundkörper R verbunden.

Die Polyimidmembran P, die den metallischen DMS trägt, überspannt zwischen Rahmen und Anker einen Bereich von 100 μm . Im Unterschied zu dem in Abb. 3.6c dargestellten Grunddesign des Kraftmeßkolbens wird der Anker beidseitig über die Membran mit dem Rahmen verbunden. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, daß die Membran nach der Herstellung unter Zugspannung steht. Durch die beiden Polyimidstreifen wird der Anker innerhalb des Rahmens in einer mittleren Position stabilisiert.

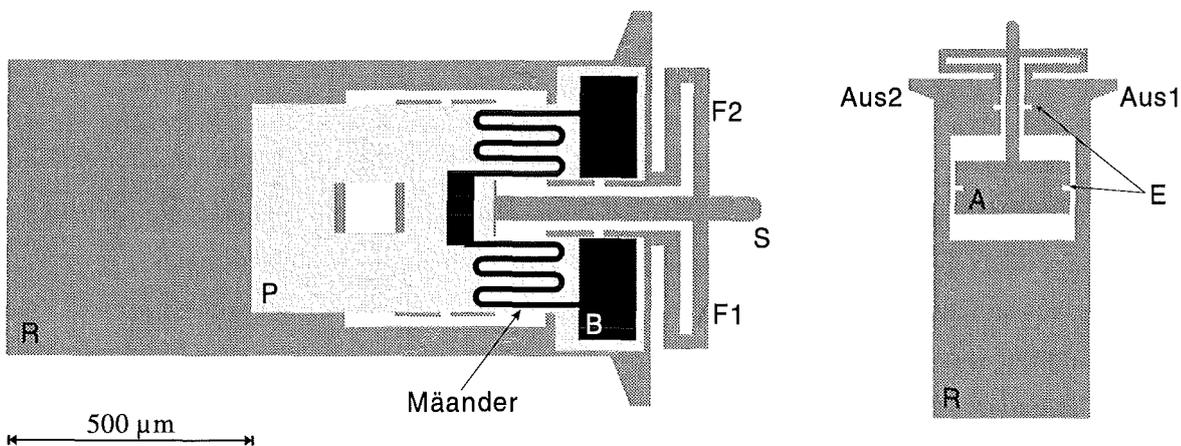


Abb. 3.7: Realisiertes Design des Kraftmeßkolbens mit einem Grundkörper aus Kupfer, einer DMS-Mäander aus Gold und der Trägerfolie und Isolationsschicht aus Polyimid. Die Ausleger Aus1 und Aus2 werden für die Wegmessung benötigt. Rechts ist nochmals der Grundkörper des Kolbens ohne DMS dargestellt.

Für die elektrische Kontaktierung der Mäander sind zwei Bondpads B auf der Polyimidmembran angebracht. Die Bondpads besitzen eine laterale Ausdehnung von 100 x 200 μm . Die Bereiche des Mäander-Materials, die sich auf dem Grundkörper befinden und somit nicht gedehnt werden, sind entsprechend breit strukturiert, um deren elektrischen Widerstand möglichst klein zu halten.

Am Grundkörper sind zwei Ausleger (Aus1 und Aus2) angebracht, die zur Messung der Kolbenbewegung mit Hilfe der optischen Wegmeßeinheit benötigt werden (siehe Kap. 3.4.2.1). Die Einkerbungen E1 und E2 im Bereich des Ankers und des Stempels sind aus Stabilitätsgründen integriert worden, um die schmalen Stege der PMMA-Negativstruktur in diesen Bereichen während der Herstellung abzustützen.

Zur konstruktiven Auslegung der Kolbengeometrie wurden die Federkonstanten D der Einzelemente wie Federaufhängung, Polyimidmembran und DMS-Mäander berechnet. Dabei wird der Kolben so ausgelegt, daß die Einzelemente nicht plastisch deformiert werden. Mit

$$D = \frac{F}{\Delta L} \quad \text{und} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{E \cdot A} \quad (3.4)$$

wobei ε die Dehnung, E der Elastizitäts-Modul und A die Fläche senkrecht zur Kraft F sind, folgt für die Federkonstante: $D = \frac{E \cdot A}{L}$ (3.5)

Werden die Elemente, wie im Fall des Kraftmeßkolbens, in einem System parallel angeordnet, so ergibt sich die Gesamtfederkonstante D_{ges} des Systems als Summe der Einzelfederkonstanten. Für die Federkonstante der Mäander $D_{Mä}$ und der Membran D_{Me} ergeben sich die folgenden Abhängigkeiten:

$$D_{Mä} = \frac{E_{Mä} \cdot A_{Mä}}{L_{Mä}} \quad \text{mit} \quad A_{Mä} = N \cdot b_{Mä} \cdot h_{Mä} \quad (3.6)$$

$$D_{Me} = \frac{E_{Me} \cdot A_{Me}}{L_{Me}} \quad \text{mit} \quad A_{Me} = 2 \cdot h_{Me} \cdot b_{Me} \quad (3.7)$$

wobei E_i das Elastizitäts-Modul, b_i die Breite, h_i die Höhe und A_i die Fläche des entsprechenden Elements bedeutet. In Gleichung (3.6) ist N die Anzahl der Leiterbahnen, die die Mäander des DMS bilden. Da aus Stabilitätsgründen der Anker über die Membran beidseitig mit dem Rahmen verbunden ist (siehe Abb. 3.7), muß der Faktor 2 bei der Membranfläche berücksichtigt werden ⁸.

Für die Federkonstanten D_{F1} und D_{F2} der gefalteten Blattfedern F1 und F2 gilt jeweils:

$$\frac{1}{D_{Fi}} = \frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \quad \text{mit} \quad D_i = \frac{E h b^3}{4 L_i^3} \quad \text{und} \quad i=1, 2 \quad (3.8)$$

wobei sich D_i direkt aus den Gleichungen (3.1) und (3.3) für den Biegebalken ergibt. Mit $D_F = D_{F1} + D_{F2}$ gilt:

$$D_F = \frac{E h b^3}{2 (L_1^3 + L_2^3)} \quad (3.9)$$

⁸ Dieser Faktor ergibt sich aus der Tatsache, daß die Membran, die nach der Herstellung unter Zugspannung steht, auf beiden Seiten des Ankers gleich dimensioniert ist und es bei der Dehnung einer Membranhälfte zur Stauchung der zweiten Hälfte kommt.

Anhand dieser analytischen Betrachtungen und unter Berücksichtigung der Herstellungsparameter, sowie Geometrievorgaben ergeben sich die in Tab. 3.2 aufgelisteten Größen der einzelnen Komponenten:

| | Feder | Membran | Mäander |
|---------------------------------|--------------|----------|---------|
| Material | Cu | Polyimid | Au |
| Höhe $h / \mu\text{m}$ | 200 | 1.4 | 0.25 |
| Breite $b / \mu\text{m}$ | 32 bzw. 43 | 300 | 5 |
| $L / \mu\text{m}$ | 820 | 100 | 100 |
| E-Modul / 10^9 N/mm^2 | 125 | 2 | 200 |
| N | - | - | 26 |
| $D / 10^4 \text{ N/m}$ | 2.3 bzw. 5.5 | 1.7 | 6.7 |

Tab. 3.2: Auslegung der Geometrieparameter für die DMS-Kolben (D die Federkonstante der Elemente, N Anzahl der Leiterbahnen für die DMS-Mäander).

Mit den obigen Parametern ergibt sich für die Gesamtsteifigkeit des Kolbens:

$$D_{ges} = 10.7 \cdot 10^4 \text{ N/m} \quad \text{für} \quad b_F = 32 \mu\text{m} \text{ bzw.}$$

$$D_{ges} = 13.9 \cdot 10^4 \text{ N/m} \quad \text{für} \quad b_F = 43 \mu\text{m}$$

Um die DMS-Mäander in deren elastischem Bereich zu betreiben, wurde die maximale Dehnung der Mäander auf 0.2 % festgelegt, d.h. der 100 μm breite Bereich der DMS-Mäander zwischen Rahmen und Anker darf um maximal 200 nm gedehnt werden. Mit Gleichung (3.4) kann die erforderliche Gesamtfederkonstante D_{ges}^{max} des Kraftmeßkolbens als Funktion der anliegenden Kraft F berechnet werden.

| | | | | |
|------------------------------------|----|----|----|----|
| Kraft / mN | 10 | 20 | 30 | 40 |
| $D_{ges}^{max} / 10^4 \text{ N/m}$ | 5 | 10 | 15 | 20 |

Tab. 3.3: Gesamtfederkonstante D_{ges}^{max} des Kraftmeßkolbens, die erforderlich ist, um eine maximale Dehnung der Gold-Mäander im Bereich von 0.2 % bei Anliegen der Kraft F zu gewährleisten.

Tab. 3.3 kann entnommen werden, daß bei einer Federbreite von 43 μm Kräfte bis ca. 30 mN gemessen werden können, ohne die maximal zulässige Dehnung der Gold-Mäander zu überschreiten. Bei einer Federbreite von 32 μm liegt diese Maximalkraft bei 20 mN.

3.4.1.3 Thermisches Verhalten des Kolbens

Ändert sich während der Messung die Umgebungstemperatur des Mikroprüfsystems, kommt es zu einer Widerstandsänderung im DMS, die als „scheinbare“ mechanische Belastung des Kolbens interpretiert wird. Die Ursache für die Widerstandsänderungen liegt in einer isotropen Ausdehnung des Kolbengrundkörpers sowie in der Änderung des spezifischen Widerstands des Mäander-Materials.

Bedingt durch einen von Null verschiedenen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α kommt es bei einer Temperaturerhöhung ΔT zu einer isotropen Ausdehnung ΔL des Grundkörpers (für Kupfer gilt: $\alpha_{Cu} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Der DMS, der fest mit dem Grundkörper verbunden ist und im Bereich des Ankers freitragend gespannt ist, wird dabei ebenfalls gedehnt.

Das Temperaturverhalten der DMS-Mäander zeigt einen analogen Verlauf, wobei die Widerstandsänderung ΔR_{ohm} proportional zum Temperaturkoeffizienten β_0 des Mäander-Materials ist (für Gold gilt: $\beta_0^{Au} = 3.98 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$). Dies bedeutet, daß eine Temperaturerhöhung als scheinbare mechanische Belastung des DMS interpretiert wird.

Der Einfluß einer Temperaturerhöhung auf den elektrischen Widerstand der DMS kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

$$\Delta R_{schein} = \Delta R_{mechan} + \Delta R_{ohm} \quad (3.10)$$

mit
$$\Delta R_{ohm} = \beta_0 \cdot \Delta T \cdot R_0 \quad (3.11)$$

und
$$\Delta R_{mechan} = k \cdot \varepsilon \cdot R_0 = k \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot R_0 \quad (3.12)$$

der Widerstandsänderung ΔR_{mechan} aufgrund der thermischen Verlängerung des Kolbens. k ist hierbei die Dehnungsempfindlichkeit des DMS-Materials.

Unter der Annahme, daß $k = 2$ (siehe Anhang) ergibt sich für die Widerstandsänderung ΔR_{schein} , die als „scheinbare“ mechanische Belastung des Kraftmeßkolbens interpretiert wird:

$$\Delta R_{schein} = 4.03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \Delta T \cdot R_0 \quad (3.13)$$

Da die Widerstandsänderung für $\Delta T = 1 \text{ K}$ bereits die gleiche Größenordnung aufweist, wie sie bei maximaler Belastung des Kraftmeßkolbens erwartet wird, müssen die Temperaturgangseffekte im Meßsignal kompensiert werden. Hierzu werden im Mikroprüfsystem zwei Kolben aus der gleichen Herstellungsserie verwendet, wobei der Meßkolben im Aktor verwendet und mechanisch belastet wird. Der zweite Kolben wird in der Wheatstone'schen Meßbrücke als Referenzkolben eingesetzt. Die Herleitung der Temperaturgangskompensation findet sich in Anhang.

3.4.2 Wegmessung

Für die Konzeption der im Mikroprüfsystem benötigten Wegmeßeinheit ist die Kenntnis der den Messungen zugrunde liegenden Randbedingungen und des eigentlichen Meßverfahrens erforderlich. Da die Wegmeßeinheit ebenfalls im Mikroprüfsystem integriert sein soll und zusammen mit dem Aktor und der Probenhalterung in einem Prozeßschritt auf einem gemeinsamen Substrat hergestellt werden soll, muß das der Wegmeßeinheit zugrunde liegende Meßprinzip kompatibel zum LIGA-Verfahren sein.

Als weitere Randbedingung ist ein Meßbereich von mindestens 30 µm erforderlich, wobei die Auflösung im Bereich von 200 bis 500 nm liegen soll. Zudem muß gewährleistet sein, daß das Meßprinzip an Luft und unter Siliconöl, dem optimalen Arbeitsfluid für den Mikroaktor, funktionsfähig ist.

Ausgehend von diesen Randbedingungen wurden verschiedene Meßprinzipien untersucht und miteinander verglichen. In den folgenden Kapiteln werden die Versuchsdurchführung und die analytischen Abschätzungen und Überlegungen zur Konzeption der einzelnen Meßaufnehmer aufgezeigt.

3.4.2.1 Versuchsdurchführung

Bei der Konzeption der Wegmeßeinheit für die Biegeprüfung muß die Versuchsdurchführung berücksichtigt werden, die sich zunächst in direkte und indirekte Messung der Proben deformation unterteilt. Bei der direkten Messung wird die Auslenkung der Biegeprobe an der Probe selbst detektiert. Hierzu müßte die Probe mechanisch mit dem Meßaufnehmer verbunden werden, was am Herstellungs- und Montageaufwand scheitert. Alternativ könnte die Bewegung der Probenoberfläche optisch erfaßt werden. Erfahrungen mit dem Testaktor zeigten jedoch, daß eine derartige optische Meßeinheit schwer zu kalibrieren ist (siehe Kap. 3.4.2.2).

Daher soll die Probenverbiegung indirekt über die Kolbenbewegung ermittelt werden. Hierbei muß die Möglichkeit bestehen, den Berührungspunkt zwischen Probe und Kolben bestimmen zu können, was mit der Verwendung der Kraftmeßkolben erfüllt ist. Um diese indirekte Messung realisieren zu können, soll eine elastisch gelagertes Gestänge zusammen mit dem Aktor hergestellt werden. An diesem Gestänge ist der eigentliche Meßaufnehmer befestigt. Im Experiment verschiebt der Kolben, der zu diesem Zweck mit einer Art Ausleger ausgestattet ist (siehe Abb. 3.7), das Gestänge bis es nach einer gewissen „Einlaufstrecke“ zum Kontakt zwischen Kolben und Probe kommt. Hier wird dann die eigentliche Wegmessung gestartet. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, daß das Gestänge über eine externe Vorrichtung verschoben und die Wegmeßeinheit so kalibriert werden kann.

3.4.2.2 Meßaufnehmer

Kapazitiver Meßaufnehmer

Beim kapazitiven Meßprinzip wird durch die Bewegung einer Kondensatorplatte gegenüber einer zweiten die Kapazität des Kondensators verändert. Die in Abb. 3.8 dargestellten Anordnungen wurden hinsichtlich ihrer Grundkapazitäten abgeschätzt. Legt man willkürlich für den Meßaufnehmer eine Grundfläche des von $1200 \times 2400 \mu\text{m}^2$ zugrunde, so ergeben sich für die Anordnung a) bzw. b) Grundkapazitäten⁹ von 1.1 pF bzw. 17 pF. Diese ändern sich bei Bewegung der Kondensatorplatten um $150 \text{ fF}/\mu\text{m}$ bzw. $15 \text{ fF}/\mu\text{m}$. Mit einer Auflösung in der Kapazitätsmessung von 10 fF ergeben sich hiermit Genauigkeiten in der Wegmessung von ca. 100 nm bzw. 700 nm.

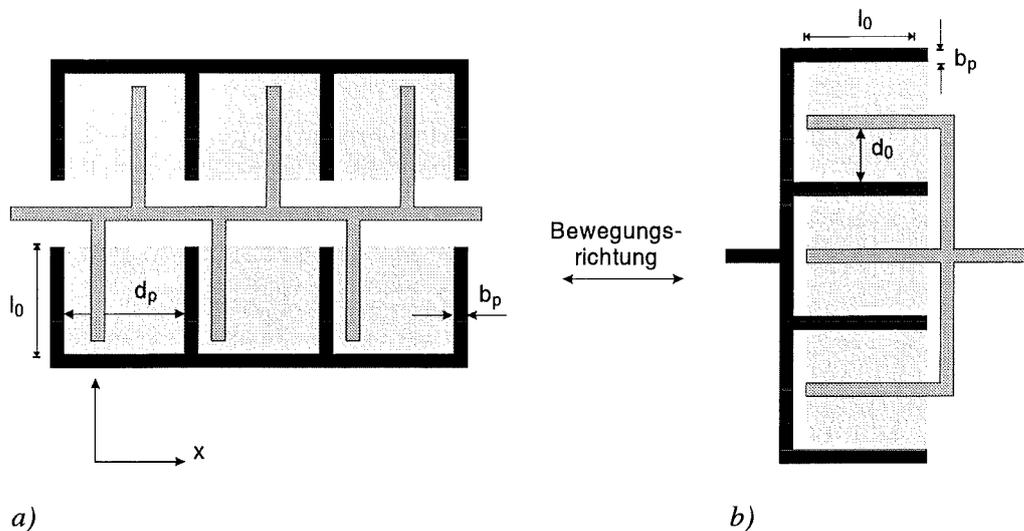


Abb. 3.8: Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Wegaufnehmers. Die für die Abschätzung der Kapazität zugrunde gelegte Fläche ist hellgrau dargestellt. Die beweglichen Kondensatorplatten sind in grau dargestellt, die feststehenden in schwarz.

Bei der Realisierung eines kapazitiven Wegaufnehmers muß berücksichtigt werden, daß die bei der Abschätzung zugrundegelegte Fläche von $1200 \times 2400 \mu\text{m}^2$ nur den Meßaufnehmer beinhaltet. Dieser muß jedoch an Federelementen gelagert werden, wodurch der Platzbedarf nochmals erheblich vergrößert wird.

Induktiver Meßaufnehmer

Bei makroskopischen Meßeinrichtungen, wie z.B. dem Nanoindenter, werden induktive Wegmeßsysteme verwendet. Durch die Bewegung eines Permanentmagneten in einer Spule ändert sich deren Selbstinduktivität.

Die Realisierung eines solchen Meßaufnehmers ist in LIGA-Technik prinzipiell möglich. In der Arbeit von Rogge [Rog 96] wurden Mikrospulen integriert hergestellt und für den Antrieb

⁹ Bei der Abschätzung wurde eine Systemhöhe von $200 \mu\text{m}$ und ein minimaler Plattenabstand von $10 \mu\text{m}$ vorausgesetzt. Bei Anordnung a) liegt eine nichtlineare Kennlinie der Kapazität als Funktion des Stellwegs vor, bei Anordnung b) ist diese linear.

eines elektromagnetischen Mikrorelais verwendet. Da die Selbstinduktivität einer Spule proportional zum Quadrat ihrer Windungszahl ist, besitzt die Wegauflösung des induktiven Meßfühlers die gleiche Proportionalität. Da mit dem LIGA-Verfahren nur kleine Windungszahlen zu realisieren sind, läßt sich mit einem induktiven Meßfühler eine vergleichsweise geringe Wegauflösung erzielen. Zudem spricht das vergleichsweise komplexe Herstellungsverfahren gegen dieses Meßprinzip.

Optische Meßaufnehmer

Photoelektrische Meßsysteme

Aus der Längenmessung mit makroskopischen, optischen Meßaufnehmern sind verschiedene Verfahren bekannt [Wal 74], die sich prinzipiell auf Mikrostrukturen übertragen lassen. Hierbei werden Rastermaßstäbe im Durchlicht- oder Auflichtverfahren photoelektrisch abgetastet. Die hierfür benötigten Meßraster, die beim makroskopischen Analogon in Dünnschichttechnik auf Glasstäben hergestellt werden, würden bei einer Realisierung nach dem LIGA-Verfahren einen vergleichsweise großen Rasterabstand aufweisen. Als Konsequenz hiervon ist eine Auflösung im Bereich von 2 μm zu erwarten.

Interferometer

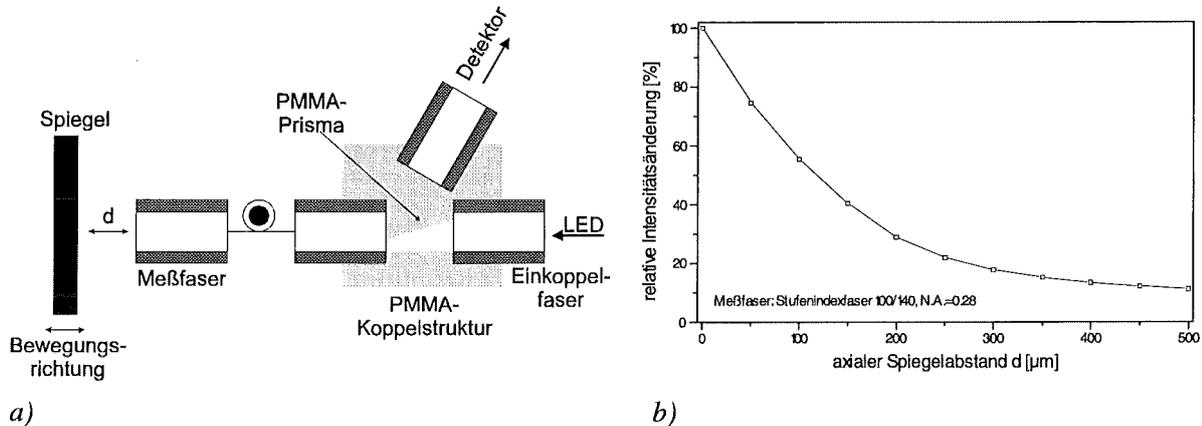
Über ein Interferometer kann eine Auflösung im Sub-100 nm-Bereich realisiert werden [Zap 96]. Hierzu müßte der Spiegel des Meßaufnehmers, der mit dem Gestänge verbunden ist, über ein paralleles Lichtbündel bestrahlt werden. Die Forderung nach einer integrierten Wegmessung bedingt bei dieser Anordnung, daß zusätzliche optische Komponenten zur Realisierung des parallelen Lichtbündels im System integriert werden müßten. Der Herstellungs- bzw. Montageaufwand würde sich hier erheblich vergrößern, weshalb der Einsatz eines Interferometers für das Mikroprüfsystem nicht in Betracht kommt.

Reflexionsverfahren/Freistrahloptik

Bei diesem Verfahren wird eine spiegelnde Oberfläche (d.h. direkt die Probe oder der Meßaufnehmer) mit divergentem Licht beleuchtet, das über eine Lichtleitfaser an die Mikrostruktur geführt wird. Wird der Abstand zwischen spiegelnder Oberfläche und Faserstirnfläche verändert, so variiert die an einem bestimmten Raumpunkt meßbare Lichtintensität. Als Detektor für die reflektierte Intensität dient eine Glasfaser, die das Licht aus der Mikrostruktur zu einem Photodetektor leitet.

Im Testsystem wird ein derartiger optischer Meßaufnehmer verwendet (siehe Abb. 3.9a), in dem das Licht einer LED über die Einkoppelfaser und die Meßfaser mit zwischengeschalteter Koppelstruktur [Göt 92] an die spiegelnde Oberfläche in der Mikrostruktur geleitet wird. An dieser wird das Licht reflektiert und über die Meßfaser zur Koppelstruktur geführt, in der das Licht an einem PMMA-Prisma in die Detektorfaser totalreflektiert wird. Die mit diesem Aufbau ermittelte relative Intensitätsänderung als Funktion des axialen Abstands d zwischen Faserstirnfläche und spiegelnder Oberfläche ist in Abb. 3.9b dargestellt.

Die Auflösung bei der Wegmessung dieses Systems liegt bei ca. $1\ \mu\text{m}$. Der entscheidende Vorteil dieses Meßaufnehmers ist der geringe Herstellungs- und Montageaufwand. Es müssen lediglich Haltestrukturen, die eine exakte Ausrichtung der Glasfasern gewährleisten, und die spiegelnde Oberfläche hergestellt werden.



a) *Abb. 3.9: Meßaufnehmer nach dem Reflexionsverfahren. Das Licht einer LED wird über die Koppelstruktur an die spiegelnde Oberfläche des Meßaufnehmers geleitet. Die gemessene relative Intensitätsänderung als Funktion des axialen Spiegelabstands d ist rechts dargestellt.*

Bei der Auswahl des geeigneten Meßaufnehmerprinzips für die Wegmessung im Mikroprüfsystem wurden der Herstellungs- und Montageaufwand, die Auflösung und der Platzbedarf zugrunde gelegt. Der Vergleich der einzelnen Prinzipien ergab, daß im wesentlichen der kapazitive und der optische Meßaufnehmer in Freistrahloptik in Betracht kommen. Im Vergleich zum optischen weist der kapazitive Aufnehmer jedoch den wesentlichen Nachteil auf, daß er einen relativ großen Platzbedarf aufweist. Bedingt durch das hohe Eigengewicht müßte der Aufnehmer zudem an zwei Seiten elastisch gelagert werden. Dieser Hauptnachteil überwiegt die Vorteile in der Aufbau- und Verbindungstechnik, die durch konventionelles Drahtbonds erfolgen kann und keine justierte Montage weiterer Komponenten erfordert.

Betrachtet man den optischen Aufnehmer (d.h. die spiegelnde Oberfläche) zusammen mit den Haltestrukturen der Lichtleitfasern, so nimmt dieser eine ähnlich große Fläche wie der kapazitive Aufnehmer ein. Die Zwischenräume können jedoch für die Herstellung des Kraftmeßkolbens verwendet werden, die zusammen mit dem Mikroprüfsystem auf einem Substrat fabriziert werden. Somit ist der Platzbedarf bei der Realisation des optischen Aufnehmers deutlich reduziert. Aus diesen Gründen soll ein gegenüber Abb. 3.9a modifizierter optischer Meßaufnehmer im Mikroprüfsystem realisiert werden.

3.4.2.3 Konstruktive Auslegung der optischen Wegmeßeinheit

Für das Mikroprüfsystem werden die in Abb. 3.10 schematisch dargestellten Meßaufnehmer realisiert. Analog zu Abb. 3.9 wird das von der Lichtleitfaser abgestrahlte, divergente Lichtbündel an der spiegelnden Oberfläche reflektiert. Im Gegensatz zur Anordnung in Abb. 3.9 wird die reflektierte Intensität jedoch über zwei Fasern den Photodetektoren zugeführt. Mit den beiden Meßfasern werden zwei unterschiedlich verlaufende Intensitätskurven I_1 und I_2 als Funktion der Spiegelposition gemessen, die sich bei Schwankungen der eingestrahelten Lichtintensität I_{ein} gleich verhalten. Diese Schwankungen wurden bei der Anordnung aus Abb. 3.9a als scheinbare Änderungen im Abstand Faserstirnfläche/Spiegel interpretiert.

Aus den Einzelsignalen kann das normierte Differenzsignal S_{diff}^{norm} berechnet werden:

$$S_{diff}^{norm} := \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (3.14)$$

S_{diff}^{norm} stellt eine eindeutige Funktion des Abstands zwischen Faserstirnfläche und spiegelnder Oberfläche dar. Bei Schwankungen der eingestrahelten Intensität kommt es zwar zu Änderungen in den Einzelsignalen, das normierte Differenzsignal bleibt jedoch unverändert.

Bei Anordnung a) in Abb. 3.10 ist die spiegelnde Oberfläche als 45°-Spiegel ausgebildet. Das Licht wird über die Einkoppelfaser an die Struktur herangeführt und über die Transmissions- und Reflexionsfaser detektiert. Bei der Bewegung des Spiegels in den Strahlengang wird die Transmissionsfaser teilweise abgedeckt, so daß deren Intensität I_{trans} bei der Bewegung des Spiegels von links nach rechts stetig abnimmt. Im Gegenzug wird mit der Bewegung des Spiegels immer mehr Licht in Richtung Reflexionsfaser reflektiert. Die zu erwartenden Koppeleffizienzen, definiert als I_i/I_{ein} , weisen den in Abb. 3.11a dargestellten Verlauf als Funktion der Spiegelposition d auf, der mit einer Raytrace-Simulation ermittelt wurde. In Abb. 3.11a ist zudem das normierte Differenzsignal S_{diff}^{norm} dargestellt.

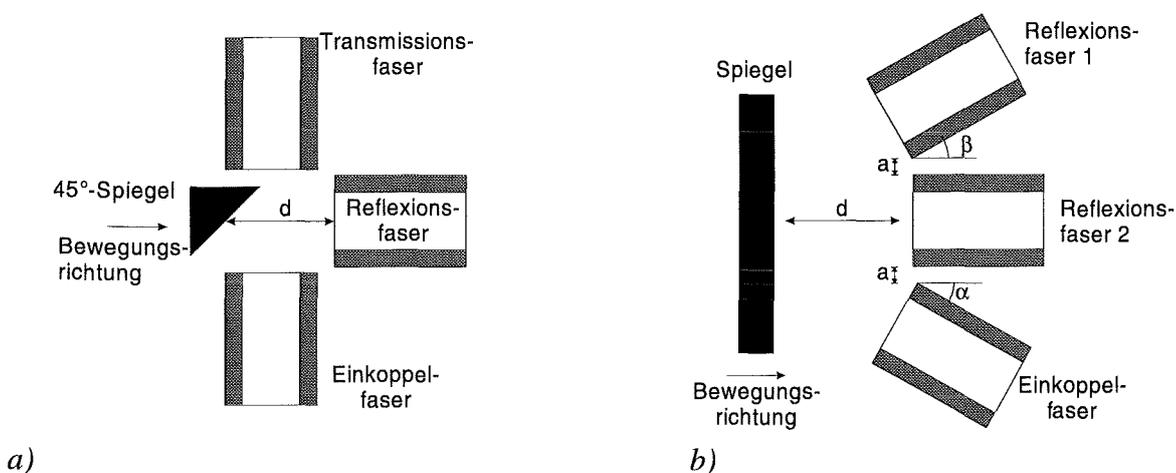


Abb. 3.10: Prinzipieller Aufbau des Meßaufnehmers mit drei Fasern, wobei eine Faser Licht einkoppelt und zwei Fasern zur Auskopplung des reflektierten Lichts verwendet werden, a) mit 45°-Spiegel, b) senkrechter Spiegel.

Ein möglicher Nachteil der Anordnung a) ist, daß es bei einer Änderung der Reflektivität der Spiegeloberfläche (z.B. durch Oxidation) zu einer Reduktion der reflektierten Intensität I_{reflex} kommt, was sich jedoch nur beim Einsatz des Systems über einen längeren Zeitraum ohne zwischenzeitliche Kalibrierung bemerkbar machen wird.

Dieser geringfügige Nachteil der 45°-Anordnung wird durch den in Abb. 3.10b dargestellte Aufbau behoben, bei dem zwei Reflexionssignale I_1 und I_2 detektiert werden. Die zu erwartenden Koppel effizienzen sowie S_{diff}^{norm} sind in Abb. 3.11b in Abhängigkeit der Spiegelposition dargestellt. Eine Änderung in der Reflektivität des Spiegels hat keinen Einfluß auf S_{diff}^{norm} , da die Einzelintensitäten gleichsinnig verändert werden.

Die Auflösung eines derartigen Meßaufnehmers wird bei 200 nm liegen, wenn man zugrunde legt, daß sich beim 45°-Spiegel im Meßbereich von 30 μm das Signal S_{diff}^{norm} um 90% ändert und mit den vorhandenen Meßverstärkern Signaländerungen im Bereich von 1 % sicher und ohne größeren Aufwand aufgelöst werden können.

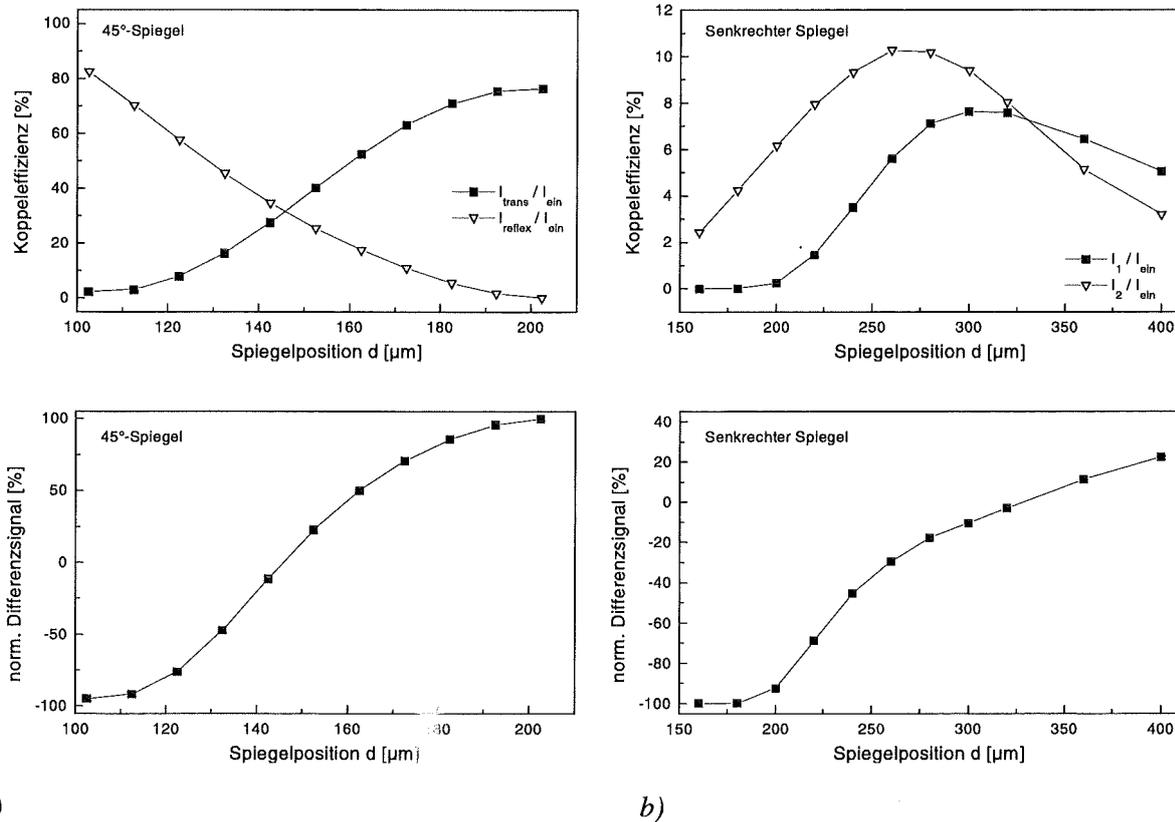


Abb. 3.11: Über Raytrace-Simulationen ermittelte Koppel effizienzen I/I_{ein} und das hieraus berechnete normierte Differenzsignal S_{diff}^{norm} jeweils als Funktion der Spiegelposition d für die in Abb. 3.10 dargestellten Anordnungen. Als Einkoppe lfaser wurden jeweils eine GI-Faser (62/125, N.A.=0.26) und als Detektionsfasern SI-Fasern (110/125, N.A.=0.34) angenommen.

Entsprechend obiger Überlegungen zur Versuchsdurchführung und Auslegung des optischen Meßaufnehmers wurden zwei Wegmeßeinheiten gemäß Abb. 3.12 für das Mikroprüfsystem entworfen. Diese bestehen aus den Komponenten *Spiegel*, *Faserführungsschächte*, *elastische Aufhängung* und *Gestänge*.

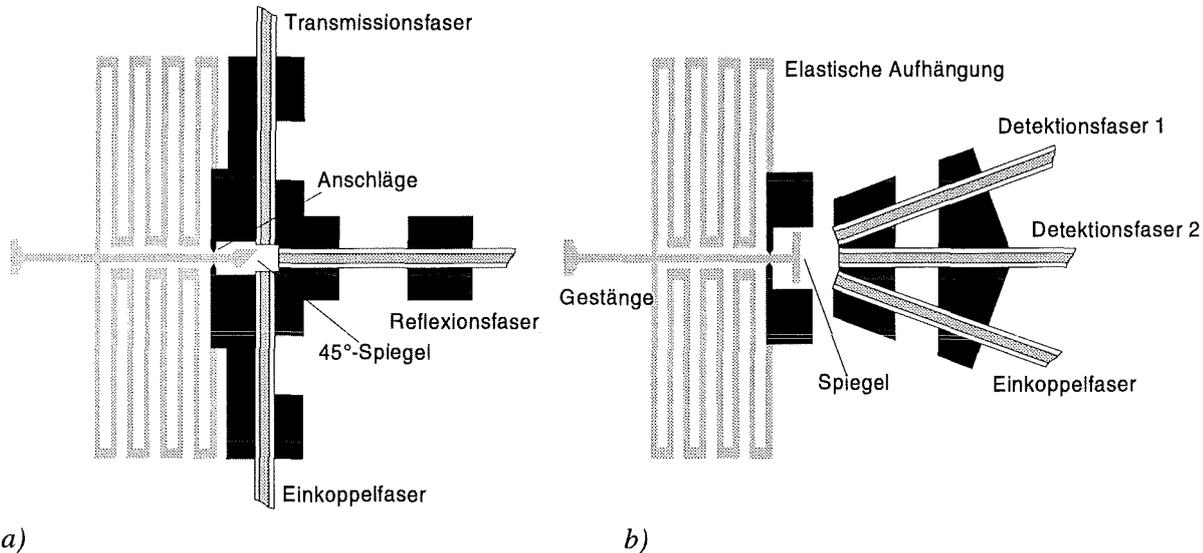


Abb. 3.12: Realisierte optische Wegmeßeinheit mit a) 45°-Spiegel und b) senkrechtem Spiegel. Die grau dargestellten Bereiche sind beweglich, die schwarzen sind fest mit dem Substrat verbunden. Die in den Faserschächten montierten Glasfasern sind ebenfalls dargestellt.

Spiegel und Faseranordnung

Bei der Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel sind die drei Fasern gemäß Abb. 3.12 im Winkel von 90° zueinander angeordnet, wobei die Faserstirnflächen ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 180 µm bilden. Als Einkoppelfaser wird eine Gradientenindex-Faser (GI-Faser, $\phi = 125 \mu\text{m}$, $\phi_{\text{Kern}} = 62 \mu\text{m}$, N.A. = 0.26) eingesetzt, da diese Licht in einen kleineren Raumwinkel abstrahlt als eine Stufenindex-Faser (SI-Faser) mit gleicher numerischer Apertur N.A.. Hierdurch werden Reflexionen an der Substratoberfläche vermieden. Als Detektionsfasern kommen SI-Fasern ($\phi = 125 \mu\text{m}$, $\phi_{\text{Kern}} = 110 \mu\text{m}$, N.A. = 0.34) zum Einsatz, die einen großen Akzeptanzwinkel für das zu detektierende Licht aufweisen.

Die Koppeffizienzen zwischen Einkoppelfaser und den Detektionsfasern wurden mit einem Raytrace-Programm [Göt 92] simuliert und in Abb. 3.11 als Funktion des Abstands zwischen Faserstirnfläche der Reflexionsfaser und des Mittelpunkts des Spiegels dargestellt. Das aus den Koppeffizienzen ermittelte normierte Differenzsignal $S_{\text{diff}}^{\text{norm}}$ nach Gleichung (3.14) ist in Abb. 3.11a ebenfalls dargestellt. Aus Abb. 3.11a ist ersichtlich, daß für einen Abstand des Spiegels zur Faserstirnfläche zwischen 130 und 160 µm ein nahezu linearer Verlauf des normierten Differenzsignals $S_{\text{diff}}^{\text{norm}}$ erzielt wird, so daß dieser Bereich ideal für die Wegmessung ist. Bei der Auslegung der optischen Wegmeßeinheit besitzt daher der 45°-Spiegel in der Anfangsposition einen Abstand von 190 µm von der Faserstirnfläche der

Reflexionsfaser. In diesem Abstand ist die Einlaufstrecke von 30 μm enthalten, die das Meßverfahren erfordert (siehe Kap. 3.4.2.1).

Im Falle des senkrechten Spiegels (siehe Abb. 3.12b) verlaufen die Fasern parallel bzw. unter einem Winkel von 20° gegenüber der Bewegungsrichtung des Spiegels. Die obere und mittlere Fasern werden als Detektionsfasern verwendet, die untere wird als Einkoppelfaser eingesetzt. Ebenso wie beim 45°-Spiegel wird bei diesem Aufbau eine GI-Faser als Einkoppelfaser und zwei SI-Fasern als Detektionsfasern verwendet.

Analog zur Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel wurden bei der Anordnung mit senkrechtem Spiegel Raytrace-Simulationen durchgeführt (siehe Abb. 3.11b). Mit einem Anfangsabstand von 290 μm zwischen Spiegel und Faserstirnfläche der mittleren Faser liegt im eigentlichen Meßbereich zwischen 260 und 230 μm ein nahezu linearer Intensitätsverlauf vor, der sich wiederum für die Wegmessung anbietet.

Elastische Aufhängung

Da mit dem druckbetriebenen Aktor Kräfte im Bereich von 20 mN ohne Schwierigkeiten zu übertragen sind, wurde die Federkonstante der elastischen Aufhängung so ausgelegt, daß diese etwa 25% der Federkonstanten der Biegeprobe aufweist. Somit ist gewährleistet, daß die Kraft mit einer gewissen Untersetzung auf den Prüfling übertragen wird.

Die in Abb. 3.12 dargestellte elastische Aufhängung besteht aus zwei gefalteten Blattfedern mit einer Breite b von 40 μm und einer Höhe h von 200 μm . Die Gesamtfederkonstante ergibt sich entsprechend Gleichung (3.8) zu:

$$\frac{1}{D_{ges}} = \frac{4}{E \cdot h \cdot b^3} (7 \cdot L_1^3 + L_2^3) \quad (3.15)$$

mit $L_1 = 1175 \mu\text{m}$ und $L_2 = 700 \mu\text{m}$. Hiermit ergibt sich eine Federkonstante von 65 N/m.

Die Auslegung dieser elastischen Aufhängung garantiert eine exakte Führung des Spiegels, der sich am Ende des Gestänges befindet. Dies ist erforderlich, da der Ausleger des Kolbens nicht zentral in x-Richtung auf das Gestänge drückt. Diese Asymmetrie im Aufbau mußte jedoch in Kauf genommen werden, um das in Kap. 3.4.2.1 beschriebene Meßverfahren anwenden zu können.

Damit bei der Herstellung der Mikrostruktur möglicherweise auftretende Querbelastungen auf das Gestänge und die elastische Aufhängung nicht zu einer Deformation der Wegmeßeinheit führen können, wurden Anschläge im Bereich des Spiegels in einem Abstand von 5 μm zum Gestänge angebracht.

Faserschächte

Um den Platzbedarf der Faserschächte gegenüber dem Testaktor zu reduzieren, wurden diese als einzelne Blöcke ausgelegt. Die Zwischenräume sind dabei für die Montage vorgesehen und bieten die Möglichkeit, daß beim Verkleben der Fasern diese auf das Substrat gepreßt werden.

Somit wird eine definierte Ausrichtung der Fasern untereinander bezüglich ihrer Höhenposition erzielt.

Um die genaue laterale Position der Fasern innerhalb der Kanäle vor dem Verkleben einstellen zu können, sind am Ende der Schächte Kerben in den Blöcken vorgesehen. Diese erlauben die Ausrichtung der Faser, gestatten aber im Vergleich zu Anschlägen, wie sie z.B. beim Testaktor verwendet wurden, den Abstand der Faserstirnflächen zum Spiegel noch zu verkürzen oder zu verlängern. Hiermit kann bei Bedarf die Kennlinie des Systems leicht verändert werden.

3.5 Probenhalterung

Die Probenhalterung für das Mikroprüfsystem muß folgende Anforderungen erfüllen:

- **Ausrichtung des Balkens**

Der Balken muß senkrecht zur Richtung der Krafteinleitung ausgerichtet werden, da die Balken in einem Biegeexperiment untersucht werden.

- **Positionierung des Balkens**

Die Einspannstelle des Balkens muß einen fest vorgegebenen Abstand zur Position der Krafteinleitung aufweisen.

- **Fixierung des Balkens**

Der Balken muß derart fixiert werden, daß sich die Einspannstelle nicht verdreht. Dabei soll die Fixierung intern erfolgen, d.h. zum Einspannen soll keine Kraft von außen aufgebracht werden.

3.5.1 Konzeption einer Balkenhalterung

Um die exakte Ausrichtung der Halterung gegenüber dem Aktor und damit der Probe gegenüber dem kraftübertragenden Element zu gewährleisten, wird die Halterung zusammen mit dem Aktor auf einem Substrat hergestellt. Die Halterung enthält zusätzliche Elemente, die eine Ausrichtung des Balkens gewährleisten.

Bei der in Abb. 3.13 dargestellten Halterung wird die quadratische Balkenplatte über die zwei Blattfedern an die Auflagepunkte (A_1 und A_2 , B) gepreßt. Die Balkenplatte ist aufgrund der Auflagepunkte A_1 und A_2 innerhalb der Halterung exakt ausgerichtet. Der Auflagepunkt B garantiert einen festen Abstand der Balkenplatte zum Aktor. Hiermit ist die Distanz zwischen der Einspannstelle des Balkens und der Position der Krafteinleitung genau vorgegeben. Ändert sich die Breite der Balkenplatte, kommt es lediglich zu einer Verschiebung der Einspannstelle des Balkens in x-Richtung, d.h. die Kraft wird weiterhin senkrecht aufgebracht. Da der Start der Verbiegungsmessung im Mikroprüfsystem über die Kontaktkraft bestimmt wird, ist die Position des Balkens in x-Richtung unerheblich. Die Forderungen nach einer exakten Ausrichtung und Positionierung des Balkens werden bei dieser Probenhalterung erfüllt.

Bei der Anordnung der Auflagepunkte und der Fixierfedern kamen prinzipiell 4 Varianten in Betracht, wobei bei der gewählten Anordnung gemäß Abb. 3.13 die Fixierkräfte minimal sind, die ein Verdrehen dieser Platte bei Kräfteinleitung auf den Balken verhindern.

Zur Montage der Proben muß die Balkenplatte von schräg oben in die Halterung eingeführt werden (siehe Abb. 3.13b), so daß die Platte die Blattfedern bei B_h und B_v berührt. Der in Richtung Balken gerichtete Teil der Balkenplatte bleibt auf der Halterung im Bereich der Auflagepunkte A_1 , A_2 und B liegen. Im zweiten Schritt wird die Balkenplatte gegen die obere Blattfeder B_v gedrückt (siehe Abb. 3.13c, Pfeilrichtung), bis die Platte beim unteren Auflagepunkt B einrastet. Anschließend wird die Balkenplatte nach links gegen die entsprechende Blattfeder gedrückt (siehe Abb. 3.13d, Pfeilrichtung) und rastet dann bei den Auflagepunkten A_1 und A_2 ein. Hiermit kann eine optimale Ausrichtung des Balken erzielt werden. Für den Ausbau der Probe muß diese senkrecht nach oben aus der Halterung gezogen werden. Dies kann über eine doppelseitiges Klebeband erfolgen, das an einem Stempel befestigt ist und beim Ausbau auf die Balkenplatte gepreßt wird.

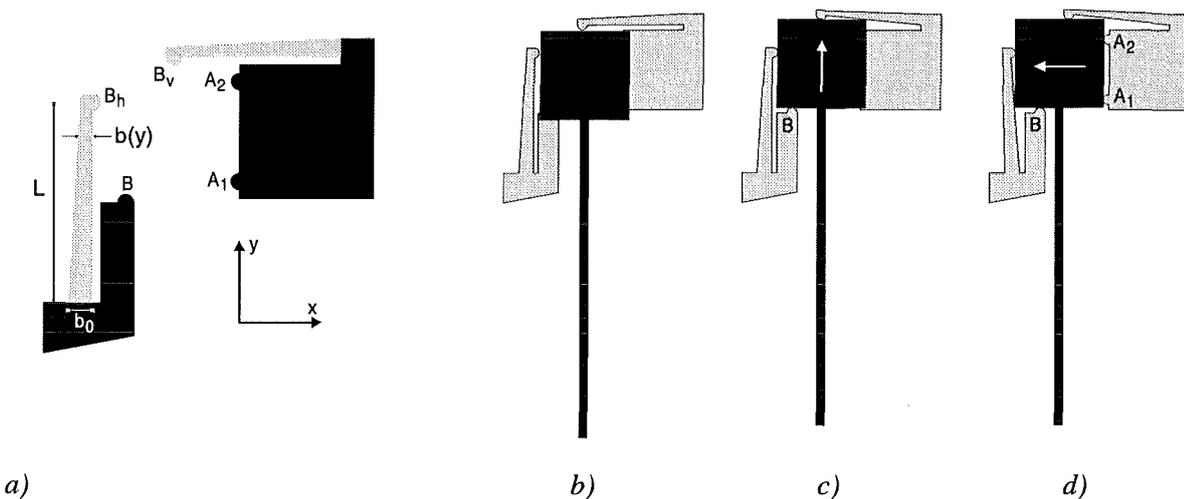


Abb. 3.13: Auslegung der Fixierfedern für die Balkenhalterung a) und sowie Vorgehensweise bei der Balkenmontage b)-d). Zur Verdeutlichung der Federverbiegung wurde diese überhöht dargestellt.

3.5.2 Konstruktive Auslegung der Balkenhalterung

Bei der Auslegung der Balkenhalterung wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- $F_{ext}^{max} = 20 \text{ mN}$, die maximal auf den Balken ausgeübte Kraft
- $L = 1500 \text{ }\mu\text{m}$, die Länge des Balkens
- $b_{Bp} = 800 \text{ }\mu\text{m}$, die Breite der Balkenplatte

Betrachtet man das Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung und das Momentengleichgewicht um den Auflagepunkt B der Balkenhalterung in Abb. 3.13, muß die Fixierkraft F_x in x -Richtung mindestens 40mN betragen, um ein Verdrehen der Balkenplatte in der Halterung zu verhindern.

Um ein Verdrehen der Balkenplatte innerhalb der Halterung sicher ausschließen zu können, wurde für die Auslegung der Blattfedern eine erforderliche Fixierkraft F_x in horizontaler Richtung von 60 mN betrachtet. Um diese Kraft bei möglichst kleiner Bauart und gleichzeitig großer, maximal zulässiger Auslenkung der Federn zu erzielen, wurde eine Blattfeder gewählt, deren Breite sich linear mit der Länge ändert (siehe Abb. 3.13a). Zur Berechnung der Federbreite an der Einspannstelle kann näherungsweise ein parabolischer Verlauf der Federbreite angenommen werden [Dub 81]:

$$b(y) = b_0 \sqrt{y/L} \quad (3.16)$$

Für die Federbreite b_0 an der Einspannstelle mit $y = L$ gilt:

$$b_0 = \sqrt{\frac{6 F_{ext} L}{h_0 \sigma_{zul}}} \quad (3.17)$$

Legt man bei Kupfer eine zulässige Spannung σ_{zul} von $125 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ zugrunde (Elastizitätsmodul von Kupfer $E_{Cu} = 125 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$), ergibt sich für b_0 bei einer Länge $L = 1200 \text{ }\mu\text{m}$ eine Breite an der Einspannstelle von $147 \text{ }\mu\text{m}$. Die hiermit erzielbare maximale Verbiegung der Blattfeder liegt bei $f_{max} = 11 \text{ }\mu\text{m}$:

$$f_{max} = \frac{8 F_{ext}}{h_0 E} (L / b_0)^3 \quad (3.18)$$

Die Breite der Balkenplatte wurde so gewählt, daß beim Einbau der Balken in die Halterung die Blattfeder um eben diese $11 \text{ }\mu\text{m}$ ausgelenkt wird und somit die Balkenplatte mit ca. 60 mN in der Halterung fixiert wird.

3.6 Gesamtsystem

In Abb. 3.14 ist das gesamte Mikroprüfsystem dargestellt, wobei in diesem Fall die Wegmeßeinheit mit 45° -Spiegel ausgestattet ist.

Gegenüber dem Testaktor wurde die Geometrie des Aktors leicht modifiziert. So sind die Ecken der Stoppnut mit relativ großen Verrundungsradien versehen, um damit senkrechte Kapillaren zu vermeiden. Diese könnten beim Verkleben der Deckplatte dem Klebstoff die Möglichkeit bieten, in die Stoppnut einzudringen [Fah 95]. Ferner wurde die Stoppnut im Bereich der Aktorkammer über die sog. Klebebohrungen erweitert, die bei der Montage der Mikroschläuche ein einfacheres Applizieren des Klebstoffs ermöglichen. Um bei Unterdruck ein Einsaugen des Kolbens in die Aktorkammer zu verhindern, ist ein Anschlag in der Aktorkammer vorgesehen.

Die Fluidversorgung des Aktors erfolgt über die Mikrotunnel, die mit Hilfe des Opferstrukturverfahrens hergestellt wurden. Diese Variante bietet sich von Seiten der Aufbau- und Verbindungstechnik an, zumal die Anschlüsse des Mikroprüfsystem an die Außenwelt im wesentlichen in der Substratebene erfolgen können.

Direkt an die Aktorkammer schließt sich ein Teil der Probenhalterung an. Entsprechend den in Kap. 3.5.1 dargelegten Überlegungen ist die exakte Ausrichtung der Probe bezüglich der Bewegungsrichtung des Kolbens vorgegeben. Der Anschlag im linken Teil der Halterung garantiert die genaue Position der Balkeneinspannstelle in y-Richtung, so daß die Balkenlänge, die im Biegeexperiment verbogen wird, genau vorgegeben ist.

Die Wegmeßeinheit des Mikroprüfsystems ist so angeordnet, daß das Gestänge der Wegmeßeinheit vom Ausleger des Kolbens dann berührt wird, wenn der Stempel des Kolbens ca. 30 μm vom Balken entfernt ist. Der Anschlag links von der Wegmeßeinheit begrenzt die Balkenverbiegung auf ca. 100 μm und verhindert ein Vordringen des Kolbens zur elastischen Aufhängung des Spiegels. Das Loch im Balken war bei der Konzeption des Mikroprüfsystems für die bessere Handhabung der Proben beim Einbau in die Halterung vorgesehen. In das Loch sollte vor dem Ablösen der Balken vom Substrat ein Zylinder mit einem Durchmesser von 30 μm eingeklebt werden. Im Experiment zeigte sich jedoch, daß die Probenmontage ohne diesen Zylinder ebenfalls problemlos erfolgen kann.

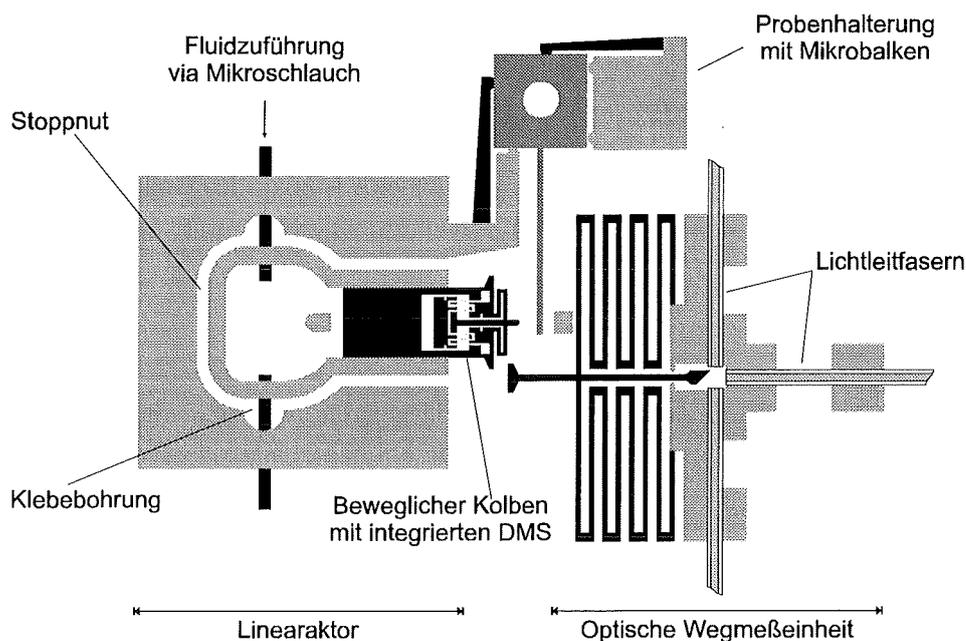


Abb. 3.14: Gesamtdesign des Mikroprüfsystems mit 45°-Wegmeßeinheit und montiertem Balken. Die beweglichen Bereiche der Struktur und die Fluidzuleitungen sind schwarz dargestellt.

4 Herstellung und Montage

Das Mikroprüfsystem, bestehend aus Mikroaktor samt Kraftmeßkolben, Wegmeßeinheit und Probenhalterung, sowie die Biegeproben werden nach dem LIGA-Verfahren [Bec 86] hergestellt. Dieses Verfahren, das sich durch ein hohes Aspektverhältnis, glatte Seitenwände und die freie laterale Strukturierung auszeichnet, wird dabei mit dem Opferschicht- und Opferstrukturverfahren kombiniert. Das Opferschichtverfahren [Moh 90, Guc 91] wird zur Realisierung beweglicher Strukturen eingesetzt, die entweder nur partiell mit dem Substrat verbunden (beim Mikroprüfsystem sind dies die Blattfedern der Halterung und der Wegmeßeinheit) oder vollständig von diesem gelöst sind (z.B. die Kraftmeßkolben und die Biegebalken).

Für die Realisierung der optimierten fluidischen und optischen Ankopplung des Aktors wurde die Opferstrukturtechnik [Rut 95] entwickelt, die erstmals beim Testaktor angewandt wurde. Mit Hilfe dieser Technik werden Mikrotunnel realisiert, die parallel zum Substrat durch die Mikrostruktur verlaufen und für die Aufnahme von Mikroschläuchen oder Glasfasern vorgesehen sind. Zudem konnten beim Mikroprüfsystem erstmals Dehnmeßstreifen (DMS) zusammen mit einer LIGA-Mikrostruktur hergestellt werden. Hierbei wird die LIGA-Mikrostruktur auf den DMS hergestellt und nicht die DMS, wie in makroskopischen Anwendungen üblich, auf den Mikrostrukturen appliziert.

4.1 Herstellungsprozeß

Im folgenden wird das gesamte Herstellungsverfahren des Mikroprüfsystems dargestellt, wobei die einzelnen Prozessschritte in Abb. 4.1 zusammengefaßt sind:

In einem ersten Schritt wird das Substrat (Silicium-Wafer oder Keramiksubstrat) mit dünnen Metallfilmen beschichtet (Abb. 4.1a), die als Haft- bzw. Galvanikstartschicht dienen. Auf diese Schichten wird die Opferschicht aufgebracht, die nur eine temporäre Funktion besitzt. Üblicherweise wird eine Titan-Schicht aufgesputtert, die im Falle des Mikroprüfsystems 5 µm dick ist. Um die Haftfestigkeit der später aufgetragenen Polymerschichten und der aufgalvanisierten Metallstrukturen zu erhöhen, wird die Titan-Schicht oxidiert [Moh 88].

Auf das derart vorbereitete Substrat wird die Metallschicht für die DMS-Mäander aufgebracht. Diese besteht aufgrund der einfachen Verfügbarkeit derzeit aus Gold. Im Hinblick auf die Reduzierung thermischer Einflüsse auf den Kraftmeßkolben (siehe Kap. 3.4.1.3) soll diese Gold-Schicht bei der Weiterentwicklung der Kolben durch eine Legierung (z.B. NiCr¹⁰) mit einem deutlich geringeren Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands ersetzt werden. Die Gold-Schicht wird mittels Sputterätzens [Büt 91] strukturiert. Dabei dient ein strukturierter Photo-Lack als Maske (Abb. 4.1b).

¹⁰ Ni₅₀Cr₅₀, spezifischer Widerstand von $1.6 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$, Temperaturkoeffizient ca. 10^{-5}K^{-1} [Stär 95].

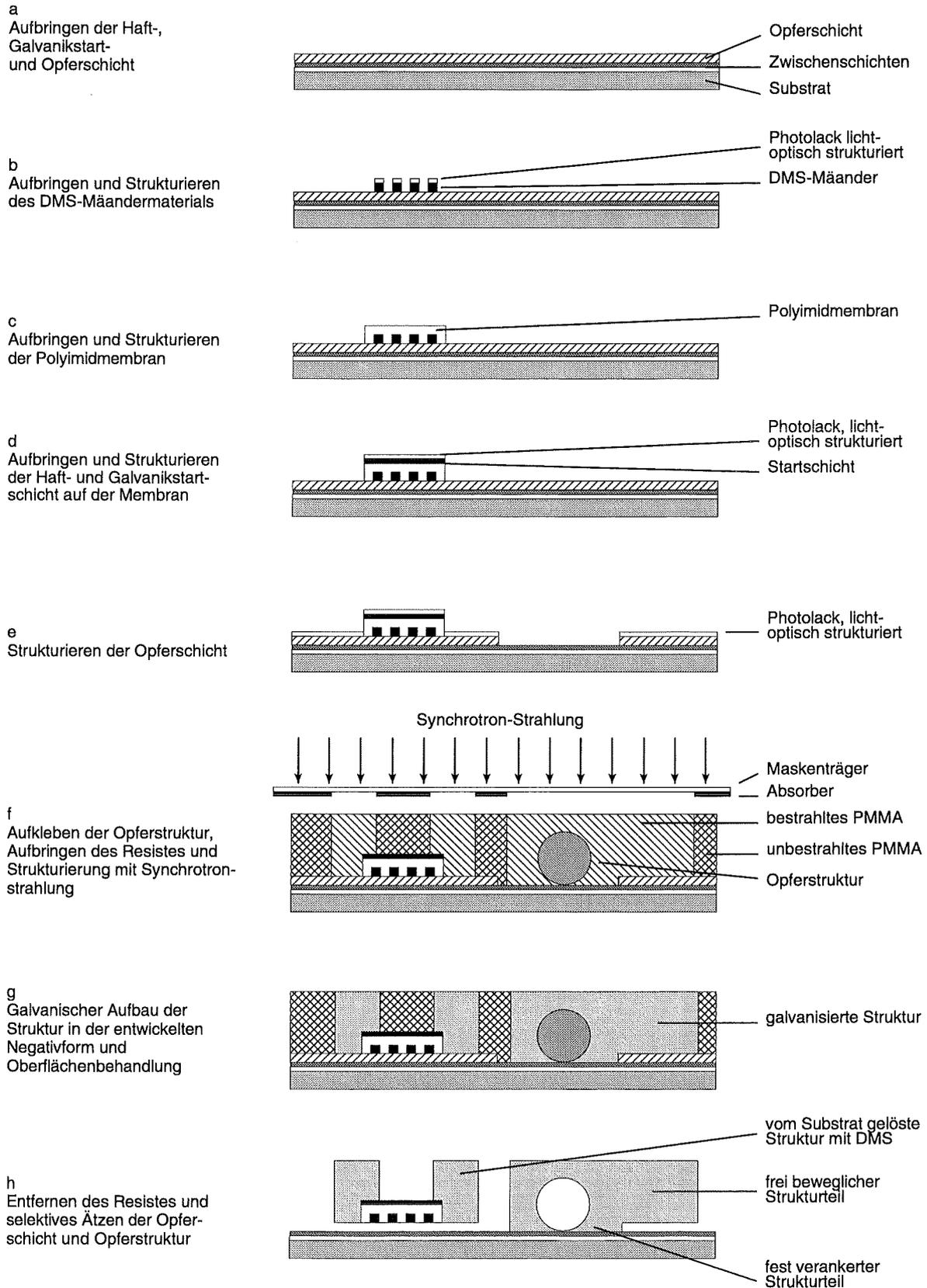


Abb. 4.1: Prozessschritte bei der Herstellung des Mikroprüfsystems mit Hilfe des LIGA-Verfahrens in Kombination mit der Opferschicht- und Opferstrukturtechnik.

Nach der Strukturierung der Gold-Mäander wird Polyimid aufgeschleudert und photolithographisch strukturiert. Die hierbei erhaltene Polyimidstruktur dient als Trägermembran für die DMS. Auf diese Polyimidmembranen werden in einem weiteren Prozeßschritt zwei Metallschichten aufgedampft, die als Haft- und Galvanikstartschicht dienen. Diese Schichten werden naßchemisch über einen entsprechenden Photolack strukturiert (Abb. 4.1d).

An diese Prozesse schließt sich die Strukturierung der Opferschicht mittels Photolithographie und naßchemischem Ätzen an (Abb. 4.1e). Dabei wird die Opferschicht in den Bereichen entfernt, in denen die später galvanisierte Struktur fest mit dem Substrat verbunden sein soll (z.B. die Aktorkammer). Die beweglichen Bereiche der Struktur (z.B. die Blattfedern der optischen Wegmeßeinheit und der Balkenhalterung) bzw. Strukturen, die vollständig vom Substrat gelöst werden sollen (d.h. die Kolben und Balken), werden auf der Opferschicht realisiert.

Die Strukturierungen der Polyimidmembran, der Haft- und Startschichten auf der Membran sowie der Opferschicht erfolgen jeweils justiert gegenüber den DMS-Mäandern, deren Schicht zuerst strukturiert wurde.

In einem weiteren Schritt der Substratvorbereitung wird die Opferstruktur justiert gegenüber der Opferschicht auf das Substrat aufgebracht (Abb. 4.1f) und auf diesem festgeklebt. Als Klebstoff wird Polymethylmetacrylat (PMMA) verwendet, das ebenfalls bei der Herstellung der Negativstruktur durch Röntgentiefenlithographie verwendet wird. Wesentlicher Vorteil des Einsatzes von PMMA als Klebstoff ist, daß später keine Rückstände auf dem Substrat verbleiben, da das PMMA vollständig entfernt werden kann. Im Fall des Mikroprüfsystems sowie des fluidischen Aktors (siehe Kap. 6) werden handelsübliche Glasfasern als Opferstruktur verwendet, für deren Ausrichtung Justierhilfen in der Opferschicht vorhanden sind.

Mit dem Aufbringen einer röntgenempfindlichen Polymerschicht, dem sog. Röntgenresist, der direkt auf dem Substrat polymerisiert wird, ist die Substratvorbereitung abgeschlossen. Als Resistmaterial wird standardmäßig PMMA verwendet.

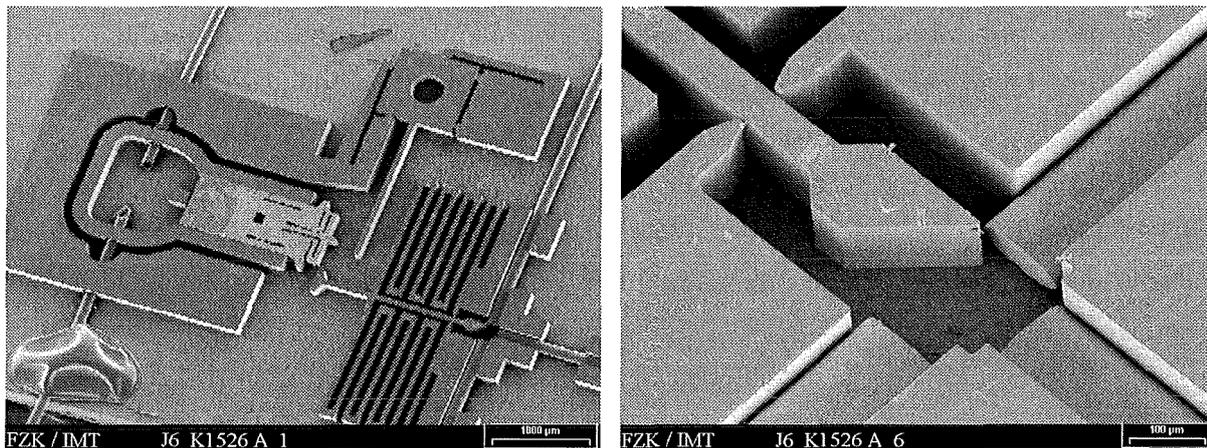
Der Röntgenresist wird über eine Röntgenmaske, die bezüglich der Opferschicht justiert ist, mit Synchrotron-Strahlung belichtet (Abb. 4.1f). Die Röntgenmaske besteht aus einer Titanmembran, auf der Goldabsorber-Strukturen aufgebracht sind [Bac 91]. In den bestrahlten Bereichen des Resistes ist das Molekulargewicht nach der Bestrahlung reduziert, so daß diese Bereiche durch einen geeigneten Entwickler entfernt werden können. In der so erhaltenen PMMA-Mikrostruktur wird die komplementäre Metallstruktur durch Galvanoformung hergestellt (Abb. 4.1g).

Mit dem Entfernen des unbestrahlten Resistes und dem selektiven Ätzen der Opferschicht und -struktur gegenüber den galvanisierten Mikrostrukturen ist der eigentliche LIGA-Prozeß abgeschlossen. Dabei erhält man die fest auf dem Substrat stehenden, die frei beweglichen und die gänzlich vom Substrat gelösten Strukturen (Abb. 4.1h).

Da speziell beim druckbetriebenen Mikroaktor und den Kraftmeßkolben Mikrostrukturen mit einer extrem glatten Oberfläche und mit einheitlicher Strukturhöhe benötigt werden, muß vor dem Entfernen des unbestrahlten Resistes eine Oberflächenbehandlung der galvanisierten Strukturen durchgeführt werden. Hierbei wird die metallische Mikrostruktur, die sich in einer PMMA-Matrix befinden, diamantgefräst. Bei entsprechend eingestellten Fräsparametern werden scharfe Strukturkanten am Übergang zwischen PMMA und den galvanisierten Metallstrukturen realisiert. Dieser Übergang ist für die Funktionsfähigkeit des Kolbens im Kolbenkanal unerlässlich. Die Strukturhöhe schwankt über das gesamte Substrat um $\pm 2 \mu\text{m}$, die Oberflächenrauigkeit der Kupferstrukturen liegt im Bereich von 40 nm. Um beim Diamantfräsen die Strukturhöhe von Aktorgehäuse und Kolben aufeinander abstimmen zu können, sind jeweils mehrere Kolben um einen Aktor gruppiert. Nach dem Diamantfräsen unterscheiden sich die Höhen von Kolben und Aktor dann um die Dicke der Opferschicht.

Im Gegensatz zum Testaktor werden die Biegeproben auf einem gesonderten Substrat hergestellt, so daß bei diesen das Diamantfräsen entfallen kann. Hierdurch ist es möglich, daß Proben aus verschiedenen Materialien gefertigt werden können. Beim Testaktor waren die Materialien auf Kupfer und Gold beschränkt, da Nickel nur bedingt diamantgefräst werden kann.

In Abb. 4.2 ist ein nach dem LIGA-Verfahren hergestelltes Mikroprüfsystem dargestellt. Die Glasfasern der Wegmeßeinheit und die Mikroschläuche für die Fluidversorgung sind innerhalb des Systems ausgerichtet und fixiert, jedoch noch nicht verklebt. Abb. 4.2b zeigt ein Detail der Wegmeßeinheit mit 45° -Spiegel. Deutlich zu erkennen sind die scharfen Strukturkanten am Übergang zwischen Seitenwänden und diamantgefräster Oberfläche. In Abb. 4.3 ist die Unterseite des Kraftmeßkolbens mit dem metallischen DMS dargestellt.



a)

b)

Abb. 4.2: Mit dem LIGA-Verfahren hergestelltes Mikroprüfsystem.

a) REM-Aufnahme des Gesamtsystems mit dem nachträglich montierten Kraftmeßkolben.

b) REM-Aufnahme des 45° -Spiegels der Wegmeßeinheit mit den drei Lichtleitfasern.

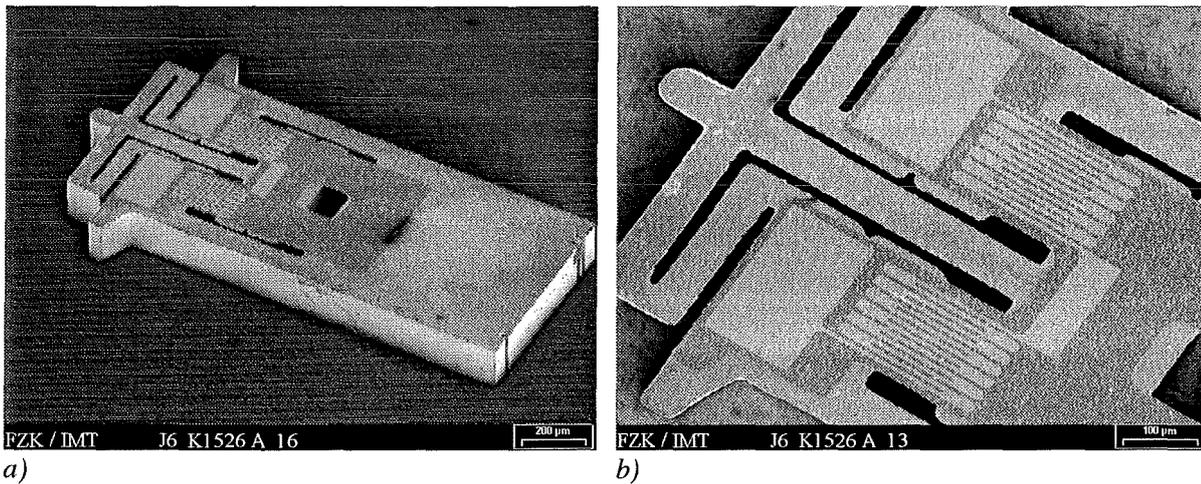


Abb. 4.3: a) REM-Aufnahme des Kraftmeßkolbens, wobei die Unterseite des Kolbens mit den DMS zu sehen ist.
 b) Detail des Kraftmeßkolbens mit der DMS-Mäander auf der Polyimidmembran.

4.2 Montage

Im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik müssen bei der Montage des Mikroprüfsystems folgende Arbeitsgänge in der angegebenen Reihenfolge durchgeführt werden:

1. Montage der Fluidzuführung
2. Anbringen der elektrischen Zuleitungen für den Meß- und Referenzkolben
3. Einbau des Meßkolbens in den Kolbenkanal
4. Montage der Deckplatte, die die Aktorkammer verschließt
5. Befestigung des Referenzkolbens außerhalb der Aktorkammer
6. Elektrische Kontaktierung der Kolben
7. Montage der Lichtleitfaser für die optische Wegmeßeinheit

Die fluidische, elektrische und optische Anbindung des Mikroprüfsystems an die „Außenwelt“ erfolgt über Mikroschläuche, Bonddrähte und Glasfasern. Diese werden ebenso wie die Deckplatte des Aktors auf bzw. in die galvanisch hergestellten Mikrostrukturen geklebt. Die verschiedenen Klebeverbindungen müssen neben der Bedingung nach Selektivität die in Tab. 4.1 zusammengefaßten Anforderungen erfüllen.

| Bauteil | Anforderungen |
|----------------------------------|---|
| Fluidzuführung | Dichtigkeit auf Zug belastbar |
| Elektrische Zuleitung der Kolben | niedriger Widerstand auf Biegung und Zug belastbar |
| Abschlußplatte des Aktors | extrem dünne Klebeschicht |
| Glasfasern | auf Zug belastbar |

Tab. 4.1: Anforderungen an die Klebeverbindungen für die fluidische, elektrische und optische Kontaktierung des Mikroprüfsystems.

Das Hauptproblem beim Verkleben von Mikrokomponenten liegt in der komplexen Geometrie und den kleinen Dimensionen der Füge­teile, wobei der Klebstoff in kleinsten Mengen präzise aufgetragen werden muß. Die Selektivität der Verklebung muß gewährleistet sein, da ansonsten die beweglichen Strukturen mit dem Substrat verklebt werden und nicht mehr funktionsfähig sind. Zudem ist speziell beim druckbetriebe­nen Mikroaktor eine extrem dünne Klebeschicht zwischen Deckel und Klebefläche des Aktors erforderlich (siehe auch Kap. 4.2.1). Im Gegensatz zum anodischen Bonden, das in der Mikroelektronik häufig eingesetzt wird, bietet die Klebetechnik als wesentliche Vorteile, daß geringe Prozeßtemperaturen erforderlich sind und verschiedenste Materialien miteinander kombiniert werden können.

4.2.1 Deckel

Bei der Montage der Deckplatte auf den Mikroaktor muß neben der Selektivität, d.h. die Bedingung, daß der Kolben nicht im Kolbenkanal verklebt wird, zudem eine extrem dünne Klebeschicht zwischen Deckel und Aktor realisiert werden. Diese dünne Klebeschicht ist notwendig, um die Leckrate des Antriebsmediums aus dem Aktor heraus zu minimieren.

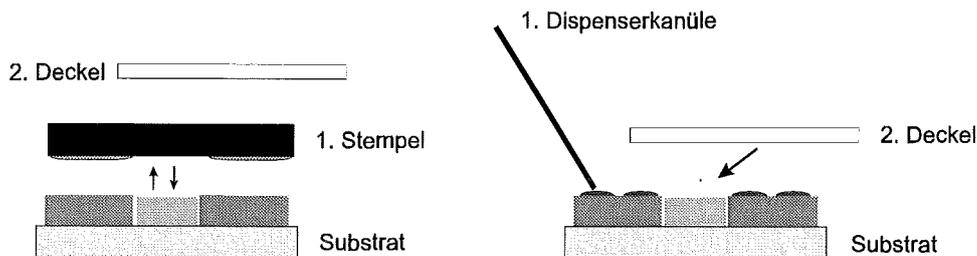


Abb. 4.4: Schematische Darstellung verschiedener Klebprozesse. Klebstoffapplikation über Stempeln (links) oder Dispensen (rechts).

Die bei makroskopischen Füge­teilen bewährten Klebetechniken, bei denen zunächst der Klebstoff über einen Dispenser oder Stempel aufgetragen wird und die Einzelteile dann zusammengefügt werden (Abb. 4.4a), können beim Verkleben von Bauteilen im Mikrometerbereich nicht angewandt werden. Die Klebstoffmengen können bei diesem „makroskopischen“ Verfahren nicht präzise genug aufgebracht werden, um die Selektivität zu gewährleisten. Zudem liegt keine definierte Dicke der Klebeschicht vor.

Daher wird bei der Montage des Deckels das für das Kleben von Mikrokomponenten entwickelte *Kapillarklebeverfahren* [Maa 94] angewendet, wobei im vorliegenden Fall erstmals die sog. Stopppnut als wesentliches konstruktives Element dieses Klebeverfahrens eingeführt wird. Im Gegensatz zu makroskopischen Techniken werden beim Kapillarklebeverfahren die Füge­teile, d.h. Mikroaktor und Deckel, zunächst gegeneinander ausgerichtet und miteinander verpreßt. Danach wird der Klebstoff mit Hilfe einer feinen Nadelspitze (engl. „pin transfer“) an die Kante zwischen den beiden Füge­teilen appliziert (siehe Abb. 4.5). Der Klebstoff kriecht aufgrund von Kapillarkräften in den Spalt zwischen den zu verklebenden Teilen und kann hier größere Strecken zurücklegen. Um ein Vordringen des Klebstoffs bis zum Kolbenkanal, d.h. bis an den Spalt zwischen Kolben und Seitenwand, auszuschließen und somit ein Verkleben

des Kolbens zu verhindern, ist beim Aktor eine Stopfnut eingeführt. Diese teilt das Aktorgehäuse in zwei Teile, den sog. Klebbereich und das innere Aktorgehäuse. Erreicht der Klebstoff die Kante der Stopfnut, so werden die Kapillarkräfte klein und der Klebstoff kriecht nicht mehr weiter.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß der Klebstoff nicht mehr sehr präzise an vorgegebene Punkte appliziert werden muß. Vielmehr verteilt sich der Klebstoff selbständig und befüllt nur die durch die Oberflächenrauigkeit vorgegebenen Hohlräume zwischen Aktor und Deckplatte. Dies bedeutet, daß die durch Diamantfräsen erzielte hohe Oberflächengüte des Aktors automatisch eine dünne Klebstoffschicht bedingt. Bei der Deckplatte aus Glas ist die Oberflächengüte bereits durch das Ausgangsmaterial vorgegeben. Aus Abb. 4.5 kann zudem entnommen werden, daß der Spalt zwischen Deckel und innerem Aktorgehäuse die gleiche Dicke wie die Klebeschicht aufweist.

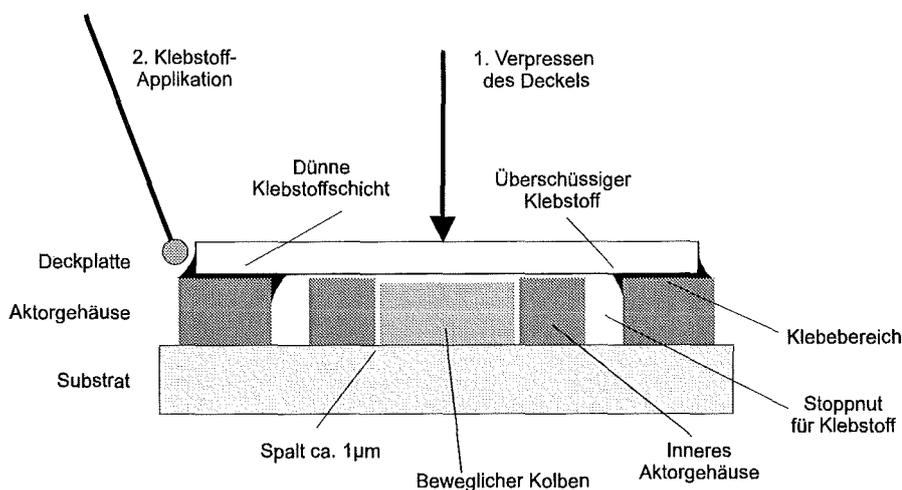


Abb. 4.5: Schematische Darstellung der Kapillarklebeteknik am Beispiele des hydraulisch betriebenen Aktors.

Experimente ergaben, daß mit dem Kapillarklebeverfahren Klebstoffschichten mit einer Dicke unter $1\ \mu\text{m}$ erzielt werden, wobei die Dicke unabhängig von der Anpreßkraft ist, mit der die Deckplatte auf den Aktor gepreßt wird. Die geforderte, minimale Leckrate des Antriebsmediums aus dem Aktor heraus kann durch den geringen Spalt zwischen Deckel und innerem Aktorgehäuse gewährleistet werden. Die Selektivität dieser Klebeteknik ist bereits durch die Integration der Stopfnut im Aktorgehäuse gegeben. Um senkrechte Kapillaren zu vermeiden, über die Klebstoff in die Stopfnut eindringen könnte, wurden die Ecken der Stopfnut mit relativ großen Verrundungsradien versehen (siehe Abb. 3.14 und [Fah 95]).

4.2.2 Fluidanschlüsse

Zum Verkleben der Fluidanschlüsse wurden zwei verschiedene Konzepte entwickelt. Beim ersten Konzept erfolgt die Zuführung des Antriebsfluids durch ein Loch¹¹ im Bereich der Aktorkammer, das mit Hilfe eines Lasers in das Substrat geschnitten wird. Der Versorgungsschlauch wird durch das Loch geführt, bis die Schlauchkante mit dem Substrat bündig abschließt. Die Verklebung erfolgt von der Unterseite des Substrats, wobei der Schlauch mit Hilfe eines Klebstofftropfens fixiert wird. Der Klebstoff verteilt sich hierbei um den Schlauch herum (siehe Abb. 4.6) und dringt zudem aufgrund von Kapillarkräften in den Spalt zwischen Schlauch und Substrat ein und dichtet diesen optimal ab. Ein Eindringen von Klebstoff in die Aktorkammer bis zum Kolbenkanal kann dabei ausgeschlossen werden. Der wesentliche Nachteil bei diesem Konzept ist, daß durch das Loch die Stabilität des Substrats erniedrigt wird, so daß dieses beim Verpressen der Deckplatte brechen kann.

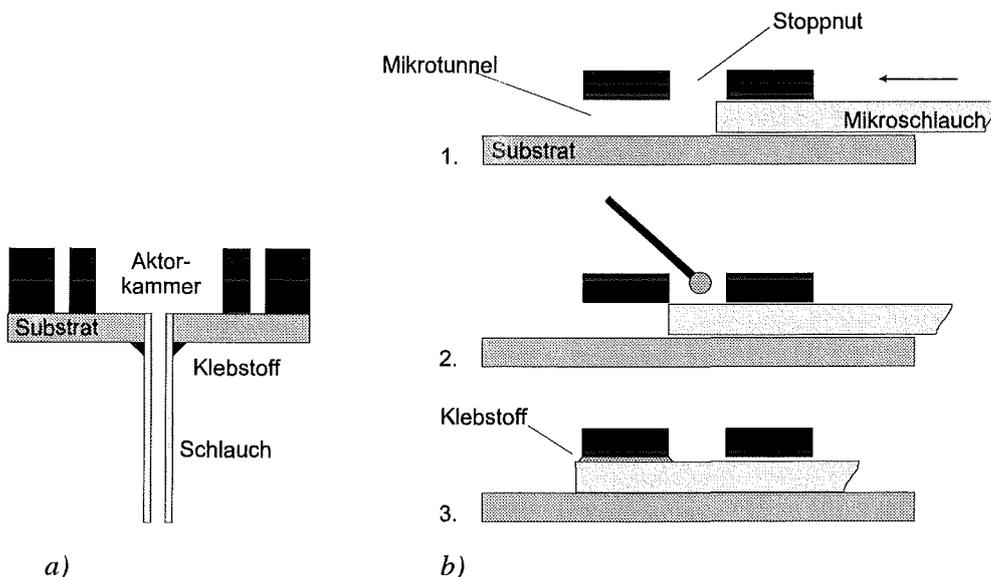
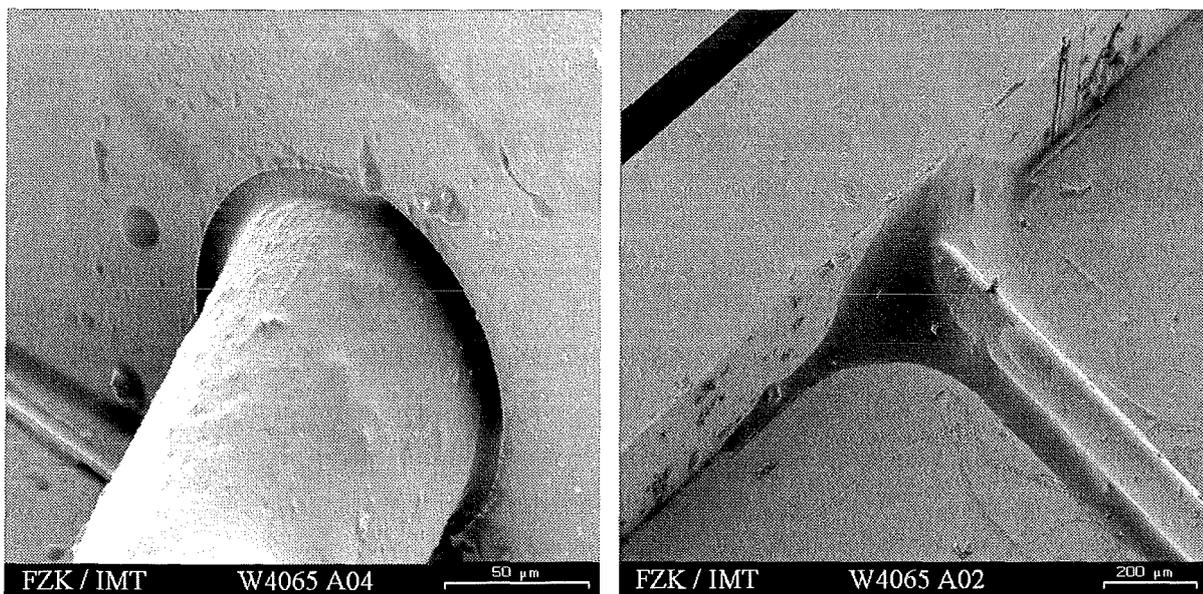


Abb. 4.6: Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim Verkleben der Fluidanschlüsse. a) Einkleben des Schlauchs in das Substrat, b) Einkleben des Schlauchs in einen Mikrotunnel.

Aus diesem Grund wurde nach einer alternativen Fluidzuführung gesucht, die von Seiten der Dichtigkeit und Einfachheit beim Verkleben der Schläuche genauso optimal wie im ersten Konzept realisiert werden kann. Als die bestmögliche Lösung bieten sich Mikrotunnel durch die Seitenwände der Mikrostruktur an, die mit dem Opferstrukturverfahren hergestellt werden. Beim Verkleben der zugehörigen Mikroschläuche werden ebenfalls Kapillarkräfte eingesetzt, wobei der Mikroschlauch zunächst von außen so weit in den Mikrotunnel eingeführt, daß er den Tunnel im inneren Bereich des Aktors gerade erreicht und vollständig in der Stopfnut zum Liegen kommt (siehe Abb. 4.6, 1. und 2.). Dann wird ein Klebstofftropfen mit Hilfe einer feinen Nadelspitze auf denjenigen Schlauchbereich aufgebracht, der sich innerhalb der Stopfnut befindet. Um die Applikation von Klebstoff zu erleichtern, wurde die 100 µm breite

¹¹ Der Durchmesser des Lochs liegt bei ca. 800 µm.

Stoppnut des Mikroprüfsystems in diesem Bereich durch die Klebebohrung vergrößert (Durchmesser ca. 300 μm , siehe Abb. 3.14). Nach der Klebstoffapplikation wird der Schlauch in Richtung innerer Aktorkammer verschoben bis der Klebstofftropfen den Mikrotunnel berührt. Der Klebstoff verteilt sich dann innerhalb des Spaltes zwischen Schlauch und Tunnel aufgrund der Kapillarkräfte. Da nur eine geringen Klebstoffmenge verwendet wird, kann gewährleistet werden, daß sich der Klebstoff im wesentlichen im Spalt zwischen Schlauch und Mikrotunnel verteilt (siehe Abb. 4.7a). Ein Eindringen von Klebstoff in die Aktorkammer kann nahezu ausgeschlossen werden. Mit Hilfe dieser Verklebung ist der Schlauch dicht mit der inneren Aktorkammer verbunden. Um die Klebung zudem gegenüber Zugbelastungen zu verstärken, wird im äußeren Bereich des Aktors zusätzlicher Klebstoff aufgebracht (siehe Abb. 4.7), der jedoch keine Dichtungsfunktion übernehmen muß. Wichtig bei beiden Prozeßschritten ist, daß kein Klebstoff auf die Oberfläche der inneren Aktorkammer gelangt, da ansonsten der Deckel beim späteren Verkleben aufgrund dieser Restschicht nicht mehr dicht auf die Struktur geklebt werden kann.



a)

b)

Abb. 4.7: Klebeverbindungen der Mikroschläuche. a) Mikroschlauch innerhalb der Aktorkammer. b) Verstärkung der Schlauchbefestigung außerhalb des Aktors.

4.2.3 Lichtleitfaser

Die Klebeverbindung der Lichtleitfasern in der Wegmeßeinheit muß lediglich eine stabile Fixierung der Faser innerhalb des Faserschachts gewährleisten. Die Montage der Lichtleitfasern wird folgendermaßen durchgeführt: Die Faser wird zunächst mit einem xyz-Manipulator oberhalb des Faserschachts positioniert. Danach wird ein Tropfen eines zähflüssigen, schnellhärtenden Epoxidharz-Klebers in denjenigen Bereich des Faserschachts eingebracht, der dem Spiegel abgewandt ist (siehe Abb. 4.8). Um eine geringe Klebstoffmenge garantieren zu können, erfolgt die Applikation wiederum über pin transfer. Danach wird die Faser innerhalb des Schachts auf das Substrat abgesenkt und axial in die Endposition geschoben. Der Klebstoff

wird sich aufgrund von Kapillarkräften entlang der Faser verteilen. Über die Größe des Klebstofftropfens und die Zähflüssigkeit des Klebers kann garantiert werden, daß kein Klebstoff bis zum beweglichen Spiegel der Wegmeßeinheit vordringen kann. Um eine optimale Zugentlastung zu garantieren, wird die Faser zusätzlich auf dem Substrat mit einem weiteren Klebstofftropfen fixiert, der in größerer Entfernung vom Mikroprüfsystem appliziert wird.

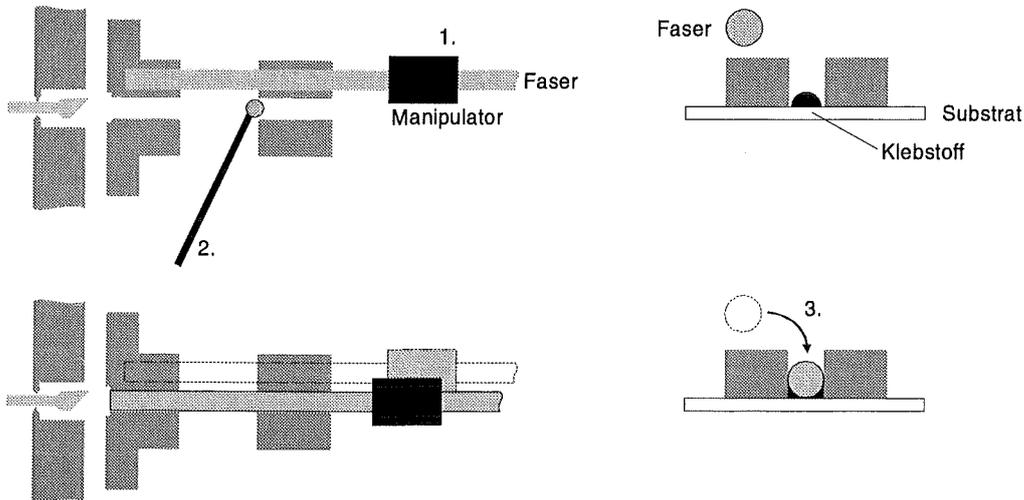


Abb. 4.8: Montageschritte für das Befestigen der Lichtleitfasern im Faserschacht.

4.2.4 Kraftmeßkolben

Die Dehnmeßstreifen lassen sich nicht, wie zunächst vorgesehen, mit den im Institut verfügbaren Drahtbondern kontaktieren, da die Unterlage des Bondpads, die 1,5 µm dicke Polyimidmembran, zu weich ist und die Frequenz des Drahtbonders nicht durchgestimmt werden kann. Es kann daher nicht genügend Energie eingekoppelt werden, um den Bonddraht mit dem Bondpad zu verbinden. Daher wurde ein Konzept entwickelt, bei dem die elektrische Kontaktierung der DMS mit einem leitfähigen Klebstoff bewerkstelligt werden kann. Die wesentliche Schritte des Konzeptes sind in Abb. 4.9 schematisch dargestellt.

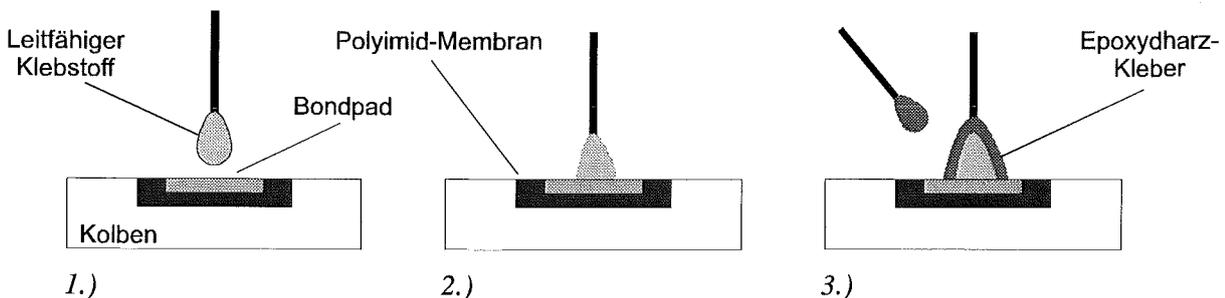


Abb. 4.9: Schematische Darstellung der DMS-Kontaktierung mittels leitfähigem Klebstoff.
 1.) Positionierung des Bonddrahtes, an dessen Ende sich ein Klebstofftropfen befindet.
 2.) Absetzen des Drahts auf das Bondpad bei 60°C und Aushärten bei 125°C.
 3.) Verstärkung der Klebeverbindung mit schnellhärtendem Klebstoff.

Bei diesem Konzept wird der DMS des Kraftmeßkolbens außerhalb des Aktors mit Bonddrähten ($\phi = 25 \mu\text{m}$, Länge ca. 1-2 cm) verbunden. Hierzu wird der Bonddraht in leitfähigen Klebstoff getaucht, so daß sich an dessen Ende ein Klebstofftropfen mit einem Durchmesser von ca. $50 \mu\text{m}$ befindet. Dieser Bonddraht wird dann mit Hilfe eines xyz-Manipulators über dem Bondpad des DMS positioniert und auf dieses abgesenkt. Damit sich beim Absetzen des Bonddrahtes der relative zähflüssige Klebstoff im wesentlichen um den Draht herum auf dem Bondpad verteilt, befindet sich der Kraftmeßkolben auf einer Heizplatte bei ca. 60°C . Anschließend wird die Temperatur innerhalb von 5 Minuten auf 125°C erhöht und der Klebstoff innerhalb von 10 Minuten ausgehärtet. In einem letzten Prozeßschritt wird die Verbindung zwischen Bondpad und Draht noch mit einem schnellhärtenden Epoxidharz-Kleber verstärkt (siehe Abb. 4.9), der bei Raumtemperatur über pin transfer aufgetragen wird.

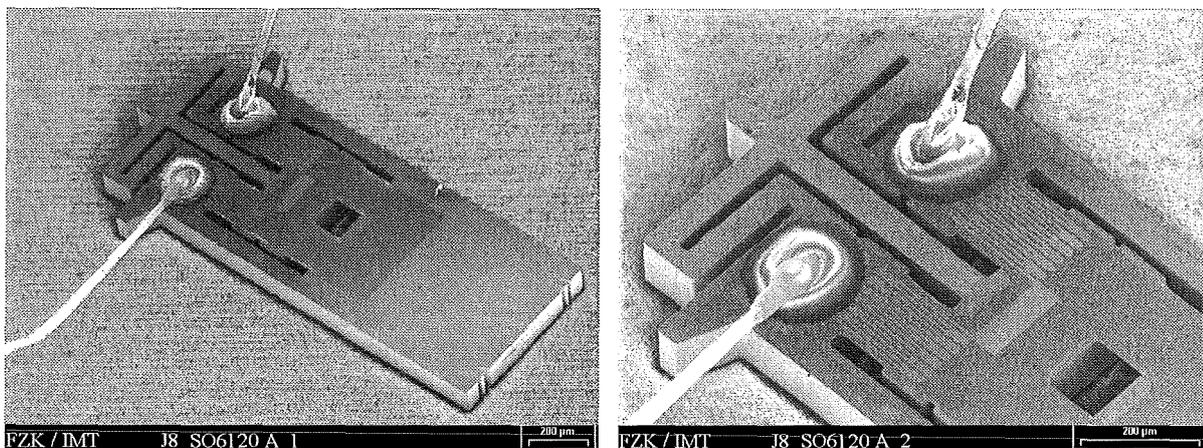


Abb. 4.10: REM-Aufnahme eines Kraftmeßkolbens mit Bonddrähten.

Die mit dieser Technik kontaktierten Kolben können auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden, bevor sie in den Aktor eingesetzt werden. Dies ist neben der einfacheren Handhabung beim Verkleben der Bonddrähte der Hauptvorteil dieses Verfahrens. Sollte beim Verkleben des Drahtes zu viel Klebstoff appliziert werden, muß nur der Kolben verworfen werden. Da die Verklebung außerhalb des Aktors erfolgt, ist das System von einer möglichen Fehklebung nicht betroffen.

Die Anbindung der Kraftmeßkolben an die Wheatstone'sche Meßbrücke erfolgt über Steckkontakte, an die die Bonddrähte angelötet werden.

5 Experimentelle Ergebnisse und Diskussion

5.1 Testaktor

Beim Testaktor für den druckbetriebenen Mikroaktor (siehe Abb. 3.4) werden neben herstellungstechnischen Fragestellungen (Fluidanschlüsse, Deckelmontage, etc.) folgende Gesichtspunkte bzgl. der Funktionalität des Aktors samt Aktortestsystem untersucht:

- Antriebsmedium
- Kraftübertragung des Aktors
- Wegmeßeinheit
- Kolbendesign
- Dynamisches Verhalten des Aktors

5.1.1 Antriebsmedium

Vor dem Aufkleben der Deckel auf die Aktorgehäuse werden mit den Testaktoren jeweils erste Funktionstests durchgeführt. Hierbei wird der Kolben, der im Testaktor eingelegt ist, über einen Stift gegen den Balken gedrückt und plötzlich freigegeben. Kann der Balken den Kolben wieder in den Kolbenkanal bewegen, d.h. wird der Balken wieder vollständig entlastet, so kann von der Funktionsfähigkeit des Aktors ausgegangen werden. Nach der Montage des Deckels ist als weiterer Test der Antrieb des Aktors mit Stickstoff vorgesehen. Hierbei ergibt sich ein Startdruck¹² von 20 bis 30 hPa, der benötigt wird, um die Haftreibung des Kolbens im Kolbenkanal zu überwinden.

Im eigentlichen Einsatz der Aktoren werden diese mit deionisiertem Wasser oder Siliconöl¹³ betrieben. Dabei ergibt sich ein leicht erniedrigter Startdruck im Bereich von ca. 10 hPa. Dieser kann mit der Reduktion der Haftreibung des Kolbens durch Fluidschmierung im Spalt zwischen Kolben und Kanal erklärt werden. Betrachtet man die erzielbare Balkenverbiegung, die bei einem gegebenen Druck des Antriebsmediums erreicht wird und damit die durch den Kolben übertragene Kraft, so liegen die entsprechenden Werte beim Einsatz von Siliconöl am höchsten. Da die Aktorkammer von ihrem Funktionsprinzip und Aufbau her nicht hermetisch geschlossen ist, liegt immer eine Leckage des Antriebsmediums vor. Dies bedeutet, daß in der Fluidzuleitung zum Aktor ein Leckstrom fließt, der einen Druckverlust in der Zuleitung bedingt. Da der Druck immer in der Zuleitung und nicht direkt in der Aktorkammer bestimmt wird, können hiermit die Unterschiede in der übertragenen Kraft erklärt werden.

Bei Verwendung von Wasser wird ein linearer Zusammenhang zwischen Leckrate und extern angelegtem Druck ermittelt. Hierzu wird ein Testaktor über ein Vorratsgefäß mit

¹² Die Druckangaben sind immer als Überdruck gegenüber Atmosphärendruck zu verstehen.

¹³ Siliconöl der Firma Bayer, Baysilone® M5000.

Wasser betrieben und der Massenstrom durch den Aktor über eine Waage ermittelt. Die ermittelten Leckagen schwanken im Bereich von 0.5 bis 1 $\mu\text{l/s}$ bei einem externen Druck von 1000 hPa. Hierdurch ist in der Zuleitung ($l = 0.13 \text{ m}$, $d = 200 \mu\text{m}$) ein Druckverlust von ca. 35 hPa nach Gleichung (5.1) bedingt [Töp 88]:

$$\Delta p = \frac{128 \eta l \dot{V}}{\pi d^4} \quad (5.1)$$

mit der dynamische Viskosität η des Mediums ($\eta_{\text{Wasser}} = 1.002 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), der Länge l der Rohrleitung, dem Volumenstrom \dot{V} und dem Durchmesser d der Rohrleitung.

Unter der Annahme, daß bei der Miniaturisierung der Kanäle und gleicher Reynoldszahl der funktionale Zusammenhang zwischen Druckverlust und Volumenstrom erhalten bleibt, wird der Volumenstrom durch die Spalte um den Kolben herum nach [Töp 88]

$$\dot{V} = \frac{s^3 b \Delta p}{12 \eta l} \quad (5.2)$$

für einen Plattenspalt berechnet, mit s der Spaltdicke, b der Spaltbreite, l der Spaltlänge, Δp dem Druckabfall über dem Plattenspalt und η der dynamischen Viskosität des Mediums. Unter der Annahme, daß sich der Kolben in der Mitte des Kolbenkanals befindet, d.h. eine Spaltbreite von $2.5 \mu\text{m}$ vorliegt, ergibt sich ein Volumenstrom von $0.4 \mu\text{l/s}$. Geht man im Gegenzug davon aus, daß sich der Kolben im wesentlichen an einer Wand des Kolbenkanals anlehnt, d.h. der Spalt zwischen Kolben und Seitenwand in diesem Fall $5 \mu\text{m}$ breit ist, so ergibt sich für Wasser ein Volumenstrom von $1.7 \mu\text{l/s}$ ($\Delta p = 1000 \text{ hPa}$, $l = 400 \mu\text{m}$, $\eta = 1.004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Diese Werte liegen in der Größenordnung dessen, was beim Testaktor gemessen wird. Da jedoch die genaue Position des Kolbens innerhalb des Kanals nicht bekannt ist, können diese Werte lediglich als Anhaltspunkt dienen.

Bei Verwendung von Siliconöl werden dagegen Volumenströme von ca. 0.1 nl/s bei einem Druck von 1000 hPa ermittelt ¹⁴. Gemäß (5.1), $l = 0.05 \text{ m}$ und $\eta_{\text{Siliconöl}} = 5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ergibt sich hiermit ein Druckverlust in der Zuleitung von ca. 6 hPa, der im Bereich der Meßgenauigkeit liegt und somit vernachlässigt werden kann.

Aufgrund der Tatsache, daß die Reibung zwischen Kolben und Kolbenkanal durch den Einsatz eines Fluids reduziert wird, sollte der Aktor mit Wasser oder Siliconöl betrieben werden. Da die Leckrate bei Verwendung von Wasser jedoch im Bereich von $\mu\text{l/s}$ liegt und zudem im Mikroprüfsystem die Kraftmessung über DMS erfolgt, ist Siliconöl als optimales Antriebsmedium für das Mikroprüfsystem anzusehen.

¹⁴ Die Volumenstrommessung bei Siliconöl erfolgt nicht direkt über eine Waage. Hierbei wird vielmehr die Zuleitung (ein PVC-Schlauch) teilweise mit Öl befüllt. Aus der Geschwindigkeit, mit der sich die Grenzfläche Luft-Öl im Schlauch bewegt, und dem Schlauchdurchmesser kann der Volumenstrom berechnet werden.

5.1.2 Kraftübertragung des Aktors

Zur Ermittlung der Kraft F , die vom Aktor übertragen werden kann, muß im Aktortestsystem die Verbiegung f des Mikrobalkens gemessen werden. Sofern der Elastizitäts-Modul E des galvanisch hergestellten Balkens (Länge L , Höhe h und Breite b) bekannt ist, kann hieraus über

$$F = \frac{f E h b^3}{4 L^3} \quad (5.3)$$

die vom Kolben auf die Probe übertragene Kraft bestimmt werden. Da im vorliegenden Fall jedoch nur Daten von makroskopischen Zugversuchen an galvanisch abgeschiedenem Kupfer vorliegen, wird beim Testaktor eine andere Vorgehensweise gewählt.

Der Testaktor mit aufgeklebter Deckplatte (siehe Kap. 4) wird mit Siliconöl betrieben. Die Messung der Balkenverbiegung erfolgt jedoch nicht über die Glasfaser, sondern direkt über ein Mikroskop. Da das Siliconöl nur eine geringe Leckrate aufweist, kann der extern gemessenen Druck in guter Näherung mit dem Druck in der Aktorkammer gleichgesetzt werden.

Die hierbei ermittelte Balkenverbiegung f als Funktion des externen Drucks ist in Abb. 5.1a dargestellt. Unter der Annahme, daß die Leckage und damit die Druckverluste in den Zuleitungen zu vernachlässigen sind, kann aus dem extern gemessenen Druck über $F = p A_{\text{Kolben}}$ die Kraft auf die Kolbenquerschnittsfläche A_{Kolben} berechnet werden. Diese ist in Abb. 5.1a als obere Abszisse aufgetragen. Wie von der klassischen Balkentheorie vorhergesagt, erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen Probendeformation und anliegender Kraft.

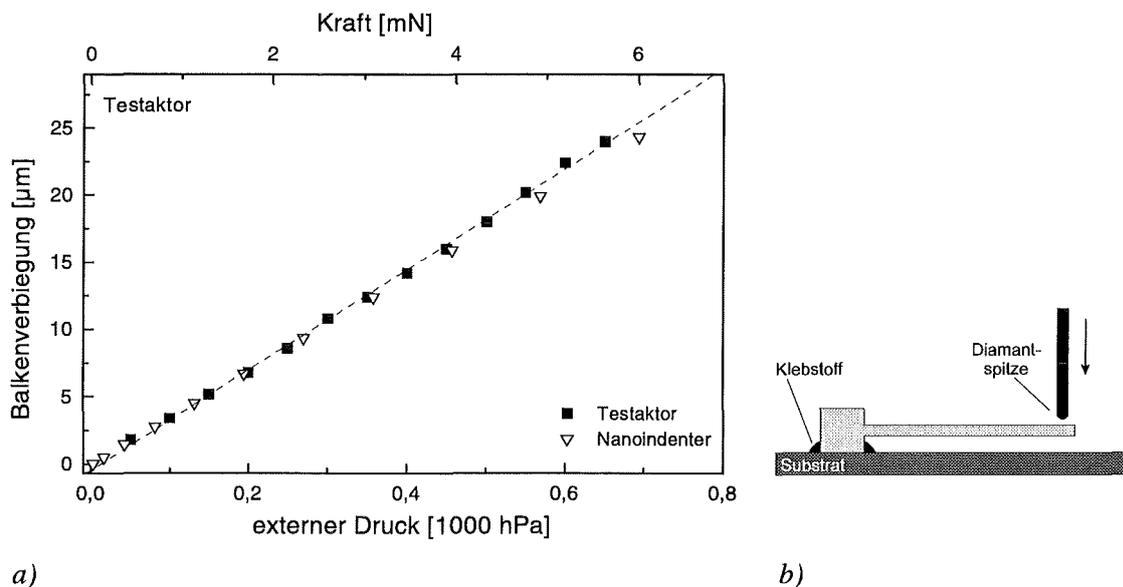


Abb. 5.1: a) Balkenverbiegung als Funktion des extern anliegenden Drucks (Siliconöl als Antriebsmedium). b) Schematische Darstellung des Experiments im Nanoindenter.

Zur Prüfung, ob diese Interpretation der Daten zutrifft, und um mögliche Einflüsse der Haftreibung des Kolbens innerhalb des Kolbenkanals ausschließen zu können, werden Biegebalken aus der gleichen Herstellungsserie vom Substrat getrennt und in einem Nanoindenter¹⁵ verbogen. Die Balken werden hierzu gemäß Abb. 5.1b auf ein Keramiksubstrat aufgeklebt und im Nanoindenter über eine Diamantspitze (Verrundungsradius 50 µm) um maximal 21 µm ausgelenkt. Die mit dem Nanoindenter direkt erhaltene Kraft-Weg-Kennlinie ist in Abb. 5.1a bzgl. der oberen Kraftachse aufgetragen.

Abb. 5.1a zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der beiden Meßkurven. Der aus den Nanoindenter-Messungen ermittelte Elastizitäts-Modul beträgt gemäß Gleichung (1) 122 GPa. Somit stimmt er im Rahmen der Meßgenauigkeit mit dem E-Modul von 120 GPa überein, der mit makroskopischen Zugproben aus galvanisiertem Kupfer ermittelt wurde.

5.1.3 Wegmeßeinheit

Das Funktionsprinzip der Wegmeßeinheit beim Testaktor wurde bereits in Kap. 3 ausführlich beschrieben. Mit dieser Einheit kann direkt die Position der Biegeprobe ermittelt werden. Hierzu wird über eine optische Faser das Licht einer LED in die Mikrostruktur geführt und an der Oberfläche der Biegeprobe in diese Faser zurückreflektiert. Über eine Koppelstruktur wird das reflektierte Licht in der Detektorfaser zu einem Photodetektor geleitet. Die hiermit gemessene Lichtintensität ist abhängig vom axialen Abstand zwischen der spiegelnden Probenoberfläche und der Faserstirnfläche.

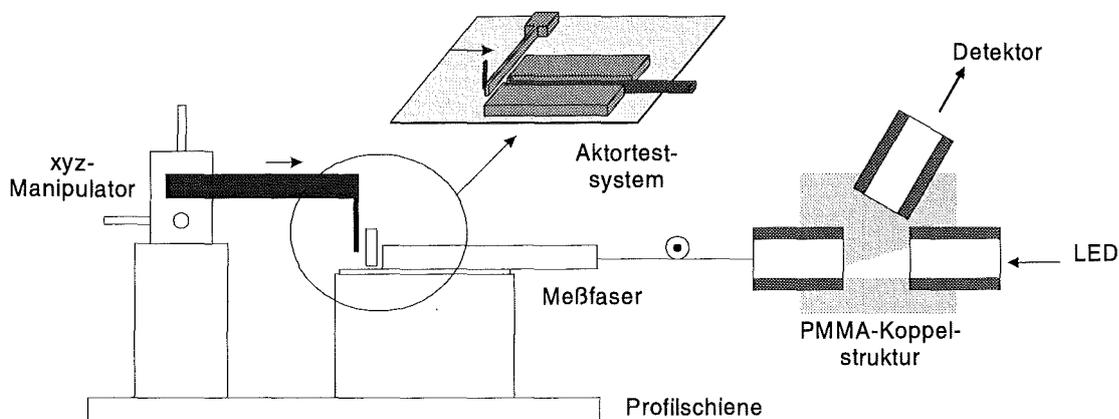


Abb. 5.2: Schematische Darstellung des Meßaufbaus zur Charakterisierung der Wegmeßeinheit des Testaktors.

Für die Charakterisierung der Wegmeßeinheit wird die von der Koppelstruktur kommende Meßfaser (siehe Abb. 3.9) in den Faserschacht eingelegt, bis an die Anschläge geschoben und in dieser Position mit einem Klebstofftropfen fixiert. Die Balkenverbiegung erfolgt über einen Stift, der über eine externe Verschiebeeinheit definiert gegen den Balken bewegt wird (siehe

¹⁵ Messungen wurden am Institut für Materialforschung II des Forschungszentrums Karlsruhe mit dem Nanoindenter UMIS 2000 der Firma CSIRO/Australien durchgeführt.

Abb. 5.2). Mit dieser Verschiebeeinheit, einem xyz-Manipulator¹⁶, kann der Stift mit einer Genauigkeit von ca. 200 nm relativ zu seiner Ausgangsposition gegen den Balken verfahren werden.

In Abb. 5.3 ist die relative Intensitätsänderung als Funktion der Balkenverbiegung f dargestellt. Dabei ergibt sich die relative Intensität aus der mit dem Photodetektor gemessenen Intensität $I(f)$ normiert auf die Intensität $I_0 = I(f=0)$. Im Experiment ist der Anfangsabstand des Stiftes zum Balken auf ca. 10 μm eingestellt, d.h. die negativen Werte der Balkenverbiegung bedeuten, daß der Stift den Balken noch nicht ausgelenkt hat. Der Berührungspunkt zwischen Stift und Biegebalken ergibt sich aus dem Schnittpunkt der beiden Tangenten, die an die horizontale Linie im Bereich negativer Werte der Balkenverbiegung und an die Meßkurve für positive Balkenverbiegungen angelegt werden.

In Abb. 5.3 ist neben den experimentell bestimmten Intensitätsänderungen an Luft auch eine Messung unter Wasser dargestellt, wobei der Bereich zwischen Faserstirnfläche und Biegebalken vollständig mit Wasser bedeckt war. In beiden Fällen wird eine SI-Faser (100/140 μm , N.A. = 0.28) als Meßfaser verwendet. Aufgrund des höheren Brechungsindex von Wasser gegenüber Luft wird die effektive numerische Apertur der Faser unter Wasser reduziert. Hierdurch verringert sich der Öffnungswinkel, unter dem die Faser Licht aussendet. Dies führt zu geringeren Änderungen in der reflektierten Intensität pro Änderung im Abstand zwischen Spiegel und Faserstirnfläche, so daß die Kurve der relativen Intensitätsänderung etwas flacher verläuft. Das Verhalten unter Siliconöl entspricht demjenigen unter Wasser, wobei aufgrund des höheren Brechungsindex von Siliconöl¹⁷ die relative Intensitätsänderung nochmals geringer ausfällt.

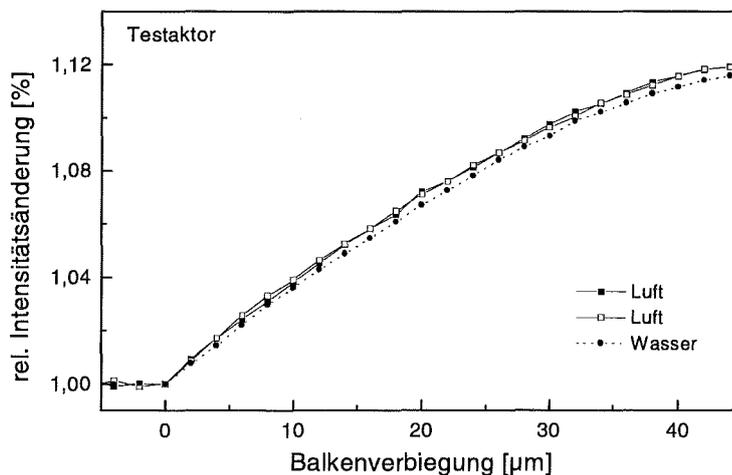


Abb. 5.3: Relative Intensitätsänderung als Funktion der Balkenverbiegung an Luft bzw. unter Wasser. Negative Werte der Balkenverbiegung bedeuten dabei, daß sich der Balken in seiner Ausgangslage befindet.

¹⁶ xyz-Meßtisch der Firma OWIS.

¹⁷ Gemessen mit AB-Refraktometer der Firma Zeiss, $n_{\text{Siliconöl}} = 1.404$.

Die Experimente ergeben, daß verschiedene, nacheinander an einem System ausgeführte Messungen sehr gut reproduzierbar sind (siehe Abb. 5.3, Messungen an Luft). Es zeigt sich jedoch eine deutliche Abhängigkeit von der Position und Ausrichtung der Faser innerhalb des Faserschachtes.

5.1.4 Kolbendesign

Bei der Konzeption des Testaktors für den druckbetriebenen Mikroaktor wurden fünf verschiedene Kolben entworfen, die sich bzgl. ihres Gewichts und der Grundfläche unterscheiden (siehe Abb. 5.4). Erste Experimente werden mit Kolben 1 durchgeführt. Dieser besitzt im Vergleich zu den restlichen Kolben die größte Auflagefläche gegenüber der Grundfläche des Kolbenkanals. Beim Einsatz dieses Kolbens liegt der Druck, der mindestens angelegt werden muß, um den Kolben zu bewegen, im Bereich von 10 hPa. Dieser Wert liegt an der unteren Auflösungsgrenze der verwendeten Drucksensoren. Beim Einsatz der anderen Kolben wird ein ähnlicher Startdruck gemessen. Dies ist in sofern verständlich, da sich die Gesamtfläche, d.h. Grundfläche und Seitenflächen der Kolben, die mit den Kolbenkanal in Berührung sind, bei den verschiedenen Kolben zwischen $4 \cdot 10^{-7}$ und $7 \cdot 10^{-7}$ m² bewegt. Im Vergleich zum Kolben mit der größten Grundfläche ändert sich die Gesamtfläche um maximal 40 %, so daß der Unterschied in der Haftreibung, die bereits durch einen Druck von 10 mbar überwunden werden kann, nicht sehr groß ist.

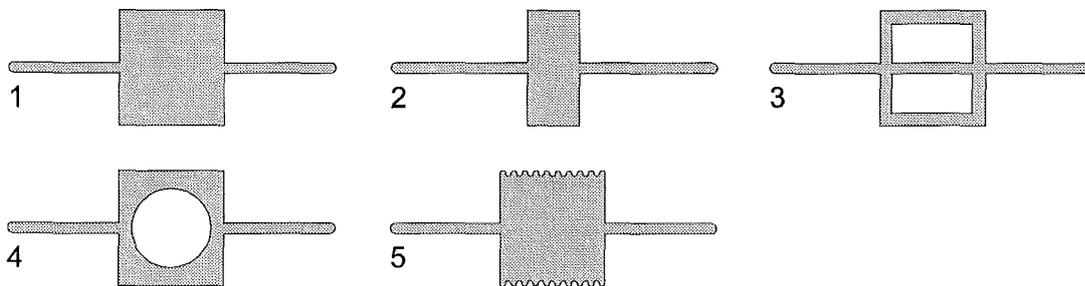


Abb. 5.4: Realisierte Kolbengeometrien für den Testaktor [Wei 93].

Hinsichtlich der Leckage können sich die unterschiedlichen Kolben prinzipiell verschieden verhalten. Speziell der Kolben 2 stellt für das Antriebsmedium den kleinsten Strömungswiderstand dar, da der Spalt zwischen Kolben und Kolbenkanal bzw. Deckel und Substrat im Vergleich zu Kolben 1 die halbe Länge besitzt. Da jedoch die Leckrate bei einem System um bis zu 50 % schwanken kann, können keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Kolben in bezug auf die Leckrate beobachtet werden.

Fazit der Untersuchungen mit unterschiedlichen Kolbengeometrien ist, daß aufgrund der Fluidschmierung durch das Antriebsmedium der Startdruck zum Überwinden der Haftreibung so gering ist, daß man ohne Probleme den Kolben mit der größten Auflage- und Seitenfläche verwenden kann, ohne daß sich das Betriebsverhalten entscheidend verändert. Parallel durchgeführte Tests, bei denen der Aktor mit Stickstoff betrieben wurde, zeigen zudem, daß auch

ohne Fluidschmierung der Startdruck in dieser Größenordnung liegt. Am fluidischen Aktor (siehe Kap. 6), der für eine Anwendung in der Medizintechnik entwickelt wird, kann die Auflagefläche sogar auf $450 \times 1000 \mu\text{m}^2$ erhöht und ein Startdruck im Bereich von 5 hPa erreicht werden.

5.1.5 Dynamisches Verhalten des Aktors

Im Hinblick auf einen möglichen Einsatz des druckbetriebenen Aktors in der minimal invasiven Chirurgie (siehe Kap. 6) wird dieser auch auf sein dynamisches Verhalten hin untersucht. Hierzu wird der Aktor mit einem periodischen Drucksignal angesteuert, das über ein Mikroventil¹⁸ erzeugt wird (siehe Abb. 5.5b). Die Bewegung des Balkens und damit die Kolbenbewegung werden hierbei über das Intensitätssignal der Wegmeßeinheit aufgezeichnet. In Abb. 5.5a sind sowohl der extern anliegende Druck als auch die hieraus resultierende Kolbenbewegung als Funktion der Zeit dargestellt.

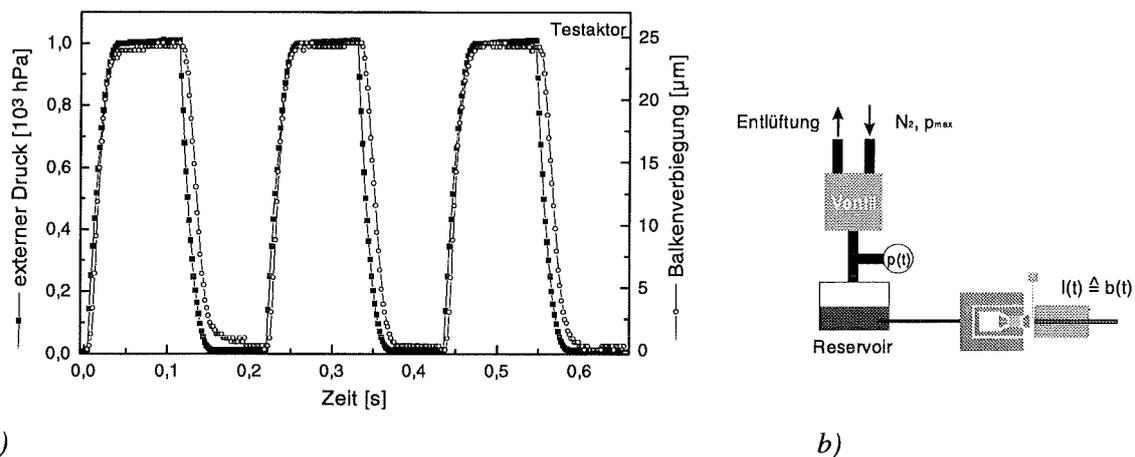


Abb. 5.5: a) Dynamisches Verhalten des Testaktors mit der Balkenverbiegung und dem externen Druck als Funktion der Zeit bei einer Frequenz des Ventils von 5 Hz [Mül 95].
b) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Da der Druck außerhalb der Aktorkammer gemessen wird, die Zuleitung eine gewisse Länge besitzt und ein Mindestdruck von 10 hPa anliegen muß, um die Haftreibung des Kolbens zu überwinden, ist das Wegsignal und das Drucksignal zeitlich gegeneinander verschoben. Insgesamt zeigt sich, daß der Kolben dem vorgegebenen Drucksignal sehr gut folgen kann. Mit dem vorliegenden Meßaufbau und den vorhandenen Mikroventilen lassen sich Frequenzen bis 20 Hz realisieren.

¹⁸ Firma Bürkert, Typ 6104.

5.2 Mikroprüfsystem

5.2.1 Wegmeßeinheit

Die Charakterisierung der Wegmeßeinheit des Mikroprüfsystems wird analog zu derjenigen des Testaktors durchgeführt (siehe hierzu Kap. 5.1). Im Fall des Mikroprüfsystems wird das Gestänge (siehe Abb. 3.12) über einen Stift bewegt, der über eine Verschiebeeinheit mit Differentialmikrometerschraube gegen das Gestänge verfahren wird. Dabei kann die Relativbewegung des Stifts wiederum auf ca. 200 nm genau vorgegeben werden. Im Experiment wird ein Anfangsabstand des Stifts zum Gestänge von ca. 10 μm vorgegeben.

Es werden entsprechende Messungen an der Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel bzw. senkrechtem Spiegel durchgeführt. Die von den jeweiligen Fasern übertragenen Intensitäten werden mit Hilfe eines Photodetektors bestimmt, der eine der Intensität proportionale Spannung als Meßsignal liefert. Im folgenden werden die Ergebnisse der Meßeinheit mit 45°-Spiegel detailliert dargestellt. Für die Wegmeßeinheit mit senkrechtem Spiegel werden im weiteren nur die wesentlichen Unterschiede aufgezeigt.

Im Hinblick auf den Einsatz der Wegmeßeinheit im Mikroprüfsystem werden für beide Varianten der Wegmeßeinheit folgende Gesichtspunkte untersucht:

- Möglichkeit der Kalibrierung
- Verhalten des Systems bei Verwendung von Siliconöl
- erreichbare Auflösung in der Wegmessung

5.2.1.1 45°-Spiegel

In Abb. 5.6a sind exemplarisch Meßkurven für die Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel dargestellt, wobei die Intensitätssignale der Transmissions- und Reflexionsfaser jeweils als Funktion der Spiegelposition dargestellt sind. Dabei gibt die Spiegelposition den Stellweg des Spiegels aus seiner Ausgangslage heraus an. Negative Werte der Spiegelposition bedeuten, daß der Stift das Gestänge noch nicht berührt hat und sich der Spiegel in seiner Ausgangslage befindet. In Abb. 5.6b ist das aus dem Transmissions- und Reflexionssignal nach

$$S_{diff}^{norm} = \frac{I_{trans} - I_{reflex}}{I_{trans} + I_{reflex}}$$

berechnete normierte Differenzsignal S_{diff}^{norm} dargestellt. Es werden als Einkoppelfaser eine GI-Faser (62/125, N.A. = 0.25) und als Detektionsfasern zwei SI-Fasern (110/125, N.A. = 0.34) verwendet. In Abb. 5.6a und b sind neben den experimentellen Ergebnissen zudem Daten einer Raytrace-Simulation dargestellt, bei der die im Experiment vorliegende Geometrie zugrunde gelegt wurde. Die Abweichungen zwischen Experiment und Simulationen können auf die exakte Ausrichtung der Fasern im Meßaufbau und mögliche Winkelfehler beim Brechen der Fasern zurückgeführt werden.

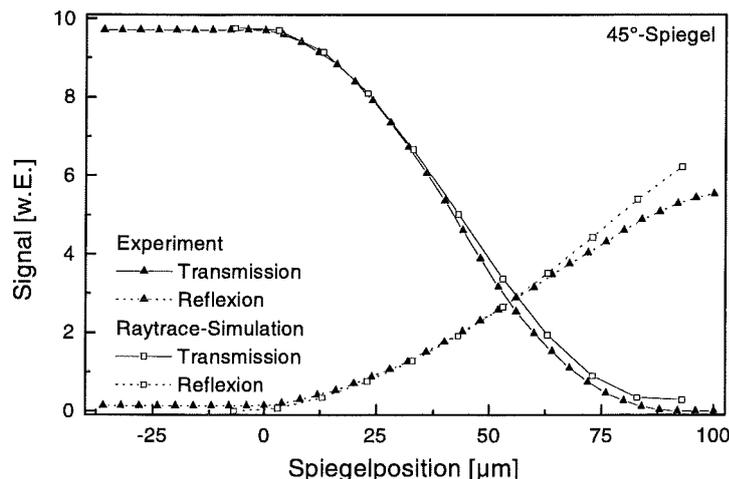


Abb. 5.6a: Intensität des Transmissions- und Reflexionskanals als Funktion der Spiegelposition bei der Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel (negative Werte bedeuten bei den Meßergebnissen, daß sich der Spiegel in seiner Ausgangslage befindet).

Kalibrierung

Da die Wegmeßeinheit eine Abhängigkeit des Meßsignals von der exakten Faserposition im Faserschacht aufweist, müssen die fertig montierten Systeme kalibriert werden. Bei der konstruktiven Auslegung des Mikroprüfsystem wurde dies durch einen entsprechend groß gewählten Abstand zwischen Gestänge und Kolben bereits berücksichtigt, so daß das Gestänge über einen Stift definiert verschoben und somit die Wegmeßeinheit kalibriert werden kann.

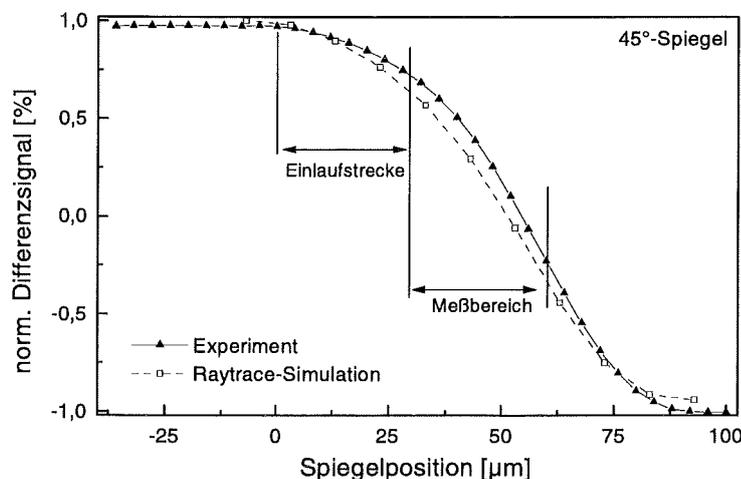


Abb. 5.6b: Normiertes Differenzsignal S_{diff}^{norm} entsprechend der in Abb. 5.6a dargestellten Signale des Transmissions- und Reflexionskanals.

Um den Einfluß der Stiftposition in y-Richtung (senkrecht zur Bewegungsrichtung des Gestänges) relativ zum verbreiterten Ende des Gestänges bei der Kalibrierung ausschließen zu können, werden mehrere Messungen durchgeführt, bei denen die Stiftposition in y-Richtung variiert wird. Hierbei kann keine Abhängigkeit des Signalverlaufs von der Stiftposition festgestellt werden, so daß bei der Kalibrierung die Position des Stifts nicht exakt vorgegeben werden muß. Mit diesen Messungen kann die exakte Führung des Spiegels in x-Richtung durch die elastische Aufhängung nachgewiesen werden. Sie ist unabhängig von der genauen Position der Krafteinleitung auf das Gestänge.

Verhalten bei Verwendung von Öl

Da der Aktor sowohl mit Stickstoff als auch Siliconöl betrieben wird, ist das Verhalten der Wegmeßeinheit von Interesse, wenn das Volumen zwischen den Glasfasern und dem Spiegel mit Siliconöl befüllt ist.

Hierzu wird die Wegmeßeinheit zunächst an Luft vermessen und anschließend der gesamte Bereich zwischen Spiegel und Glasfasern mit Siliconöl befüllt. Um Reflexionen des divergent von der Faser abgestrahlten Lichts an der Grenzfläche Öl-Luft ausschließen zu können, muß das Volumen, das von den Fasern und dem Spiegel begrenzt wird, vollständig mit Öl befüllt sein.

Abb. 5.7a und b zeigen die entsprechenden Transmissions- und Reflexionssignale sowie die normierten Differenzsignale einer Wegmeßeinheit sowohl unter Siliconöl als auch an Luft. Aufgrund des höheren Brechungsindex von Öl gegenüber Luft reduziert sich die effektive numerische Apertur der Fasern. Hierdurch wird die Divergenz des Lichts verringert, das von der Einkoppelfaser abgestrahlt wird. Ebenso reduziert sich der Akzeptanzwinkel der Transmissions- und Reflexionsfaser.

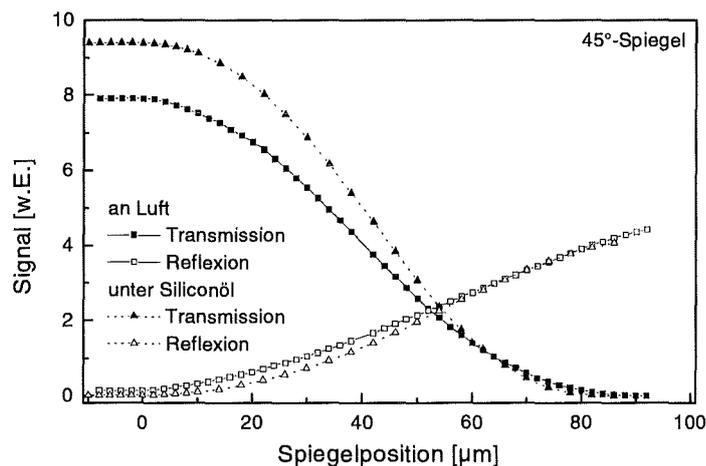


Abb. 5.7a: Unterschiedliches Verhalten der Wegmeßeinheit unter Siliconöl und Luft mit den Transmissions- und Reflexionssignalen als Funktion der Spiegelposition.

Die geringere effektive numerische Apertur der Einkoppelfaser bei Verwendung von Öl bedingt bei gleicher Leistung der Lichtquelle eine um 15% erhöhte Koppeffizienz zur Transmissionsfaser (siehe Abb. 5.7a). Gleichzeitig reduziert sich die Koppeffizienz zur Reflexionsfaser. Als Konsequenz hiervon ist die Empfindlichkeit von S_{diff}^{norm} als Funktion der Spiegelposition auf den ersten 20 µm reduziert (siehe Abb. 5.7b). Dagegen erhöht sich bei Verwendung von Siliconöl die Empfindlichkeit im eigentlichen Meßbereich zwischen 30 und 60 µm. Man erhält eine relative Intensitätsänderung von ca. 120 % innerhalb des Meßbereichs von 30 µm bei Verwendung von Öl, die bei Messungen an Luft dagegen nur bei 104 % liegt. Dies bedeutet, daß bei Verwendung von Siliconöl die Auflösung der Wegmeßeinheit leicht erhöht ist.

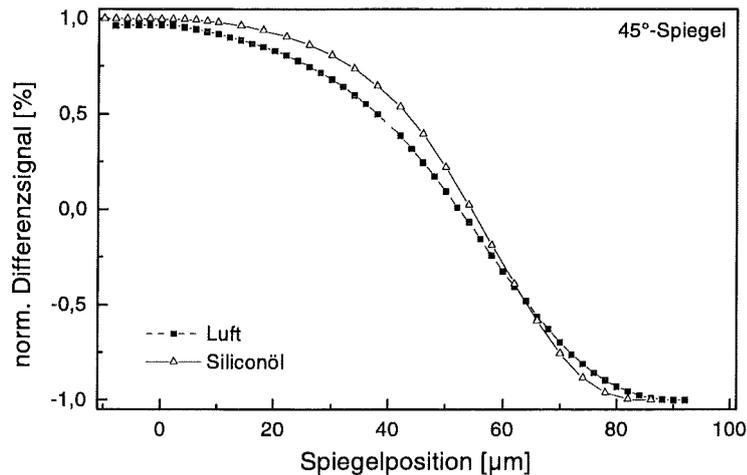


Abb. 5.7b: Normiertes Differenzsignal S_{diff}^{norm} entsprechend der in Abb. 5.7a dargestellten Signale des Transmissions- und Reflexionskanals.

Auflösung

Hierzu werden an einer Wegmeßeinheit Messungen über einen Zeitraum von mehreren Stunden durchgeführt. Dabei ergibt sich die in Abb. 5.8 im Insert dargestellte Kurvenschar für das normierte Differenzsignal S_{diff}^{norm} als Funktion der Spiegelposition. Bedingt durch das Spindelspiel der Mikrometerschraube der Verschiebeeinheit liegen die Kurven nicht exakt übereinander, sondern sind bezüglich der Abszisse parallel zueinander verschoben. Um die Kurven miteinander vergleichen zu können, wurde jeweils der Intensität $S_{diff}^{norm} = 0\%$ willkürlich die relative Spiegelposition¹⁹ 20 μm zugeordnet. Die hiermit durchgeführte Parallelverschiebung der Kurven in x-Richtung ist zulässig, da über die Mikrometerschraube nur eine Relativbewegung des Gestänges durchgeführt wird. Die so normierten Meßkurven liegen exakt übereinander (siehe Abb. 5.8), d.h. das System weist über einen größeren Zeitraum eine hohe Stabilität auf.

Der Mittelwert aus diesen einzelnen, auf $S_{diff}^{norm} = 0\%$ bei 20 μm normierten Kurven besitzt eine Standardabweichung von 0.5 % innerhalb der ersten 70 μm der Spiegelbewegung, d.h. innerhalb der Einlaufstrecke und dem eigentlichen Arbeitsbereich der Wegmeßeinheit. Betrachtet man hierzu die Schwankungen der Einzelintensitäten, die einer Schwankung in den gemessenen Spannungen von max. 30 mV entspricht, so liefert die Fehlerbetrachtung ebenfalls eine Genauigkeit im normierten Differenzsignal von 0.5 %. Ausgehend von einer relativen Intensitätsänderung von ca. 100 % im eigentlichen Meßbereich von 30 μm , d.h. 3.3 % Intensitätsänderung pro μm Wegänderung, ergibt sich hieraus eine Wegauflösung der optischen Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel von ca. 150 nm.

¹⁹ Die relative Spiegelposition bezieht sich nicht auf die Auslenkung des Spiegels aus dessen Ruhelage heraus. Sie ist vielmehr definiert durch die Bedingung, daß für $S_{diff}^{norm} = 0\%$ die Position 20 μm vorliegt.

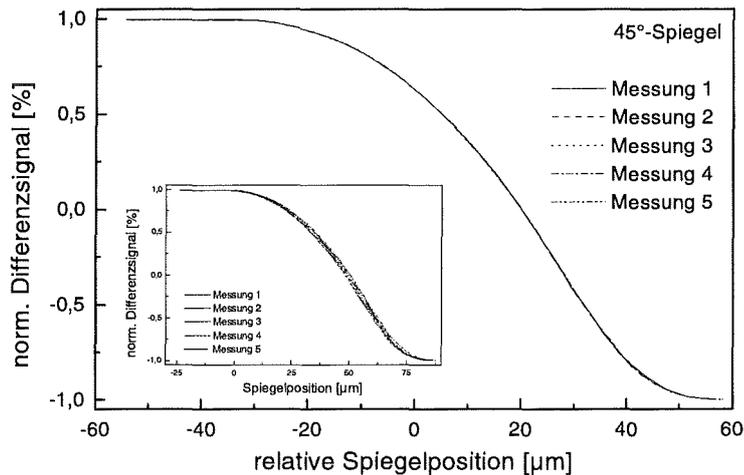


Abb. 5.8: Normierte Differenzsignale bei Messung über einen Zeitraum von mehreren Stunden, wobei für $S_{diff}^{norm} = 0\%$ willkürlich die relative Spiegelposition auf $20\ \mu\text{m}$ gesetzt wurde. Im Insert sind die Originaldaten dargestellt, die aufgrund des Spindelspiels der Verfahr-einheit gegeneinander in x -Richtung verschoben sind.

Zur weiteren Abschätzung der Auflösung wird willkürlich eine der Messungen als Referenzmessung definiert und die Meßkurve durch ein Polynom 8. Grades angenähert. Dabei wird der durch die Mikrometerschraube vorgegebene Stellweg des Spiegels als Funktion des normierten Differenzsignals dargestellt. Mit Hilfe dieses Näherungspolynoms kann aus den gemessenen Differenzsignalen der Stellweg des Spiegels berechnet werden. Vergleicht man diesen berechneten Stellweg mit dem durch die Mikrometerschraube vorgegebenen, so weichen die beiden Werte im Arbeitsbereich²⁰ der Wegmeßeinheit um ca. $200\ \text{nm}$ voneinander ab (siehe Abb. 5.9). Da der Stellweg über die Mikrometerschraube nur auf $200\ \text{nm}$ genau eingestellt werden kann, können die Abweichungen auf die Verschiebeeinheit zurückgeführt werden.

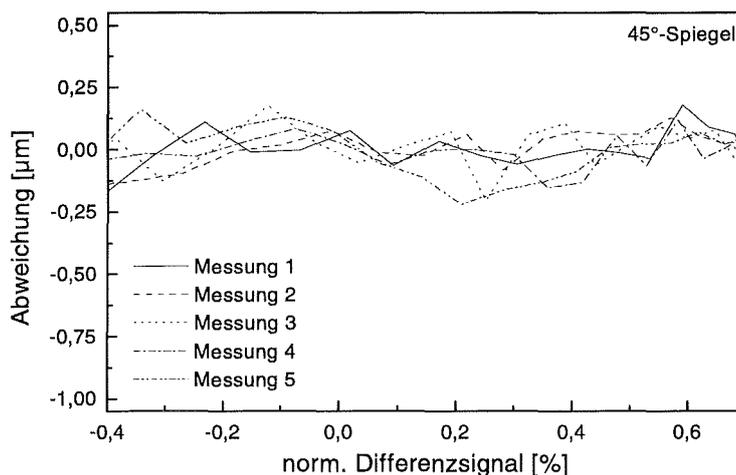


Abb. 5.9: Abweichungen zwischen vorgegebener, relativer Spiegelposition und der aus einer Kalibrierkurve berechneten Position als Funktion des normierten Differenzsignals.

²⁰ Der Arbeitsbereich der Wegmeßeinheit schließt sich an die Einlaufstrecke von $30\ \mu\text{m}$ an und entspricht im vorliegenden Fall einem normierten Differenzsignal zwischen -35 und 70% (siehe Abb. 5.8).

Dies bedeutet, daß mit der optischen Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel eine Wegmessung innerhalb des Mikroprüfsystems mit einer Genauigkeit von 200 nm und besser möglich ist. Bei der Kalibrierung der Wegmeßeinheit, die zur Berechnung des Polynoms verwendet wird, sollte allerdings das Gestänge über eine hochpräzise Verfahrenseinheit verschoben werden (z.B. ein über einen Piezokristall angetriebenen Positioniertisch), so daß die in Abb. 5.9 dargestellten Abweichungen deutlich reduziert werden können.

5.2.1.2 Senkrechter Spiegel

In Abb. 5.10 sind typische Meßkurven für die Wegmeßeinheit mit senkrechtem Spiegel dargestellt, wobei die Intensitätssignale I_1 und I_2 der schrägen und mittleren Detektionsfaser jeweils als Funktion der Spiegelposition dargestellt sind. Die Spiegelposition ist wie in Kap. 5.2.1.1 definiert. Abb. 5.10 stellt die Messungen an Luft und unter Siliconöl dar. In Abb. 5.11 ist das nach

$$S_{diff}^{norm} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \quad (5.4)$$

berechnete normierte Differenzsignal für beide Betriebsmedien dargestellt.

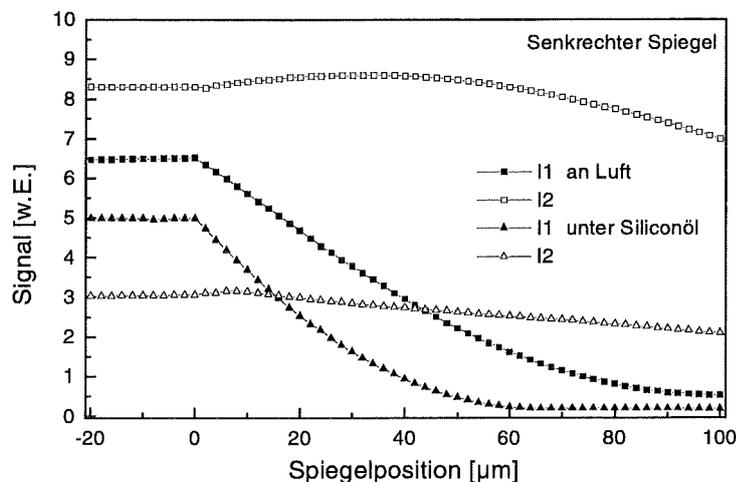


Abb. 5.10: Verhalten der Wegmeßeinheit mit senkrechtem Spiegel sowohl an Luft als auch unter Siliconöl.

Wie bereits aus Raytrace-Simulationen zu erwarten war, sind die Koppelleffizienzen zwischen der Einkoppelfaser und den beiden Reflexionsfasern deutlich reduziert im Vergleich zur Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel. Dies bedingt, daß eine weitaus höhere Lichtintensität in die Mikrostruktur eingekoppelt werden muß, um verwertbare Signale an den beiden Reflexionsfasern zu erhalten.

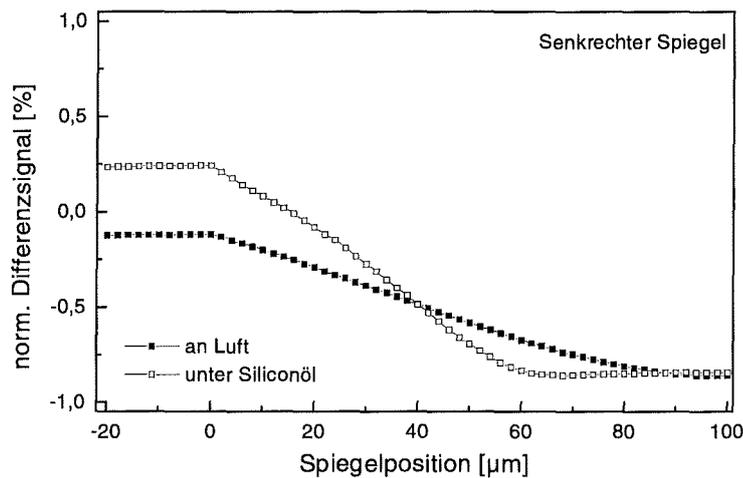


Abb. 5.11: Normierte Differenzsignale für die Wegmeßeinheit mit senkrechtem Spiegel sowohl an Luft als auch unter Siliconöl.

Der Einfluß von Siliconöl auf das Verhalten dieser Wegmeßeinheit fällt deutlicher als bei der Einheit mit 45°-Spiegel aus. Bei gleicher Intensität der Lichtquelle verringert sich die Koppeffizienz der Reflexionsfaser 2 auf 40 % des Werts, den man bei Messungen an Luft erhält. Dies kann wiederum durch die Verringerung der effektiven numerischen Apertur der Einkoppelfaser und Detektionsfaser 2 beim Einsatz von Siliconöl erklärt werden. Die Koppeffizienz der Reflexionsfaser 1 wird ebenfalls reduziert, wobei der Effekt hier nicht sehr ausgeprägt ist, da Einkoppel- und Reflexionsfaser 1 unter dem gleichen Winkel gegenüber dem Spiegel ausgerichtet sind.

Der wichtigste Unterschied bei der Verwendung verschiedener Betriebsmedien ist, daß das Signal der schrägen Faser (Reflexionsfaser 1) bei Verwendung von Siliconöl sehr viel schneller als beim Einsatz an Luft über dem Stellweg des Spiegels abfällt. Hierdurch wird der für Messungen zur Verfügung stehende Bereich des Spiegelstellwegs auf ca. 70 µm reduziert (bei Messungen an Luft liegt dieser bei 90 µm). Bedingt durch den steileren Abfall im Reflexionssignal 1 ergibt sich unter Siliconöl eine relative Intensitätsänderung von 110 % über 70 µm, während bei Messungen an Luft nur Änderungen im normierten Differenzsignal von 90 % über 90 µm erzielt werden. Somit liegt auch bei dieser Variante der Wegmeßeinheit die Wegauflösung beim Einsatz von Öl wiederum etwas höher als beim Betrieb an Luft.

Entsprechend den Versuchen bei der Wegmeßeinheit mit 45°-Spiegel wird auch bei der senkrechten Ausführung der Vergleich von errechneten²¹ Stellwegen und über die Verfahreinheit vorgegebenen Stellwegen durchgeführt. Entsprechend den Messungen am 45°-Spiegel liegen beim senkrechten Spiegel die Abweichungen zwischen den beiden Werten ebenfalls im Bereich von 200 nm, die wiederum auf die Genauigkeit der Verfahreinheit zurückzuführen sind.

²¹ Wiederum wird eine Messung als Referenzmessung verwendet und aus dem Näherungspolynom der Stellweg als Funktion des normierten Differenzsignals berechnet.

5.2.2 Kraftmeßkolben

Neben der Wegmeßeinheit stellen die Kraftmeßkolben für die Kraftmessung das weitere wesentliche Element des Mikroprüfsystems dar. Im folgenden werden zunächst die in der Konzeptionsphase des Mikroprüfsystems durchgeführten Tests im Hinblick auf die Realisierbarkeit der DMS auf einer Polyimidmembran dargestellt. Daran schließt sich die mechanische Charakterisierung der Kraftmeßkolben an.

5.2.2.1 Teststrukturen für die DMS-Herstellung

In der Konzeptionsphase der Kraftmeßkolben war ersichtlich, daß eine Applikation der DMS durch Aufkleben, wie sie an makroskopischen Proben durchgeführt wird, bei den vorliegenden Mikrostrukturen nicht durchführbar ist. Gegen die weitere Variante, bei der die DMS direkt auf den Kolben hergestellt werden, sprechen die vorliegenden Materialkombinationen. Hierbei müßte die Trägerfolie auf die metallischen Mikrostrukturen, die sich in einer PMMA-Matrix befinden, aufgeschleudert und strukturiert werden. Da als Trägermembran im wesentlichen photostrukturierbares Polyimid in Frage kommt, würde die Imidisierung²² der Membran zu einem Aufschmelzen des PMMA führen. Somit wäre die Zerstörung der Membran noch während der Herstellung sehr wahrscheinlich.

Daher werden die DMS samt Trägerfolie direkt auf einem Substrat hergestellt und anschließend auf diesen die eigentliche LIGA-Mikrostruktur aufgebaut. Für dieses Herstellungsverfahren (siehe Kap. 4) wurden daher zunächst Teststrukturen hergestellt, mit denen die Kompatibilität der DMS-Herstellung mit dem LIGA-Verfahren und die folgenden beiden Gesichtspunkte untersucht werden sollten:

- Welche Bereiche können mit den DMS bzw. deren Trägermembran überspannt werden?
- Wie gut haftet diese Trägerfolie auf der nachträglich aufgalvanisierten Mikrostruktur?

Für diese Teststrukturen wurden entsprechend dem in Kap. 4 dargestellten Herstellungsprozeß Lithographie-Masken hergestellt. Hierbei wird die Röntgentiefenlithographie durch optische Lithographie ersetzt, d.h. der Röntgenresist wird durch einen ca. 50 µm dicken Photolack ausgetauscht. Da bei den Teststrukturen die Güte der Strukturwände über deren Höhe unerheblich ist, kann der Photolack ohne Probleme verwendet werden. Als weiterer Unterschied zu dem in Kap. 4 dargestellten Herstellungsprozeß entfällt die Strukturierung der Opferschicht, da die Teststrukturen komplett vom Substrat gelöst werden.

Als Teststrukturen wurden Rahmen und Zugproben realisiert, die in Abb. 5.12 schematisch dargestellt sind. Mit den *Rahmen* soll untersucht werden, welche Bereiche idealerweise mit der Polyimidmembran überspannt werden können, d.h. welche Abmessungen die freitragende Membran aufweisen kann. Die Rahmen besitzen Außenabmessungen von 2 x 4 mm² und weisen zur Mitte hin 3 rechteckige Öffnungen auf. Diese Öffnungen haben jeweils eine Länge L

²² Polyimid muß bei 400°C imidisiert werden.

von 500 bzw. 800 μm und eine Breite b , die bei den verschiedenen Rahmen zwischen 200, 300 bzw. 400 μm variiert. Über diesen Öffnungen sind nach der Herstellung streifenförmige Polyimidmembranen gespannt (siehe Abb. 5.12). Die Breite b_s der Streifen variiert zwischen 150, 200 bzw. 250 μm . Der Bereich der Streifen, der über die Haftschrift (siehe Kap. 4, Abb. 4.1d) direkt mit der aufgalvanisierten Rahmenstruktur verbunden ist, besitzt eine Länge L_{ii} von 50 bzw. 200 μm .

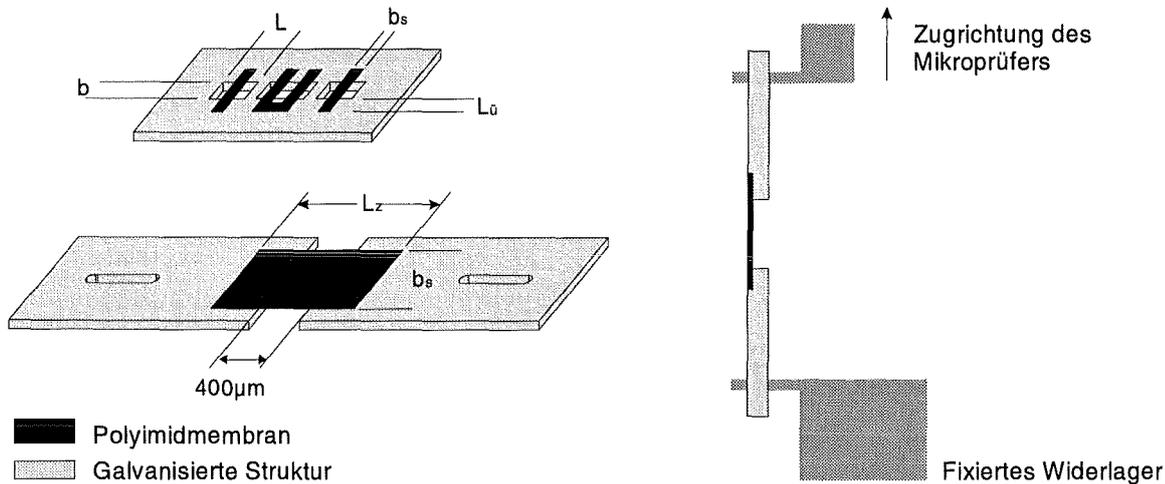


Abb. 5.12: Teststrukturen für die DMS-Herstellung sowie prinzipieller Aufbau der Zugversuche.

Die Zugproben bestehen aus zwei rechteckigen Plättchen ($2.5 \times 5.8 \text{ mm}^2$), die für die Zugversuche mit Langlöchern (Breite 500 μm) ausgestattet sind. Die Plättchen sind nach der Herstellung über die Polyimidmembran miteinander verbunden, die eine Breite von 1500 μm und eine Länge L_z von 800, 1000, 1200 bzw. 1400 μm besitzt, wobei der freigespannte Bereich jeweils 400 μm lang ist.

Wie bereits bei Experimenten für die Herstellung von Röntgenmasken auf der Basis von Polyimidmembranen festgestellt wurde, sollte die Chromschicht, die als Haftvermittler auf das Polyimid aufgedampft wird, eine Dicke von ca. 2-4 nm aufweisen [Ses 95]. Für die Galvanikstartschicht aus Gold, die direkt auf das Chrom aufgedampft wird, wird eine Dicke von 75 nm gewählt. Aufbauend auf diese Schichtfolge konnten analog zu dem in Kap. 4 dargestellten Herstellungsprozeß freitragende Polyimidmembranen realisiert werden (siehe Abb. 5.13). Aufgrund der Zugspannungen in der Membran, die auf den Herstellungsprozeß zurückzuführen sind²³, zeigen die Membranen im mittleren Bereich eine leichte seitliche Einschnürung, wobei die Membranen flach gespannt sind. Die Stärke der Einschnürung ist dabei abhängig von der Membranbreite und -länge.

Die Tests ergeben, daß Membranen mit einem freigespannten Bereich von $400 \times 250 \mu\text{m}^2$ hergestellt werden können. Die Breite des Überlapp L_{ii} sollte jedoch mindestens 100 μm betragen, da es bei den größten Membranen mit einem Überlapp von 50 μm stellenweise zu einer Ablösung der Membran von der galvanisierten Metallstruktur kam.

²³ Da das Polyimid einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten als das Silicium-Substrat besitzt, weisen die Membranen, die bei 400°C imidisiert werden, nach der Herstellung Zugspannungen auf.

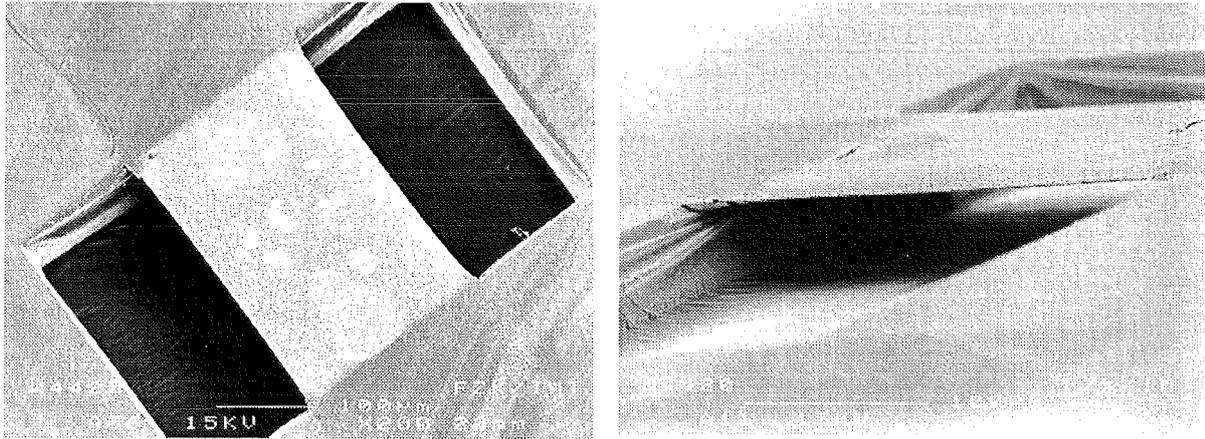


Abb. 5.13: REM-Aufnahmen der DMS-Teststrukturen. a) Aufsicht mit der Einschnürung aufgrund der Zugspannung in der Membran, b) Seitenansicht.

Die Zugversuche an den Polyimidmembranen werden an einem Mikrotester²⁴ durchgeführt, mit dem die Maximalkraft bis zum Reißen der Membran ermittelt wird. Im Zugversuch wird zunächst die Zugprobe über die Langlöcher im Mikrotester eingehängt (vergl. Abb. 5.12), das fixierende Widerlager ausgerichtet und dann der entsprechende Haken durch das untere Langloch geführt, so daß die Probe genau in Zugrichtung ausgerichtet ist. Im Zugversuch reißen die Membranen bei Belastungen von 270 mN, was einer Zugfestigkeit der Membran von 120 MPa²⁵ entspricht. Es konnte bei den Zugversuchen nicht beobachtet werden, daß die Membran sich vom Kupfer löste, d.h. die Verbindung zwischen der Membran und der galvanisierten Struktur via Chrom- und Gold-Schicht ist sehr stabil. Für die Scherfestigkeit der Verbindung zwischen Kupfer und Membran ergibt sich eine Untergrenze von 0.47 MPa.

Entsprechend obiger Testergebnisse konnten die Kraftmeßkolben ausgelegt werden. Die überspannten Bereiche mit einer Fläche von $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ sind daher problemlos zu realisieren. Um bei der Haftung der Membran zur galvanisierten Struktur auf der sicheren Seite zu sein, wurde der Überlapp auf 200 bzw. 250 μm festgesetzt.

5.2.2.2 Test der Kraftmeßkolben

Nach dem Ablösen der Kolben von der Opferschicht werden diese zunächst optisch begutachtet. Dabei konnte festgestellt werden, daß es bei dejustierter Strukturierung der Haft- und Galvanikstartschicht (siehe Abb. 4.1d) zu einem Ablösen der Polyimidmembran von der Kupferstruktur kommt. Dabei rollt sich die Membran aufgrund der inneren Zugspannung vom einem Rand her auf, da sie im dejustierten Bereich nicht vollständig über die Chrom- und Galvanikstartschicht mit der galvanisierten Metallstruktur verbunden ist. Als Konsequenz hiervon sollten bei einem Redesign die Strukturen auf der entsprechend Lithographie-Maske so ausgelegt werden, daß die Bereiche der Haft- und Galvanikstartschicht einen Überlapp von ca.

²⁴ Mikrotester 22 der Firma DAGE.

²⁵ Legt man Kräfte von bis zu 30 mN zugrunde, mit denen die DMS-Kolben maximal belastet werden, so liegt die Zugbelastung der Membran ($b = 2 \times 150 \mu\text{m}$, $h = 1.4 \mu\text{m}$) bei 71 MPa. Hierbei ist die Federaufhängung des Kolbens und die DMS-Mäander noch nicht beachtet. Dies bedeutet, daß die Zugfestigkeit der Folie den Anforderungen für den Einsatz auf den DMS-Kolben genügt.

10 μm gegenüber der Membran aufweisen. Somit kann auch bei einer leicht dejustierten Strukturierung der Haft- und Galvanikstartschicht eine vollständige Bedeckung der Membran im Bereich des Überlapps gewährleistet werden.

Der elektrische Widerstand der DMS wird über Meßspitzen mit einem Durchmesser von 100 μm gemessen und variiert für Kolben eines Substrats um ca. 2%. Über mehrere Substrate gemittelt ergibt sich ein Widerstand der DMS von 70 bis 80 Ω . Ausgehend von einem spezifischen Widerstand von $3,9 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ [Gol 95] der am IMT aufgedampften und bei 400°C getemperten Goldschichten waren Widerstände von 90 Ω erwartet worden.

Die Kraftmeßkolben werden gemäß der in Abb. 5.14 schematisch dargestellten Versuchsanordnung auf ihr mechanisches Verhalten hin untersucht. Hierzu werden der Meß- und Referenzkolben, die vom gleichen Substrat stammen²⁶ und auf diesem dem gleichen System²⁷ zugeordnet sind, auf einem Substratplättchen montiert. Bei dieser Montage wird nur der hintere Teil des Kolbens mit dem Substrat verklebt, der Anker und die Federaufhängung ragen über den Rand des Plättchens hinaus (siehe Abb. 5.14).

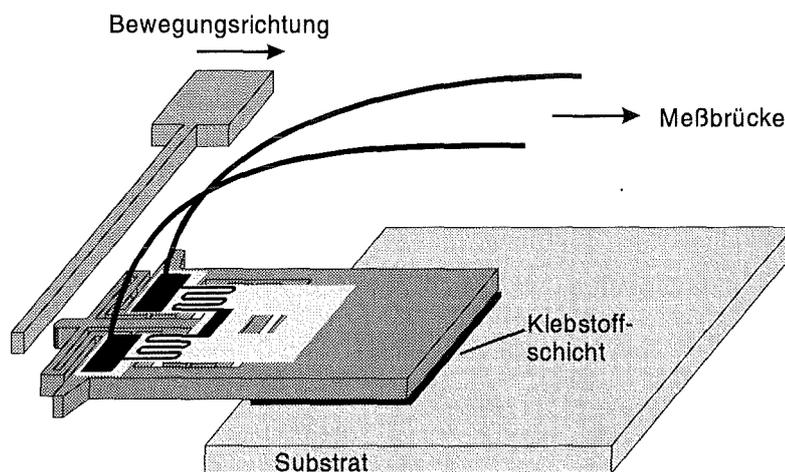


Abb. 5.14: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung für die mechanischen Tests an den Kraftmeßkolben.

Die Kolben werden gemäß Abb. A.2 als Wheatstone'sche Halbbrücke mit den entsprechenden Ergänzungswiderständen verschaltet. Der Referenzkolben dient dabei, wie im Anhang dargestellt, der Temperaturgangkompensation. Um mögliche thermische Einflüsse auf die DMS, die bei diesem ersten Design aus Gold bestehen, weiter zu reduzieren, wird der gesamte Aufbau mit den beiden Kraftmeßkolben in einer Plexiglasbox gekapselt. Dabei besitzt die Kapselung eine Durchführung für den Biegebalken.

Um Kräfte im Bereich von 10 mN definiert auf den Kraftmeßkolben übertragen zu können, wird ein Mikrobiegebalken gemäß Abb. 5.14 über eine Verschiebeeinheit (xyz-Verfahrtisch, entsprechend Kap. 5.1.3) gegen den Stempel des einen Meßkolbens bewegt. Ab dem

²⁶ Dies beudet, daß gleiche Herstellungsbedingungen vorliegen.

²⁷ Hierdurch wird gewährleistet, daß die Kolben die gleiche Strukturhöhe nach dem Diamantfräsen, sowie die gleiche Membran- und DMS-Mäander-Dicke besitzen.

Berührungspunkt zwischen Kolben und Biegebalken gilt für die Kraft F , die auf den Kolben übertragen wird, folgender Zusammenhang mit dem Balkenverfahrweg x :

$$F = \frac{3 E I}{L^3} x \quad (5.5)$$

Dabei ist E der Elastizitäts-Modul, L die Balkenlänge und I das Flächenträgheitsmoment.

Die Wheatstone'sche Meßbrücke mit den beiden Kraftmeßkolben und den Ergänzungswiderständen wird über einen kommerziellen Trägerfrequenz-Meßverstärker²⁸ mit einer Brückenspeisespannung von 1 bis 3 V betrieben. Die Ergänzungswiderstände sind entsprechend den DMS-Widerständen ausgelegt, wobei über zwei zusätzliche Potentiometer die Brücke abgeglichen werden kann.

In ersten Tests wurde die Temperaturgangkompensation der Anordnung überprüft. Abb. 5.15 zeigt das über den Meßverstärker erhaltene Signal der abgeglichenen Wheatstone'schen Meßbrücke als Funktion der Zeit. In Abb. 5.15 ist zudem der Temperaturverlauf eingetragen. Dabei ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und dem Gradienten im Signal zu erkennen. Dies bedeutet, daß der Temperaturgang nicht vollständig kompensiert werden kann. Im Vergleich zu Messungen, bei denen der zweite DMS durch einen Festwiderstand ersetzt wurde, liegen die Schwankungen jedoch um drei Größenordnungen niedriger. Bei einer Signaländerung im Bereich von mehreren 100 mV und einer Meßdauer im Bereich weniger Minuten kann der Temperaturgang jedoch toleriert werden. Bei einer Weiterentwicklung der Kraftmeßkolben muß ein Mäander-Material mit einem geringeren Temperaturkoeffizienten verwendet werden.

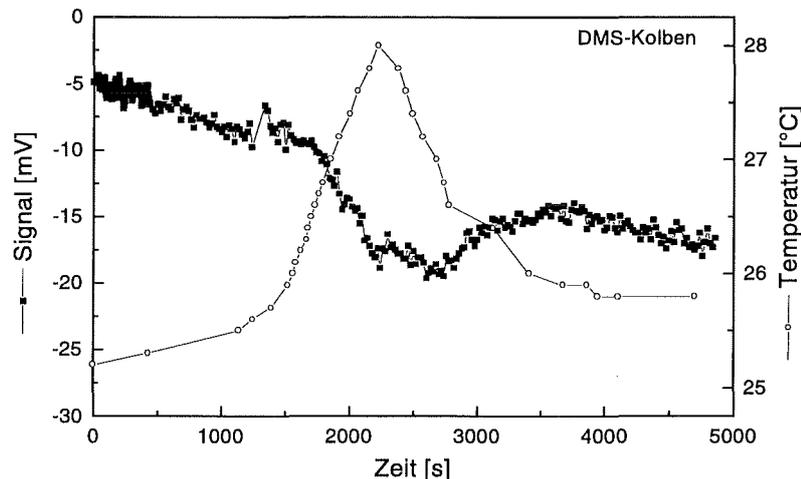


Abb. 5.15: Verhalten des Meßsignals bei Temperaturänderungen.

In der folgenden Abb. 5.16 ist der typischen Signalverlauf für den Fall dargestellt, daß der Balken gegen den Kolben bewegt wird. Dabei ist die an der Wheatstone'schen Brücke detektierte Brückenverstimmung als Funktion des Balkenverfahrwegs aufgetragen. Negative Werte

²⁸ 225Hz-Trägerfrequenz-Meßverstärker MG3150A der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH. Meßbereich des Verstärkers: 0.2 bis 2 mV/V[Hot].

des Balkenverfahrwegs bedeuten in diesem Fall, daß der Balken den Kolben noch nicht berührt. Der Anfangsabstand zwischen Balken und Kolben beträgt ca. 20 μm .

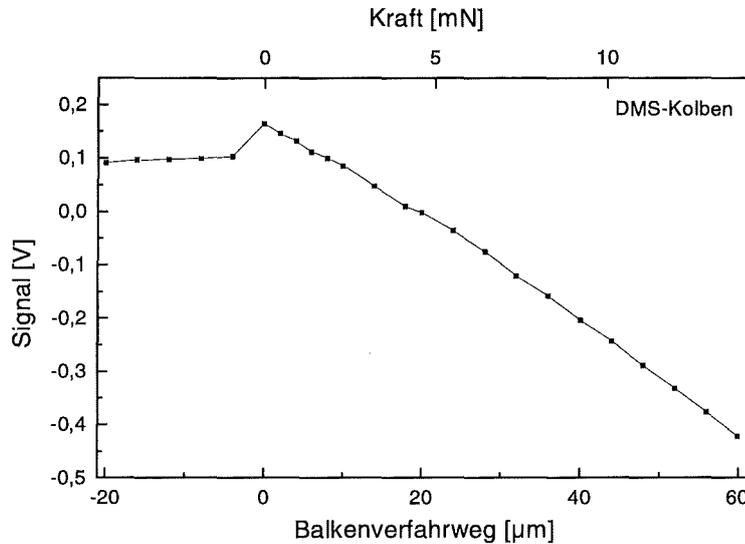


Abb. 5.16: Verhalten der DMS bei Kräfteinwirkung auf den Kolben über einen Balken. Dargestellt ist die Brückenverstimmung als Funktion des Balkenverfahrwegs. Die Kraft wurde über Gleichung (5.5) berechnet.

Bei dieser Messung, die an Luft durchgeführt wurde, zeigt sich bei Annäherung des Balkens an den Kolben zunächst ein leichter Anstieg des Signals. Mit dem Kontaktieren von Balken und Kolben kommt es zu einer deutlichen Überhöhung im Signal. Der Anstieg und die Überhöhung können auf den Temperatureinfluß des „kalten“ Balkens auf den Kolben zurückgeführt werden. Da die DMS bei einer Betriebsspannung von 3 V mit einer Leistung von ca. 100 mW erwärmt werden, der Balken sich aber über die Verschiebeeinheit auf einem tieferen Temperaturniveau befindet, kommt es beim Kontakt von Balken und Kolben zu einer Wärmeübertragung auf den Balken. Die Temperatur des Meßkolbens und damit der elektrische Widerstand des DMS erniedrigen sich und im Signal zeigt sich der beobachtete leichte Anstieg bzw. die Überhöhung. Im anschließenden Bereich von 0 bis 60 μm wird der Stempel des Kolbens im Rahmen verschoben und die DMS gedehnt, so daß sich dessen elektrischer Widerstand erhöht. Wie erwartet, ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Signal und Balkenverfahrweg ab dem Berührungspunkt.

Im vorliegenden Fall wurde ein Kolben mit einer Höhe von 260 μm und einer Federbreite der elastischen Aufhängung von 32 μm verwendet. Dieser besitzt nach Gleichung (3.9) und Tab. 3.2 eine Federkonstante von $D_{\text{ges}} = 11.4 \cdot 10^4 \text{ N/m}$. Der verwendete Balken hatte dagegen eine Höhe von 200 μm , so daß einem Balkenverfahrweg von 30 μm gemäß Gleichung (5.5) eine Kraft von ca. 7 mN entspricht (siehe obere Abszisse in Abb. 5.16). Mit Gleichung (3.4) und (A.2) gilt:

$$\Delta R = k \varepsilon R_0 = k \frac{F}{D_{\text{ges}} \cdot L} R_0 \quad (5.6)$$

Dabei bedeutet L die Länge des DMS, der freitragend gespannt ist und im Kraftmeßkolben gedehnt wird. Bei einem Balkenverfahrweg von $30\ \mu\text{m}$, der einer Kraft von $7\ \text{mN}$ entspricht, wird somit eine Widerstandsänderung von $94\ \text{m}\Omega$ erwartet ($R_0 = 77\ \Omega$, $k = 2$, $L = 100\ \mu\text{m}$). Der Trägerfrequenzverstärker liefert ein Signal von $3\ \text{mV}$ bei einer Widerstandsänderung von $1\ \text{m}\Omega$, so daß bei obiger Widerstandsänderung ein Signal von $280\ \text{mV}$ erwartet wird. Verglichen mit dem experimentell ermittelten Wert von $270\ \text{mV}$ bei $7\ \text{mN}$ Krafteinleitung bestätigen sich die theoretischen Vorhersagen.

Zur weiteren Charakterisierung der Kraftmeßkolben werden diese unter Siliconöl betrieben und zudem die vertikale Position des Balkens gegenüber dem Stempel des Kolbens variiert. In Abb. 5.17 sind wiederum die Verstärkersignale als Funktion des Balkenverfahrwegs aufgetragen, wobei zur besseren Darstellung die Signale in y -Richtung verschoben sind. Bei den beiden oberen Kurven (\blacktriangle und \blacksquare) befand sich die Oberkante des Balkens ca. $10\ \mu\text{m}$ unterhalb der Oberkante des Kraftmeßkolbens. Die Steigungen der beiden Kurven stimmen sehr gut überein. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß die Überhöhung bei Verwendung von Siliconöl deutlich verringert ist. Balken und Kolben sind in diesem Fall auf annähernd gleichen Temperaturniveau, so daß es bei der Kontaktierung von Balken und Kolben zu keiner Abkühlung des Kolbens kommt.

Zum Vergleich ist in Abb. 5.17 nochmals die Messung aus Abb. 5.16 dargestellt (offene Quadrate), wobei sich bei dieser Messung die Balkenoberkante ca. $20\ \mu\text{m}$ über der Kolbenkante befand. Die Kurven unterscheiden sich deutlich in der Steigung des Signals, wenn der Balken gegen den Kolben bewegt und somit Kraft auf diesen ausgeübt wird. Dieses Verhalten kann durch die asymmetrische Anordnung der Federelemente und der DMS bezüglich der Richtung der Krafteinleitung gedeutet werden. Befindet sich der Balken unterhalb der DMS, so kommt es zu einer Torsion der Federelemente und einer Bewegung des Ankers aus der Ebene heraus. Hierdurch ist eine reduzierte Belastung der DMS bedingt, die sich in einer geringeren Widerstandsänderung pro eingeleiteter Kraft äußert.

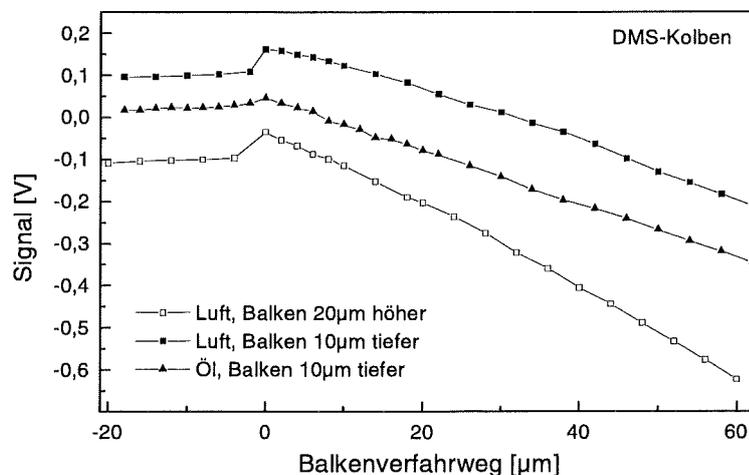


Abb. 5.17: Verhalten der Kraftmeßkolben bei unterschiedlichen Balkenpositionen an Luft bzw. unter Siliconöl.

Als Konsequenz hiervon muß im Experiment entweder der Balken höher als der Kolben sein oder es muß gewährleistet werden, daß am Kolben der Angriffspunkt der Kraft definiert ist. Hiermit kann dann eine Kalibrierung der Kraftmeßkolben durchgeführt werden, die von der Position der Balken unabhängig ist. Der definierte Angriffspunkt könnte durch eine Spitze realisiert werden, die auf dem Stempel angebracht wird.

5.2.3 Gesamtsystem

Beim Gesamtsystem werden - entsprechend der in Kap. 4 dargestellten Montageschritte - zunächst die Mikroschläuche für die Druckversorgung in die Mikrotunnel geklebt und die Bondpads der DMS-Mäander mit Bonddrähten²⁹ versehen. Da bei einer Bewegung des Meßkolbens die Bonddrähte gebogen werden, sind diese entsprechend lang gewählt, um die für das Verbiegen erforderlichen Kräfte gering zu halten. Somit kann sicher gestellt werden, daß die Beweglichkeit des Kolbens innerhalb des Kolbenkanals durch die elektrische Kontaktierung über die Bonddrähte nicht behindert wird.

In einem weiteren Montageschritt wird der Meßkolben manuell in den Kolbenkanal eingelegt und die Deckplatte im Bereich der Klebefläche auf das Aktorgehäuse geklebt. Der für die Temperaturgangkompensation erforderliche Referenzkolben wird im Anschluß an die Deckelmontage direkt neben dem Aktorgehäuse auf einem 50 µm dicken Abstandsblech montiert. Dabei ragt der Bereich des Kolbens, in dem sich der bewegliche Anker befindet, über das Abstandsblech hinaus. Hierdurch wird garantiert, daß sich der Referenzkolben bei Temperaturänderungen analog zum Meßkolben verhält (siehe Kap. 3.4.1.3). Durch den direkten Kontakt des Kolbens mit dem Substrat und über das aus dem Aktor austretenden Siliconöl ist eine gute Wärmeankopplung zwischen Meß- und Referenzkolben garantiert. Die elektrische Kontaktierung der beiden Kraftmeßkolben an den externen Meßverstärker erfolgt über Steckverbindungen, die direkt hinter dem Aktorgehäuse auf der Grundplatte montiert sind. Die in die Faserschächte montierten Glasfasern sowie die Anschlußleitungen für die Fluidversorgung sind zur Zugentlastung zusätzlich auf der Grundplatte fixiert.

Analog zu den in Kap. 5.2.1 beschriebenen Versuchsanordnungen wurden die Wegmeßeinheit und die Kraftmeßkolben an die externe Licht- und Spannungsquelle sowie an die entsprechenden Signalverstärker angeschlossen. Die Druckmessung erfolgte wiederum vor der Aktorkammer in den Fluidzuleitungen.

In einem ersten Funktionstest mit Gas als Antriebsmedium wird ein Mindestdruck für die Bewegung des Kolbens im Bereich einiger 10 hPa ermittelt. Dieser Startdruck liegt im Vergleich zum Testaktor etwas höher, was durch ein leichtes Verkanten des Kolbens innerhalb des Kanals erklärt werden kann. Das Verkanten ist dabei auf die Vorspannung in den Bonddrähten zurückzuführen, die bei der Montage des Meßkolbens aufgebracht wurde.

²⁹ Gold-Bonddrähte mit einem Durchmesser von 25 µm.

Bei den eigentlichen Biegeversuchen wird hochviskoses Siliconöl als Antriebsmedium für den Mikroaktor verwendet. Die Druckversorgung des Aktors erfolgt über beide Zuleitungen in der Aktorkammer, wobei eine Zuleitung komplett mit Siliconöl befüllt ist und als Reservoir für das Antriebsmedium dient. In der zweiten Zuleitung ist maximal der letzte Zentimeter des Mikroschlauchs mit Öl befüllt. Werden die parallel geschalteten Zuleitungen über eine Gasflasche mit Druck beaufschlagt, so bedingt die Leckrate des Antriebsmediums, daß über die Zuleitungen Fluid nachgeliefert werden muß. Da in der zweiten Zuleitung nur ein vergleichsweise kurzes Schlauchstück mit Öl befüllt ist, ist der Strömungswiderstand in dieser Zuleitung deutlich geringer als in der vollständig mit Öl befüllten Zuleitung. Dies bedeutet, daß das Siliconöl im wesentlichen über die zweite Zuleitung nachgeliefert wird. Der wesentliche Vorteil dieser Versuchsanordnung besteht darin, daß die Druckänderungen in der Aktorkammer schneller erfolgen können. Zudem wird der Druckverlust über den Zuleitungen im wesentlichen durch den Volumenstrom des Gases bestimmt, der proportional zum Volumenstrom des ausströmenden Siliconöls ist. Da die Viskosität von gasförmigem Stickstoff um sechs Größenordnungen unter derjenigen des Siliconöls liegt, kann dessen Druckverlust über der Zuleitung vernachlässigt werden und somit der Druck in der Aktorkammer demjenigen in der Zuleitung gleichgesetzt werden.

Im Biegeexperiment sind die beiden Signale der Wegmeßeinheit, das Spannungssignal der DMS sowie der extern gemessene Druck jeweils als Funktion der Zeit zugänglich. Über eine Referenzmessung mit der Wegmeßeinheit gemäß Kap. 5.2.1 kann aus den Intensitätssignalen I_{trans} und I_{reflex} der Stellweg des Kolbens ermittelt werden. Trägt man das Spannungssignal der Kraftmeßkolben als Funktion des Stellweg auf, so erhält man die in Abb. 5.18 dargestellten, typischen Meßkurven.

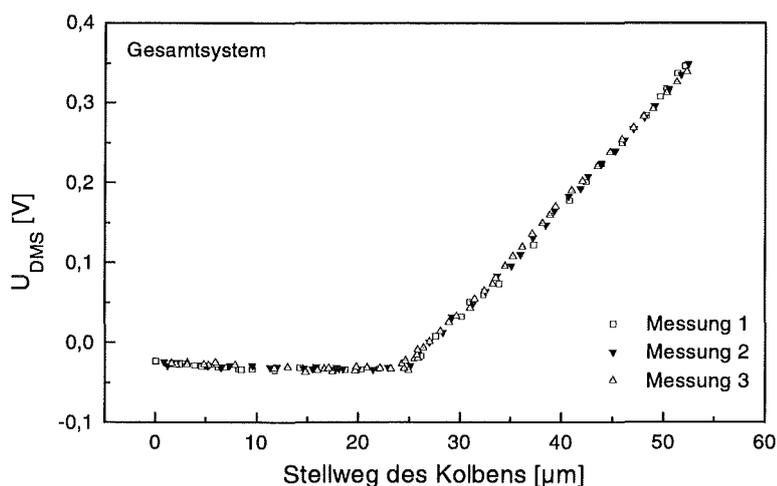


Abb. 5.18: DMS-Spannungssignal U_{DMS} als Funktion des Kolbenstellwegs.

Abb. 5.18 zeigt, daß das Signal der Kraftmeßkolben innerhalb der Einlaufstrecke von ca. 25 µm (siehe Kap. 3.4.2.1) nahezu konstant ist. Bei der Bewegung des Kolbens gegen die Wegmeßeinheit wird innerhalb dieser Einlaufstrecke nur der Ausleger des Kolbens mechanisch belastet, so daß die DMS lediglich thermischen Einflüssen ausgesetzt sind. Am

Berührungspunkt zwischen dem Stempel des Kolbens und dem Biegebalken wird der DMS durch die entsprechende Gegenkraft des Biegebalkens belastet, was sich in einem deutlichen Anstieg im Signal der DMS zeigt. Im Gegensatz zu Abb. 5.17 und der entsprechenden Versuchsanordnung nach Abb. 3.14 liegt beim Mikroprüfsystem am Berührungspunkt zwischen Kolben und Balken keine Überhöhung im DMS-Signal vor. Dies ist bedingt durch eine bessere Wärmeankopplung zwischen den Kraftmeßkolben und dem Biegebalken, d.h. der Temperaturgradient ist beim komplett montierten Mikroprüfsystem deutlich reduziert. Der leichte Anstieg im DMS-Signal zu Beginn der Einlaufstrecke kann auf einen geringfügigen Temperaturunterschied zwischen Meßkolben und Wegmeßeinheit zurückgeführt werden.

Die Experimente haben gezeigt, daß der Berührungspunkt zwischen Kolben und Biegebalken über die direkte Kraftmessung am Kolben zugänglich ist, so daß dieser als Startpunkt des Biegeexperiments verwendet werden kann. Die in Abb. 5.18 dargestellten Messungen zeigen zudem die gute Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Biegeexperimenten, die an einem Balken durchgeführt wurden. Dabei variiert die Steigung der Kurven ab dem Berührungspunkt um weniger als 5%. Diese Reproduzierbarkeit liegt jedoch nur dann vor, wenn die vertikale Position des Biegebalkens fixiert ist. Wird der Biegebalken vertikal gegenüber dem Kolben verschoben, so werden analog zu Abb. 5.17 in Abhängigkeit der Balkenposition unterschiedliche Steigungen des DMS-Signals als Funktion der Balkenverbiegung ermittelt.

6 Alternative Anwendungsmöglichkeit für den Aktor

Neben dem Einsatz des druckbetriebenen Mikroaktors als kraftübertragende Komponente im Mikroprüfsystem zeichnen sich weitere Anwendungen ab. So zeigten die Experimente am Testaktor, daß dieser die entsprechenden Anforderungen³⁰ im Hinblick auf die übertragbaren Kräfte und die Leckage des Antriebsmediums³¹ erfüllt, die an eine Mikrokomponente zum Antrieb eines Schneidwerkzeugs auf einem Herzkatheter gestellt werden. Die weiteren Untersuchungen bezüglich des dynamischen Verhaltens legten den Einsatz des druckbetriebenen Mikroaktors in der minimal invasiven Chirurgie nahe. Innerhalb des von der EU geförderten ESPRIT-Projekts IMICS [Wal 95], das die Integration von diagnostischen und therapeutischen Komponenten auf einem Herzkatheter untersucht, wird daher ein linear arbeitendes Schneidwerkzeug als therapeutisches Subsystem entwickelt.

Der druckbetriebene Mikroaktor soll dabei das Schneidwerkzeug antreiben, das auf dem Herzkatheter zum Entfernen von hartem Plaque in den Herzkranzgefäßen vorgesehen ist. Zur Ansteuerung des Aktors ist ein fluidischer Oszillator vorgesehen, der derzeit entwickelt wird [Geb 95]. Um das Verhalten eines derartigen Aktors in Kombination mit einem fluidischen Oszillator untersuchen zu können, wurde ein hydraulischer Linearaktor entwickelt [Gün 96] und auf sein fluidisches Verhalten hin untersucht [Jus 96]. Im folgenden werden die Konzeption des therapeutischen Subsystems, der Aufbau des Aktors und dessen Eigenschaften dargestellt.

6.1 Aufbau und Herstellung

Das Grundkonzept des therapeutischen Subsystems für den Herzkatheter mit linear arbeitendem Schneidwerkzeug ist in Abb. 6.1 schematisch dargestellt. Es sieht eine Stapelbauweise der beiden Komponenten hydraulischer Aktor und fluidischer Oszillator vor. Hierdurch kann eine kompakte Bauweise erzielt werden, bei der die Verbindungsleitungen zwischen Oszillator und Aktor sehr kurz ausfallen und somit der Druckverlust des strömenden Antriebsmediums minimiert ist. Ferner können in der Entwicklungsphase die Komponenten getrennt voneinander untersucht und optimiert werden. Bei diesem Konzept befindet sich der fluidische Oszillator auf einem ersten Substrat. Dieser wird über eine Fluidzuleitung mit einem biokompatiblen Antriebsmedium versorgt und stellt an seinen beiden Ausgängen ein oszillierendes Drucksignal zur Verfügung [Geb 95]. Auf den Oszillator wird ein weiteres Substrat montiert, auf dem sich die Strukturen des hydraulischen Linearaktors befinden. Die Verbindung zwischen den beiden Komponenten erfolgt über Löcher im Substrat des Aktors (siehe Abb. 6.1). Das eigentliche Schneidwerkzeug wird über einen Stift mit dem beweglichen Kolben des Aktors verbunden. Der Aktor ist wiederum durch einen Deckel verschlossen, der für den Stift des

³⁰ Es sind Kräfte im Bereich von 20 mN für das Abtragen von Plaque erforderlich. Als maximale Leckrate des biokompatiblen Antriebsmediums sind ca. 0.5 l/h bei einem halbstündigen operativen Eingriff zulässig.

³¹ Bei Verwendung von Wasser.

Schneidwerkzeugs ein Langloch aufweist. Hiermit ist es möglich, die Kraft aus der Aktorebene heraus auf das Schneidwerkzeug zu übertragen.

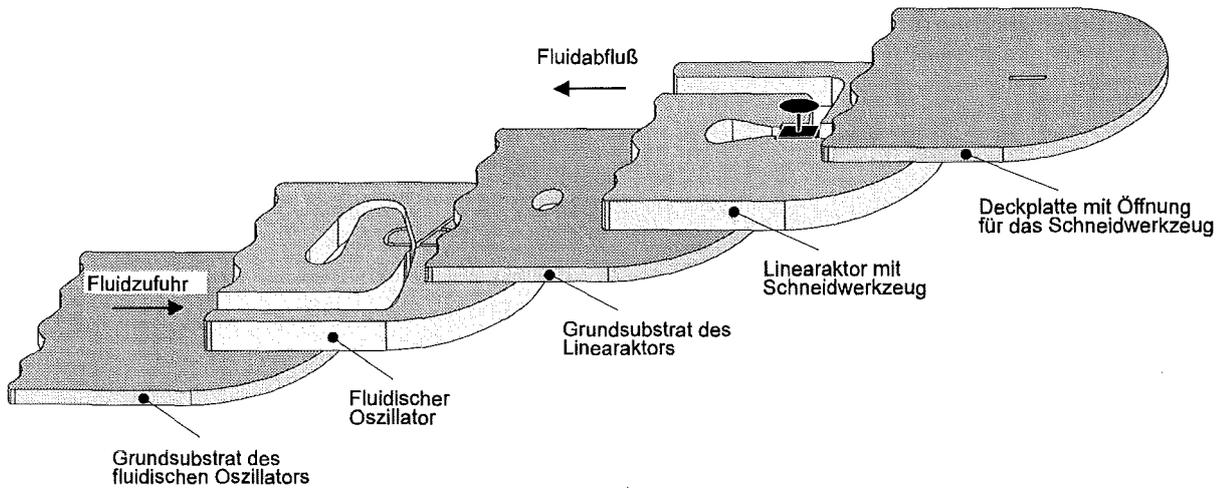


Abb. 6.1: Modularer Aufbau der Oszillator-Aktor-Kombination für das therapeutische Subsystem auf dem Herzkatheter.

Der als Teststruktur konzipierte hydraulische Linearaktor besteht im wesentlichen aus einem beweglichen Kolben (Länge 1000 μm , Breite 500 μm), der in einem Kolbenkanal geführt wird (siehe Abb. 6.2). Im Unterschied zum Aktor des Mikroprüfsystems wird der Kolben von zwei Seiten mit Druck beaufschlagt. Liegen an den Eingängen (Fluidzulauf in Abb. 6.2) des Aktors um 180°-phasenverschobene, periodische Drucksignale an, so kann der Kolben eine oszillierende Bewegung ausführen. Die Kolbenbewegung wird dabei durch Anschläge am Ende des Kanals auf 1000 μm begrenzt. Links und rechts des Kanals sind runde Bereiche strukturiert, innerhalb derer Löcher im Substrat für die Fluidversorgung angebracht sind. In der Stapelbauweise befinden sich unter diesen Löchern die Ausgänge des Oszillators. An den Kolbenkanal schließen sich Ausgleichsöffnungen an, die über schmale Kanäle bzw. einen Spalt mit diesem verbunden sind. Sie sind dafür vorgesehen, daß bei Ansteuerung des Aktors mit einem fluidischen Oszillator die Strömung innerhalb des Oszillators nicht abbrechen kann, was wiederum für die Funktionsweise des Oszillators von entscheidender Bedeutung ist.

Senkrecht zum Kolbenkanal verlaufen Mikrotunnel, die in den Faserschächten enden und wie die Fluidzuleitungen im Mikroprüfsystem parallel zum Substrat durch die Struktur verlaufen (siehe Kap. 4). In diesen Mikrotunneln werden Lichtleitfasern³² bis an den Kolbenkanal herangeführt, wobei jeweils zwei gegenüberliegende Fasern eine Lichtschranke bilden, mit der die Bewegung des Kolbens innerhalb des Kanals erfaßt werden kann.

Da bei diesem Aktor bei der Montage des Deckels ebenfalls die Kapillarklebetechnik angewandt wird, ist um den Kolbenkanal, den Fluidzulauf und die Ausgleichsöffnungen eine Stopfnut strukturiert. Diese verhindert beim Aufkleben des Deckels ein Vordringen des Kleb-

³² Die Lichtleitfasern der Lichtschranke haben einen Außendurchmesser von 125 μm . Die bei der Herstellung der Mikrotunnel als Opferstruktur verwendeten Fasern hatten dagegen einen Durchmesser von 140 μm .

stoffs bis zum Kolbenkanal. Im Bereich der Mikrotunnel ist die Stoppnut durch sog. Klebebohrungen erweitert, die beim Verkleben der Glasfasern analog zu Kap. 4 die Klebstoffapplikation erleichtern.

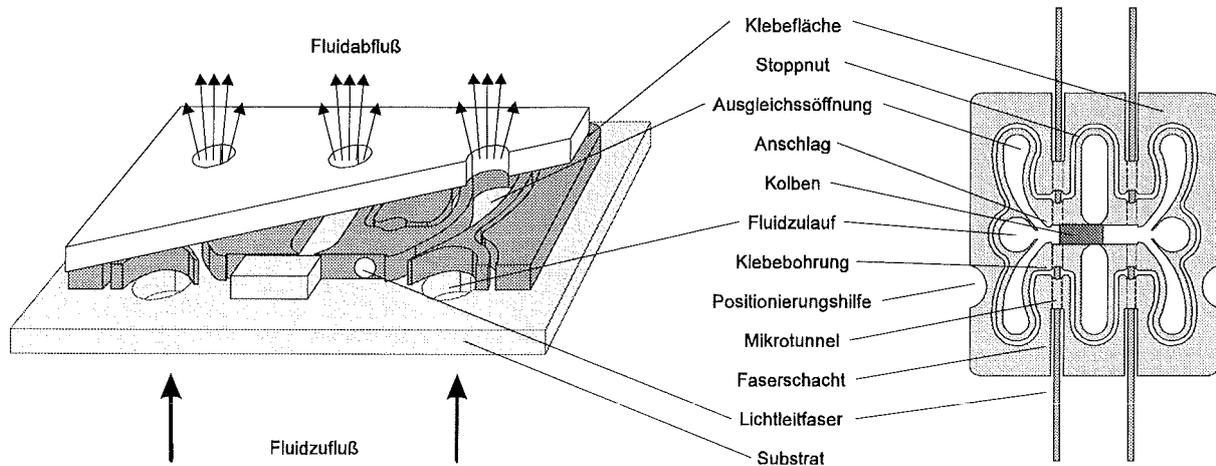


Abb. 6.2: Schematische Darstellung des fluidischen Aktors in Aufsicht und Schnitt durch einen fertig montierten Aktor [Gün 96].

Innerhalb des Deckels, der die Struktur nach oben verschließt, sind im Bereich der Ausgleichsöffnungen Löcher vorgesehen, die unabhängig voneinander verschlossen werden können. Hiermit ist es möglich, unterschiedliche Betriebsverhalten des Aktors experimentell zu erfassen.

Die Herstellung und Montage des hydraulischen Aktors erfolgt entsprechend der in Kap. 4 dargestellten Prozessschritte. Abb. 6.3 zeigt die REM-Aufnahme eines fertig montierten Aktors mit eingelegten Glasfasern. Deutlich zu sehen sind die Bohrungen im Substrat, die für die Fluidzufuhr vorgesehen sind. Die Bohrungen außerhalb des Aktorgehäuses werden für die Justage des Aktors über Positionierstifte gegenüber einer Anschlußplatte bzw. dem Oszillator verwendet.

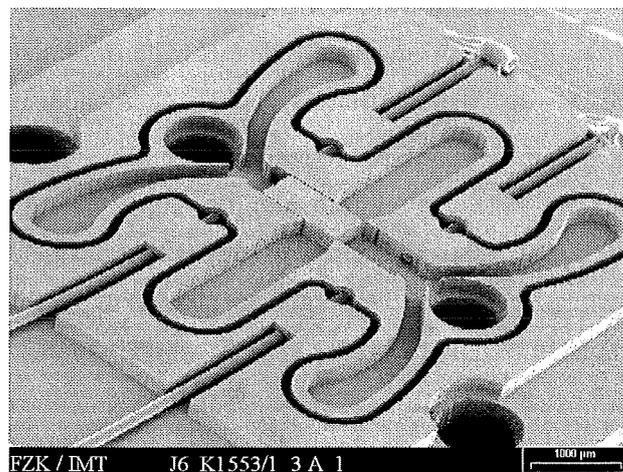


Abb. 6.3: REM-Aufnahme des hydraulischen Linearaktors mit montierten Glasfasern.

6.2 Experimentelle Ergebnisse

Bei der experimentellen Charakterisierung des hydraulischen Linearaktors für das therapeutische Subsystem des Herzkatheters werden folgende Aspekte untersucht [Jus 96]:

- Volumenstrom durch den Aktor
- Startdruck für die Bewegung des Kolbens
- Geschwindigkeiten des Kolbens
- Übertragbare Kräfte

Hierfür stehen vier verschiedene Aktoren zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Breite der seitlichen und mittleren Ausgleichsöffnungen³³ unterscheiden. Zusätzlich zu diesen Variationen wird das fluidische Verhalten des Aktors durch Öffnen oder Verschließen einzelner oder aller Ausgleichsöffnungen verändert. Im Hinblick auf den Einsatz des Aktors auf dem Herzkatheter werden im folgenden die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung und der Kraftübertragung dargestellt. Bezüglich des Startdrucks, der benötigt wird, um die Haftreibung des Kolbens zu überwinden, ergaben sich im Vergleich zu den Messungen beim Testaktor leicht verbesserte Werte³⁴ im Bereich von 3 hPa.

6.2.1 Versuchsaufbau

Abb. 6.4 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, mit dem der Volumenstrom durch den Aktor, der Startdruck zum Überwinden der Haftreibung und das dynamische Verhalten des Aktors bestimmt werden. Da sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen der fluidische Oszillator noch in der Entwicklung befand, wird das zur Ansteuerung des Aktors benötigte Drucksignal über die beiden Ventile³⁵ (5) erzeugt. Diese werden über den Vorratsbehälter (2) mit nachgeschalteten Filtern³⁶ und Volumenstrommesser (4) mit dem Antriebsfluid versorgt und über die Ventilansteuerung (8) betrieben. Mit den verwendeten Ventilen, konnten Frequenzen des Drucksignals bis 160 Hz realisiert werden [Jus 96].

Der hydraulische Aktor wird mit einer Spannvorrichtung [Gün 96] auf einen Adapterblock aus PMMA gepreßt. Über diesen Block wird das Antriebsfluid von unten in den Aktor geleitet, wie es bei der Oszillator-Aktor-Kombination vorgesehen ist.

Bei den dynamischen Messungen ist nur der Druckverlauf in den Zuleitungen zum Aktor experimentell über die Drucksensoren (6) zugänglich. Wird der Aktor quasistatisch betrieben, wie z.B. bei der Messung der übertragbaren Kraft, so kann auch über einen im Mikrotunnel montierten Schlauch mit nachgeschaltetem Drucksensor der Druck direkt im Kolbenkanal bestimmt werden.

³³ Die Breite der seitlichen Ausgleichsöffnungen beträgt 100 bzw. 200 μm , die der mittleren Öffnungen 200 bzw. 400 μm .

³⁴ Bei Erstbetrieb eines Aktors liegt der Startdruck bei etwa 20 bis 30 hPa und reduziert sich mit zunehmender Betriebsdauer auf 3 hPa [Jus 96].

³⁵ Firma Bürkert, Typ 6104.

³⁶ Firma Schleicher & Schüll, 5 μ -Filter, Typ FP030/1.

Die Kolbenbewegung wird bei den dynamischen Messungen über die Lichtschranken ermittelt, wobei in die beiden Sendefasern Licht einer LED (9a) eingekoppelt wird. Die in die Empfangsfaser eingekoppelte Lichtintensität wird an deren Ende über Photodetektoren (9b) bestimmt.

Zur Messung der übertragbaren Kräfte wurde der obige Versuchsaufbau leicht modifiziert. Hierzu wurde der Deckel über seitlich angebrachte Klemmen auf den Aktor gepreßt. In den Kolben, der für diesen Zweck mit einem Loch ausgestattet ist, wird ein Stift (Durchmesser 300 μm) geklebt und gemäß Abb. 6.5 durch das Langloch im Deckel nach außen geführt. Die Messung der vom Kolben übertragenen Kraft erfolgt über einen Mikrobalken³⁷, dessen Verbiegung über ein Mikroskop vermessen wird. Aus der Verbiegung f kann über Gleichung (3.1) die auf den Balken übertragene Kraft bestimmt werden.

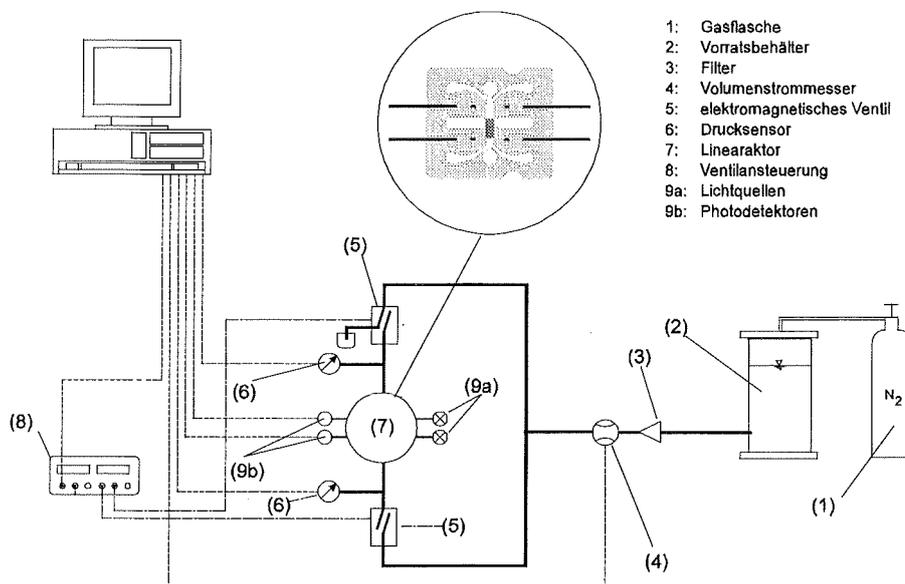


Abb. 6.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus [Jus 96].

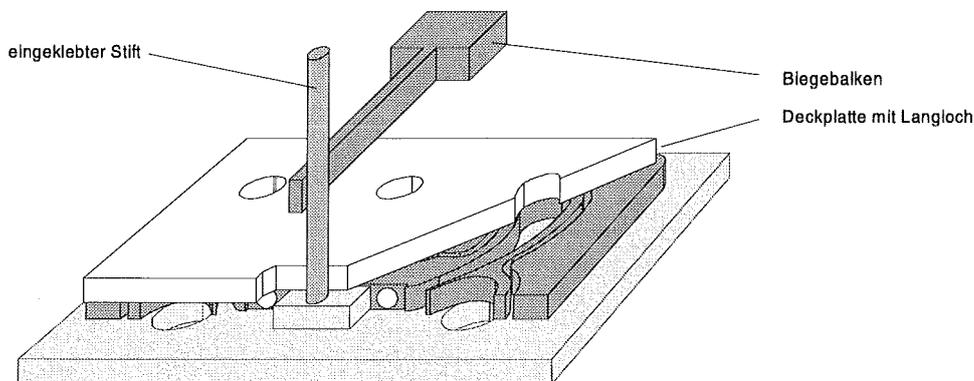


Abb. 6.5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messungen der übertragbaren Kraft.

³⁷ Es werden Mikrobalken des Mikroprüfsystem verwendet.

6.2.2 Geschwindigkeitsmessungen

In Abb. 6.6a sind die typischen Signale der beiden Lichtschranken als Funktion des Stellwegs dargestellt, den der Kolben innerhalb des Kolbenkanals von links nach rechts zurücklegt. Für den Fall, daß der Kolben die Lichtschranke vollständig überdeckt oder freigibt, erhält man ein konstantes Lichtschrankensignal. Bewegt sich der Kolben auf die Lichtschranke zu, so wird gemäß Abb. 6.6b ein Teil des von der Faser divergent abgestrahlten Lichts an der Kolbenstirnseite reflektiert und zusätzlich in die Empfangsfaser eingekoppelt. Somit kommt es zu einer Überhöhung im Signal. Mit zunehmender Überdeckung der Sendefaser durch den Kolben nimmt das Signal dann kontinuierlich ab. In Abb. 6.6b sind die den Signalen in Abb. 6.6a entsprechenden Kolbenpositionen schematisch dargestellt (bezeichnet mit A, B, Ende).

Über die beiden Maxima rechts und links und die Position des Kolbens, bei der die Lichtschranke gerade vollständig verdeckt ist, können den Lichtschrankensignalen eindeutig vier Positionen des Kolbens innerhalb des Kanals zugeordnet werden. Hieraus werden bei zeitaufgelöster Messung der Lichtschrankensignale mittlere Geschwindigkeiten des Kolbens bestimmt. Die mittleren Geschwindigkeiten werden entsprechend der Kolbenpositionen (siehe Abb. 6.6), die einem bestimmten Signal zugeordnet sind, mit $v_{Start-Max}$, $v_{Max-Max}$ und $v_{Max-Ende}$ bezeichnet. Die Geschwindigkeit $v_{Start-Ende}$ zwischen Start und Ende stellt die mittlere Geschwindigkeit des Kolbens über dem Kolbenkanal dar.

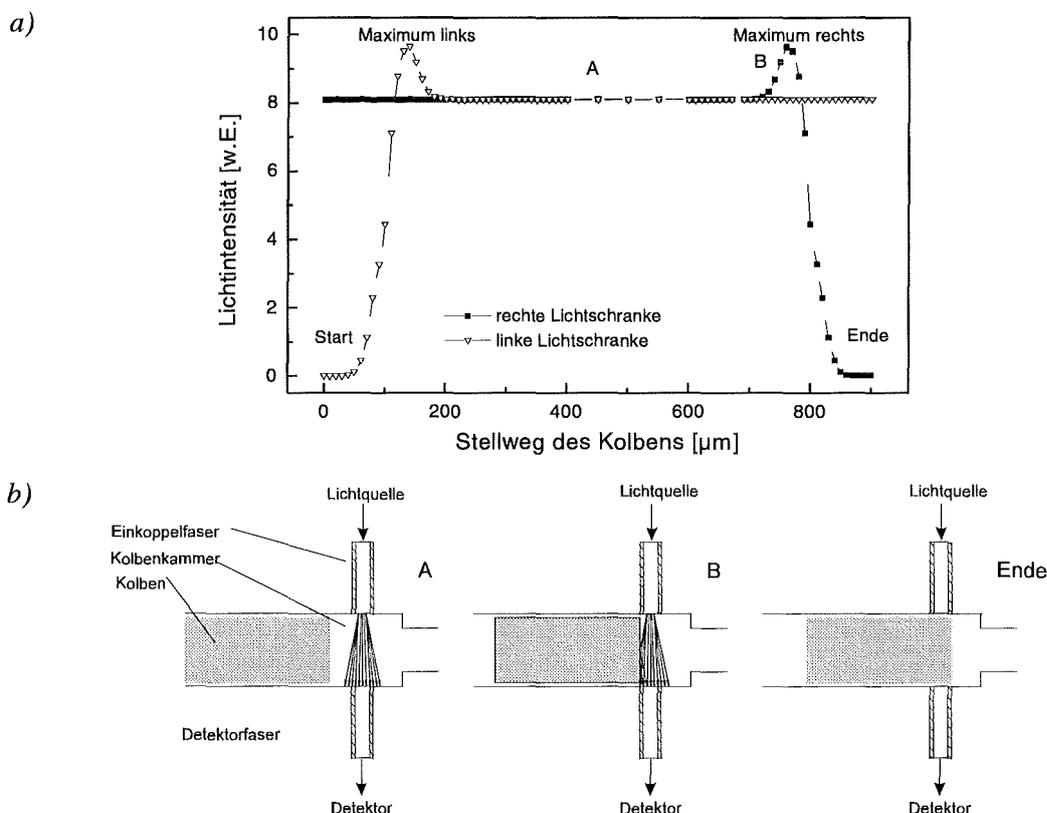


Abb. 6.6: a) Lichtschrankensignal als Funktion der Kolbenposition. b) Schematische Darstellung der Kolbenbewegung im Bereich der Lichtschranke.

Die Messungen ergeben, daß die mittleren Ausgleichsöffnungen die Verteilung der Geschwindigkeit über den gesamten Verfahrensweg des Kolbens entscheidend beeinflussen. Wie zu erwarten, ist in allen Fällen die Geschwindigkeit $v_{Start-Max}$ am geringsten (siehe Abb. 6.7), da der Kolben aus der Ruhe heraus beschleunigt wird. Sind die mittleren Ausgleichsöffnungen des Aktors verschlossen, so ist die Geschwindigkeit $v_{Max-Max}$ am größten und die Bewegung des Kolbens wird am Ende des Kanals verzögert. Dieser Effekt steigert sich mit zunehmendem Druck des Antriebsmediums. Sind dagegen die mittleren Ausgleichsöffnungen offen, so sind die Geschwindigkeiten $v_{Max-Max}$ und $v_{Max-Ende}$ annähernd gleich groß.

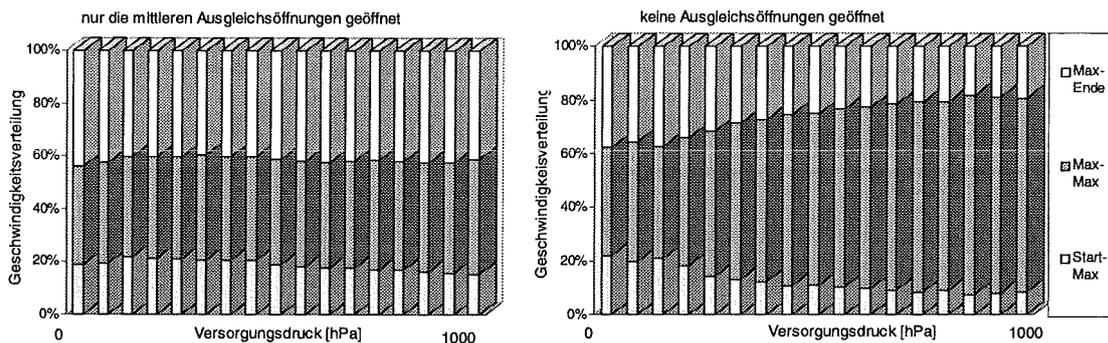


Abb. 6.7: Geschwindigkeitsverteilung³⁸ des Kolbens mit und ohne Durchströmung der mittleren Ausgleichsöffnungen [Jus 96].

Die über die Lichtschranken gemessenen mittleren Geschwindigkeiten des Kolbens liegen bei einem Eingangsdruck von 1000 hPa im Bereich bis ca. 2 m/s, abhängig von der Anzahl der offenen Ausgleichsöffnungen [Jus 96]. Hieraus läßt sich die Grenzfrequenz berechnen, bei der der Aktor maximal betrieben werden kann. Wiederum abhängig von der Anzahl der offenen Ausgleichsöffnungen ergeben sich Frequenzen bis 560 Hz.

Mit den Kenndaten für den Volumenstrom, die Geschwindigkeiten und damit mit den Grenzfrequenzen als Funktion der Anzahl geöffneter Ausgleichsöffnungen kann der Aktor entsprechend angepaßt werden bei bekannter Charakteristik des fluidischen Oszillators.

6.2.3 Kraftmessung

Obwohl der vorliegende Aktor nicht direkt für die Messung der übertragbaren Kräfte konzipiert ist, können die Kräfte über einen Kolben mit Loch grob bestimmt werden. Hierzu wird ein ca. 7 mm langer Stift in das Loch des Kolbens gemäß Abb. 6.5 geklebt. Bei der Bewegung des Stifts gegen den Mikrobalken kann aus der Balkenverbiegung die vom Kolben übertragene Kraft bestimmt werden, die in Abb. 6.8 als Funktion des in der Kolbenkammer herrschenden Drucks dargestellt ist. Bezogen auf die am Kolben angreifende Kraft, die aus der Kolbenquerschnittsfläche und dem anliegenden Druck berechnet wird, liegt die übertragbare Kraft im Mittel um ca. 37 % niedriger.

³⁸ Die Prozentangaben der Einzelgeschwindigkeiten $v_{Start-Max}$, $v_{Max-Max}$ und $v_{Max-Ende}$ beziehen sich auf deren Summe.

Das Ergebnis kann durch die im vorliegenden Fall sehr ungünstige Geometrie bei der Messung erklärt werden. Da der Stift etwa 5 mm oberhalb der Deckplatte den Balken berührt, wird auf den Kolben ein Moment ausgeübt, sobald der Stift den Balken verbiegt. Hierdurch verkantet der Kolben zwischen Deckel und Substrat, so daß die Reibung des Kolbens deutlich erhöht wird und bei gegebenem Druck weniger Kraft übertragen werden kann.

Trotz der ungünstigen Randbedingungen bei der Kraftmessung aufgrund des hohen Angriffspunkts des Balkens zeigen die Ergebnisse, daß die erforderlichen Kräfte bis 20 mN bei einer Optimierung des Aktordesigns erreicht werden können.

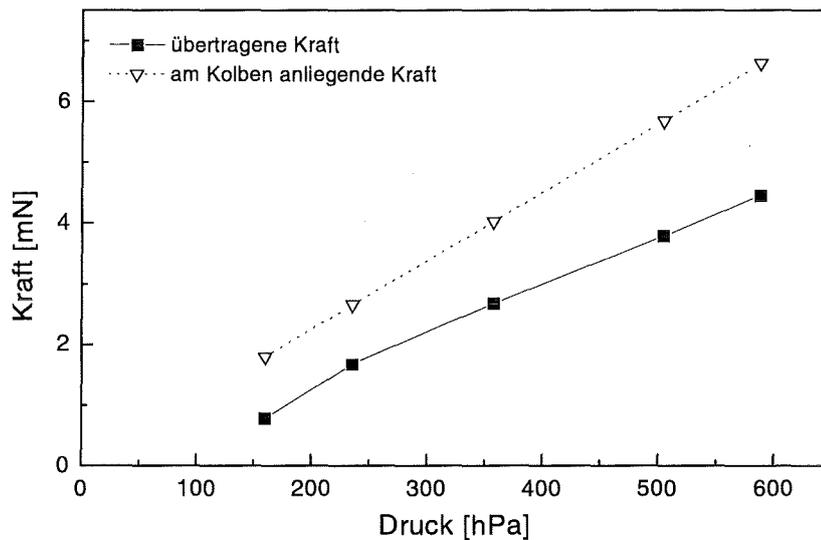


Abb. 6.8: Auf den Biegebalken übertragene Kraft und am Kolben anliegende Kraft als Funktion des Drucks im Aktor [Jus 96].

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Mikrosystem zur mechanischen Charakterisierung von Mikroproben entwickelt und nach dem LIGA-Verfahren hergestellt. In diesem Mikroprüfsystem werden Mikrobalken in einem Biegeexperiment untersucht, um deren Elastizitäts-Modul zu bestimmen. Das Mikrosystem besteht aus einem Mikroaktor mit integriertem Kraftaufnehmer auf der Basis von Dehnmeßstreifen, einer optischen Wegmeßeinheit und einer Probenhalterung. Die Gesamtabmessung des Systems beträgt $6.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$, wobei die Höhe der Mikrostrukturen zwischen 200 und 250 μm liegt.

Beim Mikroaktor, der die für das Biegeexperiment benötigten Kräfte im Bereich bis 20 mN zur Verfügung stellt, handelt es sich um einen druckbetriebenen Aktor, der in dieser Arbeit erstmals in LIGA-Technik realisiert wurde. Der Aktor besteht im wesentlichen aus einer Aktorkammer, die über eine Deckplatte verschlossen wird, und einem beweglichen Kolben, der aufgrund einer Druckdifferenz zwischen Kammer und Außenraum parallel zum Substrat bewegt wird. Der wesentliche Vorteil dieses Funktionsprinzips, der ausschlaggebend für den Einsatz im Mikroprüfsystem ist, besteht darin, daß die übertragenen Kräfte unabhängig vom Stellweg des Kolbens sind. Zudem sind mit dem Mikroaktor - verglichen mit anderen Aktorprinzipien - relativ große Kräfte und Stellwege zugänglich.

Die vom Mikroaktor übertragenen Kräfte werden direkt über Dehnmeßstreifen (DMS) gemessen, die am $600 \times 1500 \mu\text{m}^2$ großen Mikrokolben angebracht sind. Für die technische Umsetzung besteht der bewegliche Kolben aus einem Rahmen, in dem sich ein Anker befindet, der über Federelemente und den DMS elastisch mit diesem Rahmen verbunden ist. Bei der Bewegung des Kolbens gegen den Mikrobalken wird der Anker innerhalb des Rahmens verschoben und der DMS gedehnt. Über die Widerstandsänderung des DMS kann direkt auf die Kraft geschlossen werden, die vom Aktor übertragen wird.

Mit der im Mikroprüfsystem integrierten Wegmeßeinheit wird die Balkenverbiegung indirekt über die Kolbenbewegung bestimmt. Dabei wird die Bewegung des Kolbens gegen die Wegmeßeinheit beobachtet und ab dem Berührungspunkt zwischen Kolben und Balken, der über die Kontaktkraft zugänglich ist, die Messung der Balkenverbiegung gestartet. Das Funktionsprinzip der Wegmeßeinheit beruht auf der Reflexion eines divergenten Lichtstrahls an einer spiegelnden Oberfläche. Das Licht einer LED wird hierzu über eine Lichtleitfaser in die Mikrostruktur geführt. Bei der Bewegung der spiegelnden Oberfläche ändert sich die an einem Raumpunkt detektierbare Lichtintensität, so daß aus der Änderung eindeutig auf die Spiegelposition geschlossen werden kann. Das reflektierte Licht wird dabei über Lichtleitfasern aus der Mikrostruktur an zwei Photodetektoren geführt. Die Wegmeßeinheit besteht aus einem Spiegel, der an gefalteten Blattfedern elastisch gelagert und über ein Gestänge durch den Kolben verschoben wird, sowie aus Faserschächten für die exakte Ausrichtung der Glasfasern gegenüber dem Spiegel. Es wurden zwei verschiedene Wegmeßeinheiten hergestellt, die sich hinsichtlich der Ausrichtung von Spiegel und Glasfasern unterscheiden.

Die Probenhalterung gestattet die exakte Ausrichtung und Fixierung der Mikrobalken innerhalb des Mikroprüfsystems. Dabei wurde die Halterung so ausgelegt, daß die sog. Balkenplatte, die für die bessere Handhabung der Mikrobalken vorgesehen ist, relativ einfach eingesetzt werden kann und die Fixierung automatisch über Blattfedern gewährleistet wird.

Die Herstellung des Mikroprüfsystems erfolgt nach dem LIGA-Prozeß in Kombination mit dem Opferschicht- und Opferstrukturverfahren (vergl. Kap. 4). Dabei werden die beweglichen Strukturen des Systems, z.B. die Blattfedern von Wegmeßeinheit und Halterung, mit dem Opferschichtverfahren realisiert. Für die Herstellung und Montage von Mikroaktor und Kraftmeßkolben (DMS) mußten zusätzliche Herstellungsprozesse und konstruktive Lösungen entwickelt werden.

Beim Mikroaktor waren als wesentliche Randbedingungen Spalte zwischen beweglichem Kolben und Aktor im Bereich von 1 bis 2 μm und eine optimierte Fluidversorgung zu realisieren. Zudem mußten konstruktive Elemente im Hinblick auf die Deckelmontage berücksichtigt werden. Um die geforderte Spaltbreite zu erzielen, die eine geringe Leckrate des Antriebsmediums bedingt, werden die Kolben außerhalb der Aktorkammer hergestellt und in einem späteren Montageschritt in diese eingesetzt. Da die Fluidversorgung des Aktors über ein Loch im Substrat - speziell bei Verwendung von Siliciumsubstraten - weniger praktikabel ist, erfolgt diese beim Mikroprüfsystem über Mikrotunnel, die parallel zum Substrat verlaufen und in die Schläuche problemlos eingeklebt werden können. Für die Herstellung dieser Mikrotunnel wurde das Opferstrukturverfahren entwickelt. Hiermit ist es möglich, bei allen Aktoren eines Substrats die Mikrotunnel parallel zu fertigen.

Bedingt durch die Größe der Kraftmeßkolben und die Tatsache, daß die Höhe der Kolben genau auf die Aktorhöhe abgestimmt sein muß, war die Applikation der DMS auf den Kolben, wie sie bei makroskopischen Bauteilen angewandt wird, nicht möglich. Daher wurde ein zum LIGA-Verfahren kompatibler Herstellungsprozeß entwickelt, bei dem zunächst die DMS auf dem Substrat hergestellt werden und im eigentlichen LIGA-Prozeßschritt die Kraftmeßkolben auf den DMS galvanisch aufgebaut werden. Die optimale Haftung zwischen der Polyimid-Trägerfolie der DMS und der metallischen Mikrostruktur wird über eine Chrom-Gold-Schicht erzielt.

Im Hinblick auf die Aufbau- und Verbindungstechnik des Mikroprüfsystems war die Montage der Deckplatte des Aktors, der Fluidzuleitungen und der Lichtleitfasern sowie die elektrische Kontaktierung der DMS zu bewerkstelligen. Hierfür wurden verschiedene Klebprozesse der jeweiligen Aufgabenstellung angepaßt. Bei der Deckelmontage mußte als wesentliches konstruktives Element die sog. Stoppnut eingeführt werden, die den Aktor in Klebefläche und inneres Aktorgehäuse unterteilt. Die Stoppnut verhindert bei der Kapillarklebertechnik ein Vordringen des Klebstoffs bis zum Kolben. Um hierbei eine möglichst geringe Klebeschichtdicke und damit einen schmalen Spalt zwischen Deckplatte und innerem Aktorgehäuse zu gewährleisten, muß die galvanisch hergestellte Mikrostruktur diamantgefräst werden. Die hiermit erzielbare Klebeschichtdicke liegt unter 1 μm .

Mit diesem Mikroprüfsystem ist erstmalig der fluidische Antrieb eines Mikroaktors mit der elektrischen Detektion von Kräften über DMS und der optischen Positionsmessung in einem Mikrosystem realisiert worden. Mit dem Mikroaktor konnten Kräfte im Bereich mehrerer 10 mN übertragen werden. Über vergleichende Messungen, die an einem Nanoindenter durchgeführt wurden, konnte nachgewiesen werden, daß die vom Aktor übertragene Kraft direkt aus dem anliegenden Druck und der Kolbenquerschnittsfläche berechnet werden kann und daß die Reibung des Kolbens im Kolbenkanal zu vernachlässigen ist. Dies zeigt sich auch in dem geringen Startdruck zum Überwinden der Haftreibung im Bereich unter 30 hPa. Die Stellwege des Kolbens liegen bei 50 - 200 µm und werden nur durch die Geometrie des Mikroprüfsystems begrenzt. Mit der optischen Wegmeßeinheit kann die Position der spiegelnden Oberfläche und damit der Stellweg des Kolbens auf weniger als ± 200 nm genau bestimmt werden, wobei das System sowohl an Luft als auch unter Siliconöl betrieben werden kann. Mit den Kraftmeßkolben kann die von diesen übertragene Kraft mit einer Genauigkeit von 5 % bestimmt werden. In der jetzigen Auslegung der Kraftmeßkolben sind allerdings nur Relativmessungen möglich, da die Signaländerung der DMS als Funktion der anliegenden Kraft stark durch die vertikale Position des Balkens relativ zum Kolben beeinflußt wird.

Da der Aktor die Anforderungen des ESPRIT-Projektes IMICS hinsichtlich der Leckrate des Antriebsmediums und der übertragbaren Kräfte erfüllt, wurde als alternative Anwendungsmöglichkeit des druckbetriebenen Mikroaktors ein fluidischer Testaktor für den Einsatz in der minimal invasiven Chirurgie entwickelt. Dieser soll als Antrieb für ein linear arbeitendes Schneidwerkzeug auf einem Herzkatheter verwendet werden. Mit dem fluidischen Aktor konnten über integrierte Lichtschranken, für deren Realisierung wiederum Mikrotunnel verwendet wurden, direkt die Geschwindigkeiten des Kolbens bestimmt werden. Diese liegen in Abhängigkeit vom anliegenden Druck bei 1 bis 2 m/s. Zudem war es mit diesem Aktor möglich, die Kräfte aus der Substratebene heraus zu übertragen. Trotz der nicht optimierten Auslegung des fluidischen Aktors konnten dessen Potential für einen Einsatz auf dem Herzkatheter aufgezeigt werden.

Im Vergleich zu vielen anderen Prüfsystemen für Mikroproben, bei denen in der Regel die Mikroproben in einer makroskopischen Prüfanordnung getestet werden, gelang es in dieser Arbeit, ein Mikroprüfsystem zu entwickeln, dessen laterale Dimension mit derjenigen des Prüflings vergleichbar ist. Die Meßgrößen Kraft und Probendeformation können unabhängig voneinander und unabhängig von den Betriebsbedingungen des Aktors ermittelt werden. Allerdings ist die Größe der Prüflinge bei diesem System nach unten begrenzt. Sollen Größeneffekte (vergl. Kap. 2) untersucht werden, so muß eventuell eine integrierte Herstellung von Probe und Prüfsystem realisiert werden, was aufgrund des hohen Montageaufwands für ein einzelnes System beim vorliegenden Mikroprüfsystem nicht sinnvoll ist.

Eine Weiterentwicklung des Mikroprüfsystems muß eine Optimierung der Kraftmeßkolben hinsichtlich Temperaturverhalten und Unabhängigkeit der DMS-Signale von der vertikalen Balkenposition beinhalten. Ferner sollten Versuche zum anodischen Bonden der deckelnden

Glasplatte, die bereits erfolgreich durchgeführt wurden, weitergeführt werden, um die Montage des Systems zu vereinfachen und die Baugröße des Aktors zu verringern. Das von den Einzelkomponenten aufgezeigte Potential beschränkt sich allerdings nicht auf den Einsatz im Mikroprüfsystem. So sollte die Umsetzung des druckbetriebenen Aktors in eine Antriebseinheit für ein linear arbeitendes Schneidwerkzeug für die minimal invasive Chirurgie weitergeführt werden. Neben dieser Anwendung bietet der in dieser Arbeit entwickelte Mikroaktor enorme Vorteile, wenn es darum geht, hohe Kräfte bei minimaler Baugröße des Aktors in einem Mikrosystem zu übertragen. Ein Einsatz der Wegmeßeinheit zur Charakterisierung weiterer Mikroaktoren bietet sich sicherlich aufgrund des einfachen Funktionsprinzips und Realisierung nach dem LIGA-Verfahren an.

Literaturverzeichnis

- [Ahn 93] Ahn, C.H.; Kin, Y.J.; Allen, M.G.: „A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils“, Proc. MEMS '93, 1993, S. 1-6.
- [All 87] Allen, M.G.; Mehregany, M.; Howe, R.T.; Senturia, S.D.: „Microfabricated structures for the in situ measurement of residual stress, Young's modulus, and ultimate strain of thin films“, J. Appl. Phys., Vol. 51, Nr. 4, 1987, S. 241-243.
- [Arz 91] Arzt, E.; Sanchez, J.; Nix, W.D.: „Mechanische Festigkeit von dünnen Schichten als Grundlage für Werkstoffe der Mikrotechnik“, VDI-Berichte Nr. 933, 1991, S. 163-178.
- [Bac 91] Bacher, W.; Bley, P.; Hein, H.; Klein, U.; Mohr, J.; Schomburg, W.K.; Schwarz, R.; Stark, W.: „Herstellung von Röntgenmasken für das LIGA-Verfahren“, KfK-Nachrichten, Nr. 23 (2-3), 1991, S. 76 ff.
- [Bea 59] Beams, J.W.: „Mechanical properties of thin films of Gold and Silver“ Proc. Structure and properties of thin films, Hrsg. C.A. Neugebauer, J.B. Newkirk und D.A. Vermilyea, John Wiley and Sons, 1959, S. 183-193.
- [Bec 86] Becker, E.W.; Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, D.: „Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography“, Microel. Eng., Nr. 4, 1986, S. 35-56.
- [Bie 95] Biebl, M.; Brandl, G.; Howe, R.T.: „Young's modulus of in situ phosphorus-doped Polysilicon“, Proc. Solid State Sensors and Actuators, and Euroensors IX, Vol. 2, Stockholm, 1995, S. 80-83.
- [Büt 91] Büttgenbach, S.: „Mikromechanik - Einführung in Technologie und Anwendungen“, Teubner, Stuttgart, 1991.
- [Doe 86] Doerner, M.F.; Nix, W.D.: „A method for interpreting the data from depth-sensing indentation instruments“, J. Mater. Res., Vol. 1, Nr. 4, 1986, S.601-609.
- [Doe 88] Doerner, M.F.; Brennan, S.: „Strain distribution in thin aluminum films using X-ray depth profiling“, J. Appl. Phys., Vol. 63, Nr. 1, 1988, S. 126-131.
- [Dub 81] Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel, Hrsg. W. Beitz und K.-H. Küttner, 14. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [Fah 95] Fahrenberg, J.: „Entwicklung eines aktiven Ventilsystems in LIGA-Technik für die minimalinvasive Therapie“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1995.
- [Fie 95] Field, L.A.; Burriesci, D.L.; Robrish, P.R.; Ruby, R.C.: „Micromachined 1x2 optical fiber switch“, Proc. Transducers '95 und Euroensors IX, Stockholm, Schweden, 1995, S. 344-347.
- [Fli 87] Flinn, P.A.; Gardner, D.S.; Nix, W.D.: „Measurement and interpretation of stress in Aluminum-based metallization as a function of thermal history“, IEEE Transactions on electron devices, Vol. ED-34, Nr. 3, 1987, 689-699.
- [Geb 95] Gebhard, U.; Hein, H.; Menz, W.; Ruther, P.: „Fluidic micro-oscillator to steer a linear tool“, Proc. Int. Sym. Microsystems Intelligent Materials and Robots MIMR'95, Sendai, Japan, 1995, 41-44.
- [Gol 95] Goll, C, persönliche Mitteilung, 1995.

- [Göt 92] Göttert, J.: „Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der LIGA-Technik in der Mikrooptik“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992.
- [Gre 95] Greek, S; Ericson, F.; Johansson, S.; Schweitz, J.-A.: „In situ tensile strength measurement of thick-film and thin-film micromachined structures“, Proc. Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Vol. 2, Stockholm, 1995, S. 56-59.
- [Guc 91] Guckel, H.; Skrobis, K.J.; Christenson, T.R.; Klein, J.; Han, S.; Choi, B. and Lovell, E.G.: „On the Application of Deep X-Ray Lithography with Sacrificial Layers to Sensor and Actuator Construction“, Proc. Transducers '91, San Francisco, 1991, S. 393-396.
- [Guc 92] Guckel, H.; Klein, J.; Christenson, T.; Skrobis, K.; Laudon, M.; Lovell, E.G.: „Thermo-magnetic metal flexure actuators“, Proc. Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Technical Digest, Hilton Head Island, South Carolina, 1992, S. 73-77.
- [Guc 93] Guckel, H.; Christenson, T.R.; Skrobis, K.J.; Jung, T.S.; Klein, J.; Hartojo, K.V.; Widjaja, I.: „A first functional current excited planar rotational magnetic micromotor“, Proc. MEMS '93, 1993, S. 7-11.
- [Guc 95] Guckel, H.; Earles, T.; Klein, J.; Zook, D.; Ohnstein, T.: „Electromagnetic linear actuators with inductive position sensing for micro relay, micro valve and precision positioning applications“, Proc. Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Vol. 1, Stockholm, 1995, S. 324-327.
- [Gün 96] Günther, R.: „Entwicklung eines hydraulischen Linearaktors für die minimal invasive Medizintechnik“, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Hof 87] Hoffmann, K.: „Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnmeßstreifen“, Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH (Hrsg.), Darmstadt, 1987.
- [Hot] Bedienungsanleitung MG 3150A, Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt.
- [Jen 95] Jendritza, D.J.: „Design und Anwendung von Piezoaktoren“; in Technischer Einsatz neuer Aktoren, D.J. Jendritza (Hrsg.), Expert Verlag, Kontakt und Studium, Band 484, 1995, S. 148-175.
- [Ilz 95] Ilzhöfer, A.; Tsakmakis, Ch.: „Experimental determination of material properties using a microtensile testing-machine“, Proc. Micro Materials '95, Berlin, 1995, S. 151-157.
- [Joh 88] Johansson, S.; Schweitz, J.-A.; Tenerz, L.; Tiren, J.: „Fracture testing of silicon microelements in situ in a scanning electron microscope“, J. Appl. Phys., Vol. 3, Nr.10, 1988, S. 4799-4803.
- [Joh 91] Johnson, A.D.: „Vacuum-deposited TiNi shape memory film: characterization and applikation in microdevices“, J. Micromech. Microeng., Vol. 1, 1991, S. 34-41.
- [Jus 96] Just, E.: „Charakterisierung eines fluidisch angetriebenen Linearaktors für die minimalinvasive Medizintechnik“, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Kiw 94] Kiwitt, J.: „Untersuchungen zum Einfluß dielektrischer Blenden bei der galvanischen Abscheidung von Mikrostrukturen“, Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1994.
- [Koh 93] Kohl, M.; Mohr, J.: „Entwurf elektrostatischer Linearaktoren“ IMT-Bericht Nr. 110/30, 1993.

- [Koh 95] Kohl, M.; Göttert, J.; Mohr, J.: „Verification of the micromechanical characteristics of electrostatic linear actuators“, Proc. Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Stockholm, 1995, S. 400-403.
- [Kow 91] Kowanz, B.: „Systemtechnische Analyse und Entwicklung eines Mikroventils in LIGA-Technik“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1991.
- [Maa 94] Maas, D.; Büstgens, B.; Fahrenberg, J.; Keller, W.; and Seidel, D.: „Applikation of Adhesive Bonding for Integration of Microfluidic Components“, Proc. ACTUATOR 94, Bremen, 1994, S. 75-78.
- [Men 93] Menz, W.; Bley, P.: „Mikrosystemtechnik für Ingenieure“, VCH-Verlag, Mannheim, 1993.
- [Mey 95] Meyendorf, N.; Altpeter, I.; Faßbender, S.U.; Netzelmann, U.; Reiter, H.; Nichtl-Pecher, W.: „Hochauflösende zerstörungsfreie Verfahren zur Werkstoffcharakterisierung“, Proc. Micro Materials '95, Berlin, 1995, S. 91-106.
- [Moh 90] Mohr, J.; Burbaum, C.; Bley, P.; Menz, W.; Wallrabe, U.: „Movable microstructures manufactured by the LIGA-process as basic elements for microsystems“ in H. Reichl (ed.), MICRO-SYSTEM Technologies 90, VDE-Verlag, Berlin, 1990, S. 529-537.
- [Moh 88] Mohr, J.: „Analyse der Defektursache und Genauigkeit der Strukturübertragung bei der Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1988.
- [Mül 95] Müller, P.: „Dynamische Charakterisierung eines hydraulisch-pneumatisch betriebenen Mikroaktors“, Diplomarbeit, Fachhochschule Karlsruhe, 1995.
- [Nit 68] Nitzsche, K.: „Werkstoffprüfung von Metallen - Mechanische Prüfverfahren“, Band I, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968.
- [Pet 79] Petersen, K.E.; Guarnieri, C.R.: „Young's modulus measurements of thin films using micromechanics“, J. Appl. Phys., Vol. 50, Nr. 11, 1979, S. 6761-6766.
- [Qua 95] Quandt, E.; Hollek, H.; Gugenberger, F.; Seemann, K.: „Magnetostriktive, piezoelektrische und Formgedächtnis-Dünnschichtaktoren“, 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik 1995, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 5670, 1995, 155-160.
- [Rog 96] Rogge, B.: „Entwicklung, Optimierung und Test von elektromagnetischen Linearaktoren basierend auf LIGA-Mikrotechnik“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1996.
- [Ros 89] Rosenmayer, C.T.; Brotzen, F.R.; Gale, R.J.: „Mechanical testing of thin films“, Proc. Materials Research Society Symposium, Vol. 130, 1989, S. 77-86.
- [Rut 94] Ruther, P.; Bacher, W.; Feit, K.; Hecke, M.; Weindel, K.: „LIGA-made pneumatically driven micro-actuator for use in a micro testing system“, Proc. MICRO SYSTEM Technologies '94, Berlin, 1994, S. 899-906.
- [Rut 95] Ruther, P.; Bacher, W.; Feit, K.; Maas, D.; Menz, W.: „Microtesting system made by the LIGA process to measure Young's modulus of cantilever microbeams“, Proc. ASME'95 Winter Meeting, San Francisco, USA, DSC-Vol. 57/2, 1995, 963-967.
- [Sai 95] Saif, M.T.A.; MacDonald, N.C.: „A milli Newton micro loading device“, Proc. Solid State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, Vol. 2, Stockholm, 1995, Vol. 2, S. 60-63.

- [Sai 96] Saif, M.T.A.; MacDonald, N.C.: „Micro mechanical single crystal silicon fracture studies - Torsion and bending“, Proc. MEMS'96, San Diego, 1996, S. 105-109.
- [Ses 95] Sesterhenn, M., persönliche Mitteilung, 1995.
- [Sma 92] Small, M.K.; Vlassak, J.J.; Nix, W.D.: „Re-examining the bulge-test: Methods for improving accuracy and reliability“, Proc. Materials Research Society Symposium, Vol. 239, 1992, 257-262.
- [Sni 91] Sniegowski, J.J.: „A micro actuation mechanism based on liquid-vapor surface tension“, Proc. Transducers '93, 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Yokohama, Japan, Juni 1991, S. 12-13.
- [Som 94] Sommer, E.; Olaf, J.M.: „Mechanische Eigenschaften von Mikrokomponenten bestimmen“, Materialprüfung 36, 1994, S. 124- 128.
- [Som 95] Sommer, E.: „Mechanisches Verhalten von Mikrobauanteilen und -systemen“, Vorlesungsskript Wintersemester 1994/95, Universität Karlsruhe.
- [Stär 95] Stärk, H.; Firma Eckardt Meß- und Prozeßleittechnik, Process Instrumentation, Stuttgart, persönliche Mitteilung, 1995.
- [Tim 72] Timoshenko, S.P.; Gere, J.M.: „Mechanics of materials“, van Nostrand Reinhold Company, New York, 1972.
- [Töp 88] Töpfer, H.; Schwarz, A.: „Wissenspeicher Fluidtechnik“, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1988.
- [Vla 92] Vlassak, J.J.; Nix, W.D.: „A new bulge test technique for the determination of Young's modulus and Poisson's ratio of thin films“, J. Mater. Res., Vol. 7, Nr. 12, 1992, S.3242-3249.
- [Wag 92] Wagner, B.; Kreuzer, M.; Benecke, W.: „Linear and rotational magnetic micromotors fabricated using silicon technology“, Proc. MEMS '92, 1992, S. 183-189.
- [Wal 74] Walcher, H.: „Digitale Lagemeßtechnik“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1974.
- [Wal 92] Wallrabe, U.: „Entwicklung, Optimierung und Test von elektrostatischen Mikromotoren nach dem LIGA-Verfahren“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992.
- [Wal 95] Wallrabe, U.; Fahrenberg, J.; Gebhard, U.; Ruther, P.; Ruzzu, A.: „Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik zur Herstellung von Mikrokomponenten für einen Herzkatheter“; 2. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik 1995, Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-Bericht 5670, 1995, 123-127.
- [Wei 88] Weihs, T.P.; Hong, S.; Bravman, J.C.; Nix, W.D.: „Mechanical deflection of cantilever micobeams: A new technique for testing the mechanical properties of thin films“, J. Mater. Res., Vol. 3, Nr. 5. 1988, S.931-942.
- [Wei 93] Weindel, K.: „Entwurf eines Mikrosystems zur Messung mechanischer Eigenschaften von LIGA-Mikroproben“, unveröffentlichter Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, 1993.
- [Zap 96] Zappe, H.P.; Hofstetter, D.: „A monolithic optical displacement measurement microsystem“, Proc. MEMS'96, San Diego, 1996, S. 400-405.

Anhang - Dehnmeßstreifen und deren meßtechnischer Einsatz

Bei der Analyse von Werkstoffbeanspruchungen sind die Spannungen, denen der Werkstoff ausgesetzt ist, über Dehnungen an der Oberfläche der untersuchten Bauteile meßtechnisch zugänglich. Ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Dehnungsmessung stellen die Dehnmeßstreifen (DMS) dar. Dabei unterscheidet man zwischen metallischen, Halbleiter-, kapazitiven, piezoelektrischen und spannungsoptischen DMS.

Von experimenteller Bedeutung sind im wesentlichen die metallischen DMS, die hauptsächlich bei Meßaufnehmern verwendet werden. Zur direkten Messung der im Mikroprüfsystem am Biegebalken angreifenden Kräfte werden metallische Dünnschicht-DMS eingesetzt (siehe Kap. 3.4.1). Diese werden nicht auf dem Meßaufnehmer appliziert, wie dies üblicherweise geschieht, sondern die DMS werden auf einem Grundsubstrat hergestellt, auf dem wiederum der Meßaufnehmer, d.h. der Kraftmeßkolben, nach dem LIGA-Verfahren realisiert wird (siehe Kap. 4).

A.1 Funktionsprinzip

Bei der mechanischen Beanspruchung eines elektrischen Leiters wird dessen Querschnitt und das Werkstoffgefüge geändert. Hierbei kommt es zu einer Änderung des elektrischen Widerstands, wobei diese von Wheatstone und Thomson gemachte Beobachtung als *Dehnungswiderstands-Effekt* bezeichnet wird. Die Widerstandsänderung ΔR kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\text{geometr.}} + \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)_{\text{Gefüge}} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (\text{A.1})$$

mit dem geometrisch bedingten Anteil und dem Gefügeanteil. Dabei ist ε die Dehnung, ν die Querszahl und ρ der spezifische Widerstand des Leiters. Für viele Metalle ist die Widerstandsänderung als Funktion der Dehnung linear mit k der Dehnungsempfindlichkeit des DMS:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \varepsilon \quad (\text{A.2})$$

A.2 Meßtechnik

A.2.1 Wheatstone'sche Meßbrücke

Bei der mechanischen Belastung der DMS kommt es zu Widerstandsänderungen im Bereich weniger 0.1 %. Um diese Widerstandsänderungen detektieren zu können, wird die sog. Wheatstone'sche Meßbrücke verwendet.

In Abb. A.9 ist das prinzipielle Schaltbild einer Wheatstone'schen Meßbrücke dargestellt. Die veränderlichen Widerstände R_1 bis R_4 bilden die Arme der Brücke. An den Brückenknoten 2 und 4 wird die stabilisierte Gleich- oder Wechselspannung U_B zugeführt. Als Meßsignal erhält man die Brückenausgangsspannung U_A zwischen den Punkten 1 und 3.

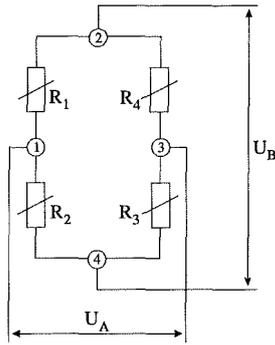
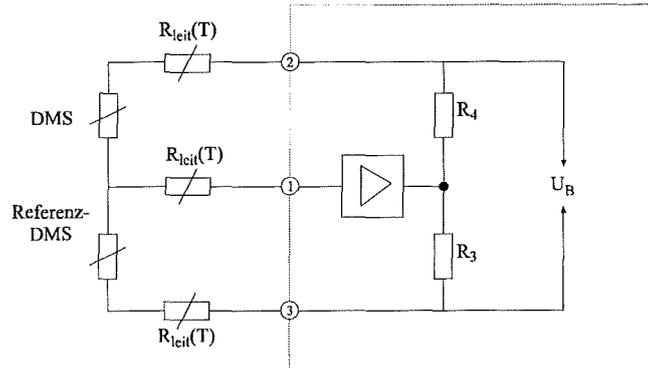


Abb. A.9: Schaltbild
Wheatstone'schen
Meßbrücke [Hof 87].



einer Abb. A.10: Dreileiterschaltung des Meß- und Referenz-DMS in einer Halbbrückenschaltung. Bei Verwendung identischer Zuleitungen werden deren Temperatureffekte kompensiert [Hof 87].

Die Brückenausgangsspannung U_A ergibt sich als Differenz der beiden Teilspannungen U_{2-1} und U_{2-3} zwischen den Punkten 2 und 1 sowie zwischen 2 und 3:

$$U_A = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (\text{A.3})$$

Hiermit kann die sog. Brückenverstimmung U_A/U_B definiert werden. Die Brücke ist abgeglichen, d.h. $U_A/U_B = 0$, für den Fall, daß $R_i = R$ ($i = 1, \dots, 4$) oder daß $R_1/R_2 = R_4/R_3$. Bei Widerstandsänderungen ΔR_i in den Brückenzweigen erhält man:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (\text{A.4})$$

wobei (A.4) für kleine ΔR_i , wie sie bei metallischen DMS auftreten, angenähert werden durch [Hof 87]:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{A.5})$$

Hier zeigt sich sehr deutlich die Wirkungsweise der Wheatstone'schen Meßbrücke: Widerstandsänderungen mit gleichem Vorzeichen in benachbarten Brückenarmen mindern die Brückenverstimmung bzw. heben sich bei gleichen Beträgen in ihrer Wirkung auf. Dies kann zur Kompensation von Störeffekten verwendet werden. Mit (A.2) kann (A.5) umgeschrieben werden zu:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{A.6})$$

A.2.2 Temperaturegangskompensation

Die Kraftmessung im Mikroprüfsystem erfolgt über Dehnmeßstreifen, die auf dem Kolben integriert sind. Da wegen der einfacheren Verfügbarkeit Gold als Mäander-Material verwendet wird, ist die Widerstandsänderung der DMS-Mäander bei einer Temperaturänderung vergleichbar mit oder größer als diejenige, die bei der mechanischen Belastung des DMS zu

erwarten ist (siehe Kap. 3.4.1.3). Daher muß der Temperaturgangseffekt des Kraftmeßkolbens kompensiert werden.

Im vorliegenden Fall werden die Temperaturgangseinflüsse auf den Meßkolben (Dehnung des Grundkörpers und Widerstandsänderung des Mäandermaterials für $\beta_0 \neq 0$) durch Verwendung eines Referenzkolbens kompensiert, der mechanisch nicht belastet wird. Der Referenzkolben stammt aus der gleichen Herstellungsserie und wird innerhalb des Mikroprüfsystems so montiert, daß er dem gleichen zeitlichen und betragsmäßigen Temperaturverlauf wie der Meßkolben unterworfen ist. Die elektrische Kontaktierung des aktiven (messenden) DMS und des Referenz-DMS erfolgt als Wheatstone'sche Halbbrücke gemäß Abb. A.10. Die Temperaturgangseffekte der Anschlußleitungen mit $R_{leit}(T)$ werden mit Hilfe der in Abb. A.10 dargestellten Dreileiterschaltung vollständig kompensiert, falls folgende Bedingungen erfüllt sind [Hof 87]:

- Die Zuleitungen müssen identische physikalische Eigenschaften besitzen hinsichtlich Querschnitt, Länge und Temperaturkoeffizient β_0 .
- Gleicher Temperaturgang über die gesamte Länge der Zuleitungen.

Die Widerstandsänderung im DMS des Meßkolbens $\Delta R_{meß}$ setzt sich zusammen aus der thermisch bedingten Widerstandsänderung ΔR_{therm} und der durch die externe Krafteinwirkung hervorgerufenen Widerstandsänderung ΔR_{mechan} :

$$\text{d.h.} \quad \Delta R_{aktiv} = \Delta R_{therm} + \Delta R_{mechan} \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Dabei ist} \quad \Delta R_{therm} = k \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot R_0 + \beta_0 \cdot \Delta T \cdot R_0 \quad (\text{A.8})$$

die thermisch bedingte Widerstandsänderung, die durch die Dehnung des Grundkörpers und durch die Widerstandsänderung der DMS-Mäander aufgrund des Temperaturkoeffizienten hervorgerufen wird (siehe Kap. 3.4.1.3). Für den Referenzkolben gilt Gleichung (A.8) ebenfalls.

Wird die Widerstandsänderung auf den Ausgangswiderstand des DMS bezogen, so gilt:

$$\frac{\Delta R_{aktiv}}{R_{aktiv}} = k \cdot \alpha \cdot \Delta T + \underbrace{\beta_0 \cdot \Delta T}_{\substack{\text{therm.} \\ \text{Anteil}}} + \underbrace{k \cdot \varepsilon}_{\substack{\text{mechan.} \\ \text{Anteil}}} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\Delta R_{Komp.}}{R_{Komp.}} = k \cdot \alpha \cdot \Delta T + \beta_0 \cdot \Delta T \quad (\text{A.10})$$

Verwendet man (A.9) und (A.10) in (A.5) für die Brückenverstimmung und setzt voraus, daß für R_3 und R_4 Festwiderstände verwendet werden, so gilt:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{I}{4} \left(\frac{\Delta R_{aktiv}}{R_{aktiv}} - \frac{\Delta R_{Komp.}}{R_{Komp.}} \right) = \frac{I}{4} k \cdot \varepsilon \quad (\text{A.11})$$

Dies bedeutet, daß bei kleinen Widerstandsänderungen der Temperatureinfluß auf die DMS bei Verwendung zweier DMS (aktiver und Referenz-DMS) kompensiert wird und nur die mechanische Belastung des aktiven DMS gemessen wird.

Liste der verwendeten Symbole

| Symbol | Einheit | Größe |
|------------------------|-------------------|--|
| α | K^{-1} | thermischer Ausdehnungskoeffizient |
| β_0 | K^{-1} | Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands |
| ε | 1 | Dehnung |
| η | kg/m·s | dynamische Viskosität |
| σ, σ_{zul} | N/m ² | Spannung, zulässige maximal Spannung |
| ΔL | m | Längenänderung |
| Δp | hPa | Druckverlust |
| ΔR | Ω | Widerstandsänderung |
| ΔT | K | Temperaturänderung |
| b | m | Breite |
| d | m | Durchmesser |
| f, f_{max} | m | Deformation des Balkens |
| h | m | Höhe |
| k | 1 | Dehnungsempfindlichkeit der DMS |
| l, L | m | Länge |
| p | hPa | Druck |
| s | m | Spaltbreite |
| v | m/s | Kolbengeschwindigkeit |
| A | m ² | Querschnittsfläche des Kolbens |
| D | m/N | Federkonstante |
| E | N/m ² | Elastizitätsmodul |
| F | N | Kraft |
| I | m ⁴ | Flächenträgheitsmoment |
| I | w.E. | Intensität |
| N | 1 | Anzahl |
| R | Ω | Widerstand |
| S_{diff}^{norm} | 1 | normiertes Differenzsignal |
| \dot{V} | m ³ /s | Volumenstrom |
| W | m ³ | Widerstandsmoment |