

Miniaturgreifer mit opto-thermo-mechanischem Antrieb

R. Preuß, K. Zimmermann

Es wird ein Miniaturgreifer vorgestellt, der auf einer geschlossenen, stoffkohärenten Rahmenstruktur basiert, die erstmals von Bögelsack (1995) vorgestellt wurde. Der geschlossene Rahmen besteht aus einem nachgiebigen, elliptischen Ring, der durch Integration eines laminaren Antriebselementes aktiv verformt werden kann. Dabei kann die Änderung des Tangentenwinkels an der dem Rahmen zugrunde liegenden Ellipse zum Antrieb von weiteren Mechanismen genutzt werden. Im vorliegenden Fall wurde der Rahmen mit zwei Fingern versehen, die bei Verformung des Rahmens eine Greifbewegung ausführen.

1 Einleitung

Neben monolithisch aufgebauten Mikrosensoren, wie sie bisher vor allem im Automobilbau zum Einsatz kamen, werden zunehmend hybride Mikrosysteme entwickelt, die aus mehreren, separat hergestellten Mikrokomponenten bestehen. Um derartige Systeme automatisiert montieren zu können, wurden bereits unterschiedlichste Miniatur- bzw. Mikrogreifer entworfen und im Labormaßstab realisiert. Die so realisierten Greiferprinzipien können in Unterdruck- und Getriebegreifer unterteilt werden (Zöppig, 1998).

Unterdruckgreifer bauen die Haltekraft zum Greifobjekt dadurch auf, daß zwischen einem Saugrohr und dem Greifobjekt ein Druck kleiner dem umgebenden Luftdruck erzeugt wird. Getriebegreifer hingegen erzeugen die Greifkraft mittels mechanisch-bewegten Greiforganen und Wirkelementen durch Reib- oder Formschluß. Dafür sind unterschiedliche Antriebsprinzipien bekannt. So wurden bereits mehrere Mikrogreifer mit elektrostriktiven Antrieben (Piezo-Elemente) verwirklicht (Goldfarb und Celanovic, 1999; Salim, 1998; Klocke-Nanotechnik, 1998).

Weiterhin wurden Getriebegreifer mit elektrostatischen Antrieben (Benz u.a., 1995, S. 33; Salim, 1998, S. 13) und elektromagnetischen Antrieben realisiert (Henschke, 1994, S. 32 ff.; Zöppig, 1998, S. 74 ff.). Mit der Verwendung von SMA-Elementen (Bellouard u.a., 1998; Lee u.a., 1997; Hesselbach und Pittschellis, 1996) kamen elektro-thermo-mechanische Antriebe zum Einsatz. Außerdem wurde ein Getriebegreifer vorgestellt, der einen elektro-thermo-mechanischen Antrieb besitzt, der nicht auf einem Form-Gedächtnis-Effekt basiert, sondern die unterschiedliche Ausdehnung eines Materials bei unterschiedlichen Temperaturen nutzt (Lerch u.a., 1996).

2 Prinzip des Greifers

Der Entwurf des Mikrogreifers basiert auf einer nachgiebigen Rahmenstruktur, wie sie von Bögelsack (1995) für mikrotechnische Anwendungen vorgeschlagen wurde. Dabei sind an einem nachgiebigen Rahmen, der in vereinfachter Darstellung als ellipsenförmige Kurve erscheint, zwei Greiforgane angeordnet, die bei der Verformung des Rahmens eine Greifbewegung ausführen. Die Verformung des Rahmens kann dabei nach Bögelsack (1995, S. 2) durch "Einzelkräfte, längs der Kurve angeordnete laminare Antriebselemente (z.B. bimorphe Piezoelemente) oder durch innendruckerzeugende Medien (gasförmig, flüssig, viskos)" erfolgen.

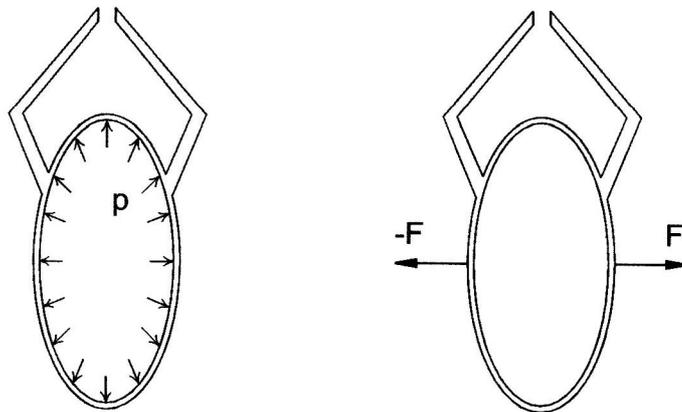


Bild 1. Mikrogreifer als ellipsenförmige Rahmenstruktur nach Bögelsack (1995)

Die Herstellung der in Bild 1 gezeigten Greiferstruktur wurde im konkreten Fall durch die Strukturierung von photosensiblen Glas realisiert (Harnisch, 1998). Um einen weiteren monolithischen Aufbau zu gewährleisten, ist die Verwendung eines laminaren Antriebselementes sinnvoll. Ausgehend von Glas als Greifer- und damit Substratmaterial wurde die Erzeugung eines Thermobimorphs aus einer Glas- und einer Metallschicht favorisiert.

Thermobimorphe kommen bereits in verschiedenen Mikrosystemen zum Einsatz. Dabei werden die Thermobimorphe mittels Widerstandserwärmung (Greitmann und Buser, 1996; Sturm, 1999, S.128 ff.) oder unter Ausnutzung kapazitiver Verlustleistung (Rashidian und Allen, 1993) aufgeheizt. Das Thermobimorph im realisierten Greifer wird durch den fokussierten Lichtstrahl einer Laserdiode aufgeheizt. Die Laserdiode kann dabei in nahezu beliebiger Entfernung vom Greifer aufgestellt werden. Der Laserstrahl wird durch die Luft oder mittels Glasfasern zum Greifer geleitet. Unter Ausnutzung der optischen Eigenschaften des Greifermaterials kann der Lichtstrahl ebenfalls durch Teile der Greiferstruktur hindurch geleitet werden, bis der Strahl auf das Thermobimorph trifft. Einen Laserstrahl als Energiequelle eines mechanischen Mikrosystems zu verwenden, wurde bereits in einer Mikro-Peristaltikpumpe verwirklicht (Fujimasa, 1999). Dabei wird unter Ausnutzung der Laserenergie eine Flüssigkeit verdampft, um durch den in einer abgeschlossenen Kammer entstehenden Druck eine Membran zu verformen. Die Verwendung eines laser-beheizten Thermobimorphs stellt ein neues Antriebsprinzip dar.

Der Mikrogreifer mit Thermobimorph wurde, wie in Bild 2 (a) dargestellt, gestaltet. Zur Erzeugung eines Thermobimorphs muß der elliptische Rahmen auf der Innenseite einer Hälfte der Ellipse mit einer Metallschicht versehen werden, was technologisch zur Zeit nicht realisiert ist. Als Prototyp wurde ein Mikrogreifer mit einem konventionellen Bimetall als Antriebselement verwirklicht, um die Funktion des opto-thermo-mechanischen Antriebs untersuchen zu können. Dieser Greifer, dargestellt in Bild 2 (b), basiert auf derselben Rahmenstruktur wie der Mikrogreifer mit Thermobimorph. Allerdings muß der zum Halbkreis gebogene Thermo-Bimetall nachträglich montiert und mit der Greiferstruktur durch Kleben verbunden werden.

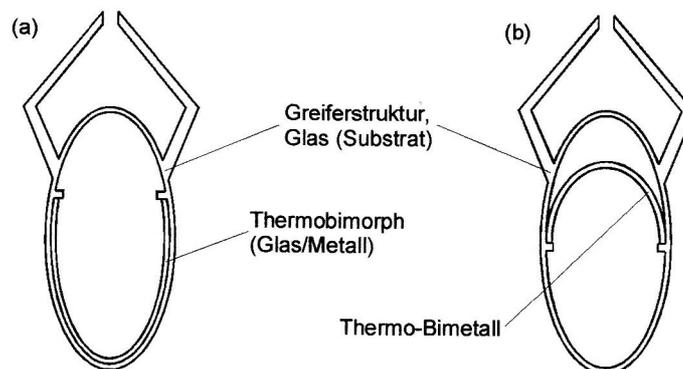


Bild 2. Mikrogreifer mit Thermobimorph (a) und konventionellem Thermobimetall (b) als Antriebselement

Die Maße der erzeugten Glasstruktur und des verwendeten Thermobimetalls betragen:

- große Halbachse der Ellipse	$a = 10 \text{ mm}$
- kleine Halbachse der Ellipse	$b = 5 \text{ mm}$
- Rahmendicke	$d = 200 \text{ }\mu\text{m}$
- Rahmenhöhe (Waferdicke)	$h = 1000 \text{ }\mu\text{m}$
- Länge der Greiforgane (Ansatz am Rahmen bis Wirkfläche)	$l_G = 10 \text{ mm}$
- Dicke der Greiforgane	$d_G = 500 \text{ }\mu\text{m}$
- Greifspanne	$s_{Sp} = 1000 \text{ }\mu\text{m}$
- Greifweg	$s_G = 500 \text{ }\mu\text{m}$
- Dicke des Thermobimetalls	$d_{Bog} = 100 \text{ }\mu\text{m}$
- Breite des Thermobimetalls	$h_{Bog} = 1,5 \text{ mm}$
- Radius des Bogens	$R_{Bog} = 4,7 \text{ mm}$

Die Grundfläche des entworfenen Miniaturgreifers beträgt $10 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$.

3 Berechnungen

Im Rahmen des Greiferentwurfs wurden für die Dimensionierung der Glasstruktur FEM-Berechnungen durchgeführt. Dazu wurden mittels der Software ANSYS 5.4 FEM-Modelle funktionsbestimmender Elemente des Mikrogreifers sowie ein parametrisiertes FEM-Modell des gesamten Mikrogreifers geschaffen.

Als erster Schritt der Miniaturisierung eines vorliegenden Makromodells wurde die Entwicklung eines Greifers mit $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ Grundfläche angestrebt. Somit wurden die Abmessungen des ellipsenförmigen Teils des Rahmengefüges mit $a = 10 \text{ mm}$ und $b = 5 \text{ mm}$ festgelegt. Weitere geometrische Parameter des elliptischen Rahmens sind die Höhe h und die Dicke d . Die Höhe des Rahmens h entspricht der Dicke des Glaswafers und ändert sich während der Strukturierungsprozesse nur geringfügig. Die Dicke des Rahmens d ist variierbar und wird durch eine technologisch bedingte, minimale Stegbreite von $150 \dots 200 \text{ }\mu\text{m}$ beschränkt. Um, bzgl. Nachgiebigkeit und Festigkeit, die optimale Rahmendicke ermitteln zu können, wurde ein Berechnungsmodell des Rahmens geschaffen. Aufgrund der ebenen Gestalt des Rahmens und der Lage der einwirkenden Kräfte sowie der zu erwartenden Verformungen innerhalb der Strukturebene des Rahmens wurde ein ebenes Modell mit konstanter Höhe entwickelt. Zur Vernetzung wurden ebene Festkörper-Elemente verwendet, die über jeweils vier Knoten mit je zwei translatorischen Freiheiten verfügen. Der modellierte Rahmen wurde am Punkt $(a; 0)$ mit einer Einspannung versehen, siehe Bild 3. Die Lastaufbringung erfolgte am Punkt $(0; b-d)$ durch eine Kraft

$$\mathbf{F} = F \mathbf{e}_y \quad (1)$$

und am Punkt $(0; -b+d)$ durch

$$-\mathbf{F} = -F \mathbf{e}_y \quad (2)$$

mit dem Betrag $F = 0 \dots 500 \text{ mN}$. Mit der Rahmendicke d als Parameter wurde die Verformung des Rahmens in Abhängigkeit von der Last, im gegebenen Intervall, berechnet. Unter Berücksichtigung der maximal-zulässigen Biegespannung $\sigma_{b \text{ zul}} = 385 \text{ N/mm}^2$ (Harnisch, 1998) wurde die Verschiebung des Rahmens im Kraftangriffspunkt $(0; b-d)$ als Funktion von der Last aufgenommen ($\forall d, F: \Delta x = 0 \Rightarrow \Delta s = \Delta y$). Somit konnte eine Kraft-Weg-Kennlinienschar mit d als Parameter erstellt werden, Beispiel in Bild 5.

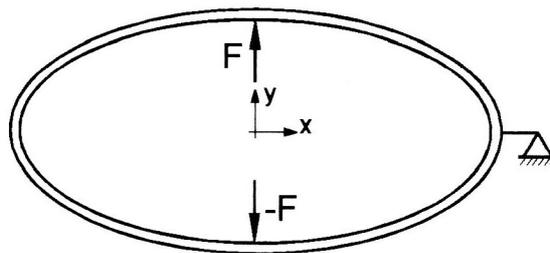


Bild 3. Modellierung der Rahmenstruktur als Ellipsenring mit Einspannung und Lasten

Auch für die möglichen Antriebselemente (verschiedene Bimetallmaterialien und –halbzeugmaße) wurde ein Berechnungsmodell erstellt. Die Aufheizung des halbkreisförmigen Thermobimetalls sollte praktisch mittels auf einen Punkt des Materials fokussierter Laserstrahlung erfolgen. Somit war es notwendig, zuerst die innerhalb des Metalls entstehende Temperaturverteilung und anschließend die durch thermische Ausdehnung der Materialien hervorgerufene Verformung zu berechnen.

Um die Kraft-Weg-Kennlinie eines Bimetalls als Antriebselement aufstellen zu können, werden i.a. zwei Kennwerte der Kurve benötigt – die freie Ausbiegung und die Blockierkraft. Zu diesem Zweck wurden zwei Modelle aufgestellt. Für beide Berechnungsaufgaben wurden zwei konzentrische, miteinander verbundene, halbkreisförmige Ringe mit unterschiedlichen Materialparametern modelliert. Die dabei verwendeten räumlichen Festkörper-Elemente verfügen über acht Knoten mit je drei translatorischen Freiheiten sowie Temperatur und elektrischem und magnetischem Potential. Somit können Temperaturverteilungen und ihre mechanischen Wirkungen simuliert werden. Um die freie Ausbiegung des Bimetallbogens im ersten Modell zu ermöglichen, wurden die Enden des gesamten halbkreisförmigen Bogens mit einem Fest- $(0; 0)$ bzw. Loslager $(2 \cdot R_{Bog}; 0)$ versehen, Bild 4 (a). Zur Berechnung der Blockierkraft wurden im zweiten Modell die Enden des Bogens mit Festlagern versehen, Bild 4 (b). Die Blockierkraft entspricht in diesem Fall der Lagerreaktion. Als Last wurde ein Wärmestrom $P_{therm} = 0 \dots 200 \text{ mW}$ auf einen Knoten im Scheitelpunkt des Halbkreisbogens $(R_{Bog}; R_{Bog} \cdot d_{Bog})$ aufgebracht.

Die Kopplung des Antriebselementes mit der Innenfläche des elliptischen Rahmens führt dazu, daß der Radius des Halbkreisbogens von der Dicke des Rahmens abhängt. Da die Rahmendicke d erst nach Auswertung der Berechnungen festgelegt werden sollte und der Vergleich der zur Verfügung stehenden Bimetallmaterialien und –halbzeuge im Vordergrund stand, wurde der Bogenradius einheitlich mit $R_{Bog} = 5 \text{ mm}$ angenommen. Als Bimetallmaterialien standen TB 1577A und TB 1511 (nach DIN 1715) in Halbzeugen der Dicke $d_{Bog} = 0,1 / 0,2 \text{ mm}$ (Verhältnis der Schichtdicken ca. 1:1) und der Breite $h_{Bog} = 1 / 1,5 / 2 \text{ mm}$ zur Verfügung. Die Referenztemperatur wurde mit $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Konvektion mit $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ angenommen.

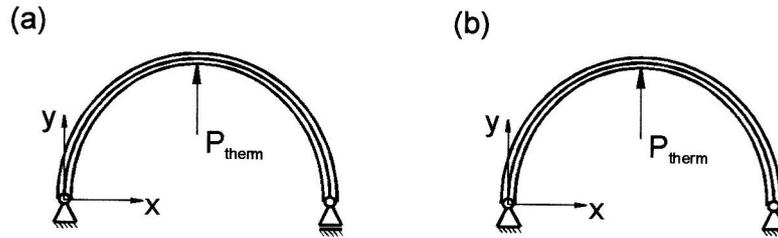


Bild 4. Modellierung des halbkreisförmig-gebogenen Thermobimetallstreifens zur Berechnung der freien Ausbiegung (a) und der Blockierkraft (b)

Zum Wärmestrom P_{therm} muß bemerkt werden, daß er nicht mit der Lichtleistung der Laserdiode P_{Licht} gleichgesetzt werden darf, da auf der Oberfläche des Thermobimetalls neben der Absorption des Lichtes und damit Energiewandlung Licht/Wärme auch Reflexion auftritt. Somit kann ein Wirkungsgrad $\eta_{Licht-Wärme}$ zu den Energieverlusten zwischen Laserdiode und Bimetall bestimmt werden. Um den Wirkungsgrad der Energiewandlung zu erhöhen, wurden alle bestrahlten Oberflächen rußgeschwärzt.

Die Bestimmung des Wirkungsgrades $\eta_{Licht-Wärme}$ erfolgte mittels Messungen und Berechnungen an einfachen, eingespannten Bimetallstreifen. Dazu wurde ein einseitig eingespannter Biegebalken modelliert und mit einem Wärmestrom $P_{therm} = 0 \dots 200 \text{ mW}$ belastet ($20 \text{ }^\circ\text{C}$, $10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Das Berechnungsmodell basiert auf denselben räumlichen Festkörper-Elementen, die bereits bei der Modellierung der Antriebselemente verwendet wurden. Die berechneten Ausbiegungen wurden mit real-gemessenen Werten verglichen. So konnte den im Experiment aufgetragenen Laserleistungen jeweils ein Wärmestrom zugeordnet und ein Wirkungsgrad

$$\eta_{Licht-Wärme} = \frac{P_{therm}}{P_{Licht}} \quad (3)$$

berechnet werden. Diese Methode ist relativ ungenau, da im FEM-Modell keine Inhomogenitäten der Oberflächenschwärzung, Verluste durch die Fokussieroptik, Streuverluste, auftretende Luftzirkulationen u.a. erfaßt werden. Sie reicht jedoch aus, um eine Abschätzung des Wirkungsgrades zu erhalten. Der so bestimmte Wirkungsgrad beträgt $\eta_{Licht-Wärme} \approx 15 \%$.

Für die Antriebselemente aus den vorhandenen Bimetallmaterialien und -halbzeugen wurden Kraft-Weg-Kennlinienscharen mit P_{therm} als Parameter berechnet. Mit Hilfe der erhaltenen Kennlinienscharen für Antriebselemente und Rahmenstruktur wurden die Arbeitspunkte verschiedener Kombinationen Antrieb/Greifermechanismus ermittelt und verglichen. Dies ist in Bild 5 am Beispiel zweier Kraft-Weg-Kennlinien des Rahmens ($d = 0,1/0,2 \text{ mm}$) und einer Kennlinienschar eines Antriebselementes für $P_{therm} = 0 \dots 50 \text{ mW}$ dargestellt. Die Schnittpunkte der Kennlinien stellen dabei die Arbeitspunkte des Greifers mit bestimmter Rahmendicke, bei freier Bewegung der Greiforgane und entsprechender thermischer Antriebsleistung dar. Den Werten der Verschiebung des Rahmens am Punkt $(0; b-d)$ in den Arbeitspunkten wurde der entsprechende Verformungszustand des gesamten Rahmens zugeordnet, um den Greifweg von an dem Rahmen angeordneten Greiforganen der Länge $l_G = 10 \text{ mm}$ zu berechnen. Dazu mußten auf der Ellipsenkurve die günstigsten Punkte für den Ansatz der Greiforgane ermittelt werden. Um den Greifweg bei gegebener Länge der Greiforgane zu maximieren, wurden die Punkte der Ellipse als Ansatzpunkte gewählt, die bei Belastung des Rahmens die größte Verkipfung (Drehung um z-Achse), d.h. Änderung des Tangentenwinkels an der Ellipse erfahren. Dies ist an den Stellen des Rahmens der Fall, an denen keine Krümmungsänderung der Kurve auftritt (Zimmermann und Petkun, 1995).

Mit Hilfe der berechneten Kraft-Weg-Kennlinien für Antriebselemente und Rahmenstruktur und den Ansatzpunkten für die Greiforgane wurde ein Greifer mit den in Kap. 2 erwähnten Maßen entworfen und gefertigt. Als Thermobimetall wurde TB 1577 A ausgewählt.

Die Modellierung des Antriebselementes, mit Berechnung der freien Ausbiegung und der Blockierkraft bei beidseitiger Lagerung mit Festlagern, ist ausreichend für eine Dimensionierung der beiden Einzel-Elemente. Die realen Bedingungen der Kopplung von Bimetall und Glasstruktur erfüllt diese Modellierung jedoch nicht. Da die beiden Elemente durch Kleben verbunden sind, liegt bei dieser Kopplung keine Lagerung sondern eine steife Verbindung vor. Um diesen Mangel zu beseitigen und einen genaueren Vergleich zwischen theoretischen Berechnungen und den Meßergebnissen am realen Mikrogreifer zu ermöglichen, wurde ein Modell des gesamten, montierten Greifers geschaffen, Bild 6.

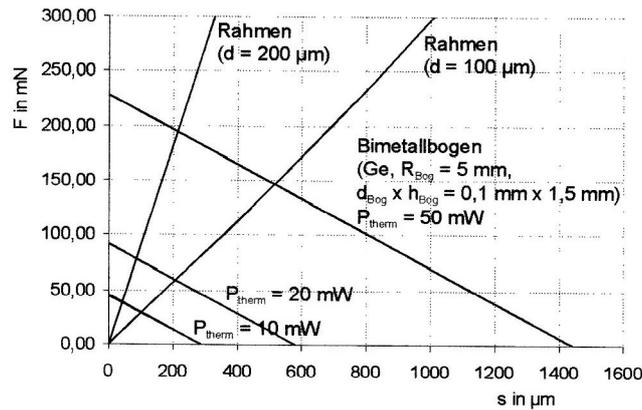


Bild 5. Kraft-Weg-Kennlinien ellipsenförmiger Rahmen mit variiertem Rahmendicke d und eines bogenförmigen Bimetalls des Materials TB 1577 A bei variiertem, thermischer Belastung

Das Modell ist vollständig parametrisiert, so daß ausgehend von der grundsätzlichen Gestalt des Greifers – ellipsenförmiger Rahmen, Greiforgane, bogenförmiger Thermobimetall – die Geometrie und die Materialien des Greifers beliebig variiert und die Wirkungen auf die Eigenschaften des Greifers berechnet werden können. Auch bei dieser Modellierung werden die bereits genannten räumlichen Festkörper-Elemente verwendet. Die Vernetzung erfolgt ebenfalls parametrisiert, wobei die Anzahl der Elemente auf einem Ellipsenbogen (N) und die Anzahl der Elementschichten senkrecht zur Waferebene (M) vorgegeben werden können. Bei den durchgeführten Berechnungen wurde $N = 100$ und $M = 2$ gewählt. Die Vernetzung der Greiforgane erfolgte der Größe der Elemente des elliptischen Rahmens entsprechend. Das Greifermodell wurde am Scheitelpunkt der Ellipse (vgl. Bild 3, Punkt (a; 0)) eingespannt und das Antriebselement im Scheitelpunkt des Halbkreisbogens (vgl. Bild 4, Punkt (R_{Bog} ; $R_{Bog}-d_{Bog}$)) mit einer thermischen Last $P_{therm} = 0 \dots 200$ mW beaufschlagt (Referenztemperatur und Konvektionen – äquivalent zu den vorherigen Berechnungen). Als Materialparameter wurden für die Rahmenstruktur die Parameter von photostrukturierbarem Glas, nach Harnisch (1998), und für den Thermobimetall die Parameter von TB 1577 A, nach G.Rau GmbH (1989), verwendet

- E-Modul $E_{Glas} = 78,1 \text{ kN/mm}^2$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Glas} = 1,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Ausdehnungskoeffizient $\alpha_{Glas} = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- E-Modul des Thermobimetalls $E_{akt/pass} = 170 \text{ kN/mm}^2$
- Wärmeleitfähigkeit des Thermobimetalls $\lambda_{akt/pass} = 13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Ausdehnungskoeffizient der aktiven Komponente $\alpha_{akt} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Ausdehnungskoeffizient der passiven Komponente $\alpha_{pass} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

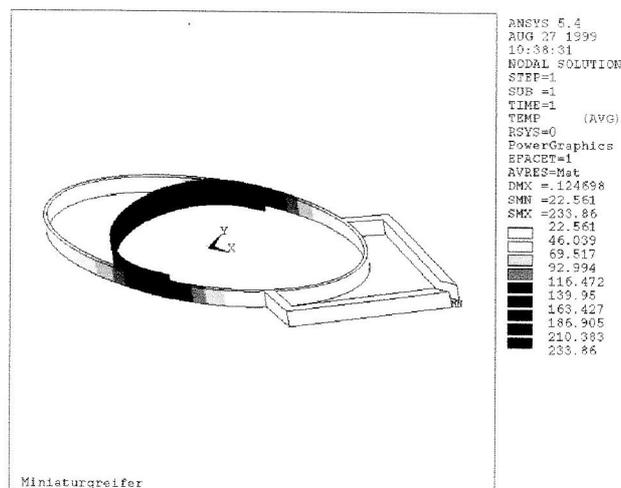


Bild 6. Temperaturverteilung (in °C) eines Mikrogreifers mit $d = 0,2$ mm; $h = 1$ mm und einem bogenförmigen Thermobimetall (TB 1577 A) mit $d_{Bog} = 0,1$ mm und $h_{Bog} = 1,5$ mm bei $P_{therm} = 10$ mW

Aufbauend auf dem Modell des Mikrogreifers mit Thermobimetall als Antriebselement wurde ein Modell eines elliptischen Rahmens mit Thermobimorph-Struktur geschaffen. Zu diesem Zweck wurde eine Hälfte des Rahmens auf seiner Innenseite mit weiteren räumlichen Festkörper-Elementen belegt, denen wahlweise die Materialeigenschaften von Kupfer bzw. Aluminium zugewiesen wurden. Diese Metalle verfügen über hohe thermische Ausdehnungskoeffizienten und werden in der Mikrotechnik häufig für metallische Schichten verwendet. Die Kopplung von metallischer Schicht und Rahmensubstrat erfolgte im Modell über die Nutzung gemeinsamer Knoten. Die Elemente der Metallschicht benutzen auf den dem Rahmen zugewandten Flächen die inneren Knotenreihen der Substratelemente. Die Krümmung von Thermobimetallen wird bei gleicher Temperatur dann maximal, wenn das Schichtdickenverhältnis der beiden Komponenten

$$\frac{s_{akt}}{s_{pass}} = \sqrt{\frac{E_{pass}}{E_{akt}}} \quad (4)$$

beträgt, G.Rau GmbH (1989). Ausgehend vom E-Modul der Kupferschicht $E_{Cu} = 125 \text{ kN/mm}^2$ bzw. bei der Verwendung von Aluminium $E_{Al} = 72 \text{ kN/mm}^2$ und den Parametern des Rahmens E_{Glas} und d konnte die jeweils günstigste Dicke der Metallschicht ermittelt werden

- bei Verwendung von Kupfer $s_{Cu} = 160 \text{ }\mu\text{m}$
- bei Verwendung von Aluminium $s_{Al} = 210 \text{ }\mu\text{m}$

Die Einleitung des Wärmestromes P_{therm} erfolgte auf der Innenseite der Rahmenstruktur, im Mittelpunkt der Oberfläche der Metallschicht (vgl. Bild 3, Punkt $(-a+d+s_{Cu}; 0)$). Der Rahmen wurde am Scheitelpunkt der Ellipse (vgl. Bild 3, Punkt $(a; 0)$) eingespannt.

In Bild 7 sind Verformung und Vergleichsspannung eines elliptischen Rahmens mit integriertem Thermobimorph grafisch dargestellt. Der Berechnung liegt eine Materialpaarung Glas/Kupfer des Thermobimorphs und ein Rahmen mit den in Kap. 2 und 3 aufgeführten Maßen zugrunde. Deutlich zu erkennen ist die erwartungsgemäß asymmetrische Verformung des Rahmens, die aber nur wenig Einfluß auf die Lage der günstigen Punkte für den Ansatz der Greiforgane (Bereich der geringsten Biegespannung – weiß) hat. Der Bereich mit der geringsten Biegespannung verschiebt sich im Vergleich zum Greifer mit Thermobimetall um ca. $200 \text{ }\mu\text{m}$ auf dem Ellipsenbogen. Die geringere Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Thermobimorphs (vgl. Thermobimetalle) führt dazu, daß geringere Verformungen und somit Greifbewegungen auftreten, die durch höhere einfallende Lichtleistungen der Laserdiode ausgeglichen werden müßten.

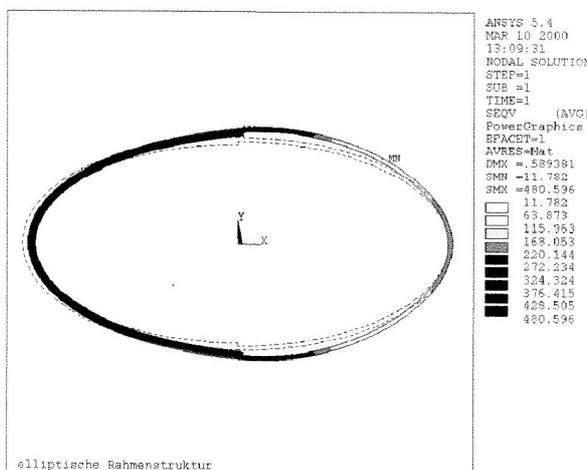


Bild 7. Verformung und Spannungen (Vergleichsspannung in N/mm^2) eines elliptischen Rahmens mit integriertem Thermobimorph (Glas/Kupfer) bei $P_{therm} = 500 \text{ mW}$

4 Experimente und Ergebnisse

Für weitere Untersuchungen wurden unter schrittweiser Veränderung der Gestalt andere Greifer entworfen. So wurden unter anderem offene Rahmen, die nur aus einer Ellipsenhälfte bestehen, gefertigt und getestet. Diese Rahmen wurden durch Verkleben mit ellipsenförmig gebogenen Thermobimetallen zur geschlossenen Rahmenstruktur vervollständigt und stellen somit eine Annäherung an Rahmen mit integrierten Thermobimorph dar. Es wurden zu Testzwecken mehrere Wafer gefertigt. Die dabei hergestellten Standardstrukturen – geschlossener, ellipsenförmiger Rahmen – besitzen eine Rahmendicke $d = 180 \text{ }\mu\text{m}$. Später wurden einige dieser Greifer in

Flußsäurelösung isotrop nachgeätzt, um die Rahmendicke und damit die Struktursteifigkeit zu verringern. Die Rahmendicke, die dabei erhalten wurde, beträgt $d = 110 \mu\text{m}$.

Als Antriebselemente wurden halbkreisförmig gebogene Thermobimetalle des Materials TB 1577 A, mit den Maßen $d_{Bog} = 100 \mu\text{m}$; $h_{Bog} = 1,5 \text{ mm}$ und $R_{Bog} = 4,7 \text{ mm}$ mit den Rahmen verklebt.

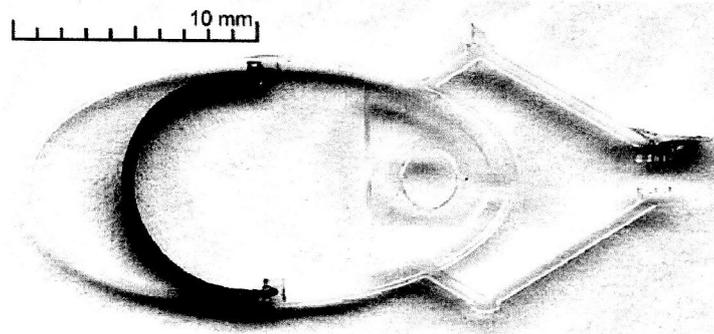


Bild 8. Mikrogreifer aus photostrukturierbarem Glas mit bogenförmigem Thermobimetall

Zur Bestimmung der Eigenschaften wurde der Greifer auf einen Träger montiert. Die Aufheizung des Bimetalls erfolgte mit einer Laserdiode HPD 1305 ($\lambda = 670 \text{ nm}$; $P_{\text{Licht max}} = 500 \text{ mW}$). Der Laserstrahl wurde mittels eines Objektivs ($f = 5 \text{ mm}$) fokussiert und ohne die Verwendung einer Glasfaser direkt durch die Luft zum Greifer geleitet. In der Ellipsenfläche des Greifers wurde ein Dachkantenprisma positioniert, so daß der in Längsrichtung, ellipsenseitig einfallende Strahl um 180° abgelenkt und nach unten versetzt wurde, um auf der Innenseite des Bimetallbogens im Scheitelpunkt des Bogens einzufallen.

Der Diodenstrom wurde geregelt und kann anhand der Diodenkennlinie der entsprechenden Lichtleistung zugeordnet werden. Die Auslenkung eines der Greiforgane wurde mit einem Lasermesssystem (Trinagulationsverfahren) bestimmt. Durch die Aufnahme der Meßwerte mittels PC und Meßkarte konnte neben der Auslenkung der Greiforgane in Abhängigkeit von verschiedenen Lichtleistungen auch der Weg-Zeit-Verlauf der Auslenkung bei sprunghaftem Leistungsanstieg (Sprungantwort) ermittelt werden.

Die Greifweg-Lichtleistungs-Kennlinien für zwei der getesteten Greifer mit geschlossenem, ellipsenförmigem Rahmen, die sich nur durch die Rahmendicke unterscheiden, sind in Bild 9 dargestellt. Die Kennlinien wurden bis zu einer Leistung von $P_{\text{Licht}} = 365 \text{ mW}$ aufgenommen, was einem Diodenstrom von 800 mA entspricht. Die erhaltenen Greifwege für die geschlossene, ellipsenförmige Rahmenstruktur sind in Tabelle 1 für die Ausgangsstruktur und die nachgeätzte Struktur mit verminderter Rahmendicke aufgeführt.

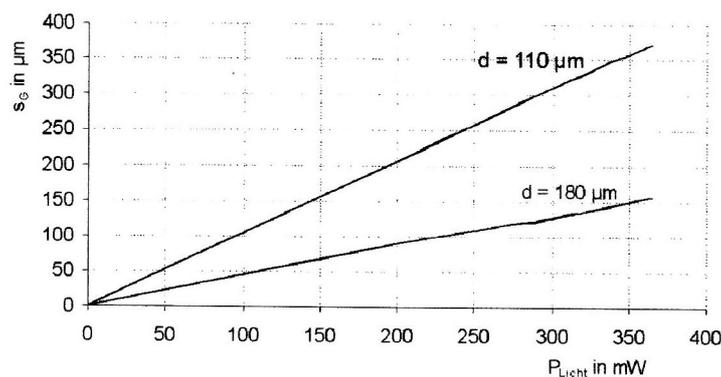


Bild 9. Experimentell bestimmte Funktion des Greifweges in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung der Laserdiode mit der Rahmendicke d als Parameter

Tabelle 1 enthält, ausgehend von den gemessenen Greifwegen für $P_{\text{Licht}} = 365 \text{ mW}$, die für die maximale Ausgangsleistung der Laserdiode $P_{\text{Licht max}} = 500 \text{ mW}$ und unter der Annahme weiterer Linearität berechneten Greifwege der Mikrogreifer. Es zeigt sich, daß der maximal mögliche Greifweg von $500 \mu\text{m}$ bei maximaler Ausgangsleistung der Laserdiode erreicht werden kann. Dies muß jedoch erst durch weitere Versuche mit einem stärkerem Stromregler nachgewiesen werden.

	$P_{Licht} = 365 \text{ mW}$ (gemessen)	$P_{Licht} = 500 \text{ mW}$ (interpoliert)
$d = 180 \text{ }\mu\text{m}$	$s_G = 157 \text{ }\mu\text{m}$	$s_G = 215 \text{ }\mu\text{m}$
$d = 110 \text{ }\mu\text{m}$	$s_G = 375 \text{ }\mu\text{m}$	$s_G = 511 \text{ }\mu\text{m}$

Tabelle 1. Greifwege für Greifer mit geschlossener Rahmenstruktur und unterschiedlicher Rahmendicke

Vergleicht man die experimentell bestimmten Greifwege mit den Ergebnissen der ANSYS-Rechnungen kann der Wirkungsgrad der Licht-Wärme-Umwandlung an der Bimetalloberfläche berechnet werden. Für die Mikrogreifer wurde ein Wirkungsgrad von $\eta_{Licht-Wärme} \approx 20 \%$ errechnet (siehe Kap.3). Dieser verbesserte Wert ist damit zu erklären, daß neben einer besseren Oberflächenschwärzung des Bimetalls die Diode so justiert wurde, daß der Laserstrahl asymmetrisch, zum Scheitelpunkt des Bogens versetzt, auf der Innenseite des Bogens einfällt. Wird der Laserstrahl vom Bimetal reflektiert, trifft er nach der ersten Reflektion durch die Hohlspiegelwirkung des Bogens erneut auf den Bimetal auf. Dabei wird wiederum ein Teil des Lichtes absorbiert und in Wärme umgewandelt.

5 Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zur Bestimmung der Eigenschaften des Mikrogreifers sind vor allem als Nachweis der Funktion des Greifers zu werten. Der erreichte Greifweg soll durch Optimierung des Greifers, z.B. Verbesserung des Licht-Wärme-Umwandlungsgrades durch andere Beschichtungsmaterialien, Arbeiten mit höherer Laserleistung und Suche nach effektiveren Thermobimetallen, vergrößert werden. Außerdem wird versucht, mittels einer Wärmekamera die Temperaturverteilung des Bimetalls zu messen, um weitere Vergleiche zu den theoretischen Berechnungen anstellen zu können.

Parallel dazu wird an der Fertigung eines Greifers mit integriertem Thermobimorph gearbeitet, der der eigentlichen Zielstellung, Schaffung eines monolithisch aufgebauten Miniaturgreifers, entspricht. Dabei werden die gewonnenen Erfahrungen bezüglich der Berechnung und Handhabung sowie der Optimierung antriebspezifischer Parameter einfließen.

Literatur

1. Bellouard, Y.; Clavel, R.; Gotthardt, R.; Sidler, T.; Bidaux, J.-E.: A new concept of Monolithic Shape Memory Alloy Micro-Devices Used in Micro-Robotics. Actuators 1998, Bremen, 17.-19. Juni 1998, 499-502.
2. Benz, M.; Fatikow, S.; Großmann, B.: Mikrorobotik für die Mikrosystemtechnik. Teltow: VDI/VDE, (Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Bd. 29), (1995).
3. Bögelsack, G.: Nachgiebige Mechanismen in miniaturisierten Bewegungssystemen. Proceedings of the 9th World Congress IFToMM, Milano, 29. August-2. September 1995, 3101-3104.
4. Fujimasa, I.: Micromachines – A New Era in Mechanical Engineering. New York: Oxford University Press, (1999).
5. Goldfarb, M.; Celanovic N.: A Flexure-Based Gripper for Small-Scale Manipulation. Robotica, Vol. 17, No. 2, (1999), 181-188.
6. G.Rau GmbH: Thermobimetalle – Grundlagen, Berechnung, Gestaltung, Auswahl. 1989. - Firmenschrift.
7. Greitmann, G.; Buser, R. A.: Tactile microgripper for automated handling of microparts. In: Sensors and Actuators, Vol. A53, (1996), 410-415.
8. Harnisch, A.: Beitrag zur Entwicklung von Herstellungstechnologien für komplexe Bauteile aus mikrostrukturiertem Glas. Ilmenau, Technische Universität, Fakultät für Maschinenbau, Dissertationsschrift, (1998).

9. Henschke, F.: Miniaturgreifer und montagegerechtes Konstruieren in der Mikromechanik. Düsseldorf: VDI-Verlag, (1994).
10. Hesselbach, J.; Pittschellis, R.: Miniaturgreifer für die Mikromontage. 41. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. 23.-26. September 1996, Ilmenau, Tagungsband.
11. Klocke-Nanotechnik: Micro Gripper. www, 1999-11-18, 18.08 Uhr.
(http://www.klocke-nanotechnik.de/s_standard/microgrip.htm).
12. Lee, A.; Northrup, M. A.; Krulevitch, P.: Microtools for better Health. www, 18. Juli 1997, 01:57 Uhr.
(<http://www.llnl.gov/str/Mariella.html>).
13. Lerch, Ph.; Kara Slimane, C.; Romanowicz, B.; Renaud, Ph.: Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuators. Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 6, (1996), 134-137.
14. Rashidian, B.; Allen, M. G.: Elektrothermal Microactuators Based On Dielectric Loss Heating. 1993 IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Fort Lauderdale, 7.-10. Februar 1993.
15. Salim, R.: Gestaltung und mikrotechnische Realisierung von Mikrogreifern. Ilmenau, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Dissertation, (1998).
16. Sturm, H.: Aktoren aus mikrostrukturiertem Silizium für pneumatische und hydraulische Anwendungen: Abschlußbericht, Verbundprojekt 1989-1991. Teltow: VDI/VDE, (1999).
17. Zimmermann, K., Petkun, S.: Modellierung und Simulation der Verformung stoffkohärenter nachgiebiger Mechanismen (Compliant Mechanisms). Technische Mechanik, Band 15, Heft 4, (1995), 295-302.
18. Zöppig, V.: Untersuchungen zur Entwicklung von Miniaturgreifern für die industrielle Mikromontage. Ilmenau, Technische Universität, Fak. für Maschinenbau, Dissertation, (1998).

Die dargestellten Untersuchungen erfolgten im Rahmen des Innovationskollegs "Bewegungssysteme" (Sprecher Prof. Dr. Blickhahn), gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Anschrift: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Zimmermann, Dipl.-Ing. Roman Preuß, Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, PSF 100565, D-98684 Ilmenau, Tel.: ++49 3677 691814, Fax: ++493677691823.

e-mail: klaus.zimmermann@maschinenbau.tu-ilmenau.de, roman.preuss@maschinenbau.tu-ilmenau.de