

Antrieb von Aktoren durch piezoelektrische Dünnschichten

Th.Fabula, 2/93

Piezoelektrische Dünnschicht-Materialien

Für die Abschätzung der Leistungsfähigkeit des piezoelektrischen Antriebs werden die Materialien Aluminiumnitrid (AlN), Zinkoxid (ZnO) und PZT-Keramiken (PZT) zugrunde gelegt, die auch als Dünnschichten hergestellt werden können. Da die Materialdaten stark von der Art des Herstellungsprozesses und der Prozeßparameter abhängig sind, fehlen für dünne Schichten meist genaue Materialangaben. Für die folgenden Abschätzungen beziehen sich die Materialdaten, soweit nicht anders angegeben auf Bulk-Material ([Fra88], [Lan82], [Sie81]). Hinzu kommt, daß die Materialeigenschaften schichtdickenabhängig und die abgeschiedenen Schichten innere mechanische Spannungen aufweisen. In der Literatur schwanken die Angaben beispielsweise für ZnO im Vergleich zu den Bulk-Daten bei den Elastizitätsmodulen um ca. $\pm 20\%$, die Schichtspannungen bewegen sich im Bereich bis einige hundert MPa (Zug- und Druckspannung), die Abweichung bei den Dielektrizitätskonstanten (Permittivitäten) beträgt $\Delta\epsilon_r \approx 10\%$, die piezoelektrischen Koeffizienten d_{ij} variieren um etwa 15-20%.

Piezoelektrische Kopplungsfaktoren

Ein Maß für die Effizienz des piezoelektrischen Antriebs ist der elektromechanische Kopplungsfaktor k . Er erlaubt eine Aussage über die Möglichkeit der Umwandlung von mechanische E_{mech} in elektrische Energie E_{elek} eines Materials: $k^2 = E_{\text{mech}} / E_{\text{elek}}$. Dieser Kopplungsfaktor ist sowohl von den Materialeigenschaften, als auch von der Geometrie des Wandlers abhängig, sodaß sich ein effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor $k_{\text{eff}} = k_{\text{mat}} \cdot k_{\text{geo}}$ ergibt.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Materialeigenschaften verschiedener Piezoelektrika und erlaubt eine Abschätzung der theoretisch zu erwartenden materialabhängigen elektromechanischen Kopplungsfaktoren k_{mat} . Aufgeführt sind die beiden Kopplungsfaktoren k_{31} bzw. k_p für einen reinen Transversal- bzw. Planarwandler [VIB]. In Abhängigkeit der unterschiedlichen mechanischen Steifigkeiten (E-Modul: $E = 1 / S_{11}$), der

piezo- und dielektrischen Eigenschaften ergeben sich für Aluminiumnitrid, Zinkoxid bzw. PZT-

Keramik (VIBRIT420) unterschiedlich große Kopplungsfaktoren in der Größenordnung von etwa 18%, 40% und 60%. Ein Vergleich der beiden Kopplungsfaktoren k_{31} und k_p zeigt, daß der Unterschied bis zu einem Faktor 2 betragen kann. Betrachtet man zusätzlich die Schwankungen der einzelnen Materialdaten bei ZnO wie oben angegeben, so kann die Gesamtabweichung $(\Delta k_{31}/k_{31})^2 = (\Delta d_{31}/d_{31})^2 + (\Delta S_{11}/2S_{11})^2 + (\Delta \epsilon_r/2\epsilon)^2 \approx 25\%$ betragen, d.h. $k_{31} = 0,21 + 25\%$. Dies führt auf einen erhöhten Kopplungsfaktor von $k_{p_{\text{mat}}}^p \approx 50\%$. Der Einfluß der Aktorgeometrie auf den Kopplungsfaktor (d.h. k_{geo}) kann mit Hilfe numerischer Finite-Elemente Berechnungen unter Berücksichtigung der mechanischen und elektrischen Randbedingungen ermittelt werden.

Analytische Abschätzungen der erreichbaren Hübe und Kräfte

Bei der analytischen Abschätzung soll von einem einseitig eingespannten Silizium-Biegebalken ausgegangen werden, der von einer piezoelektrischen Dünnschicht bedeckt ist. In der Literatur (siehe [Smi91a], [Smi91b]) ist der Zusammenhang zwischen den externen Parametern (Drehmoment: M , Kraft: F , Druck: p und Spannung: U , siehe Abb. 1) und den internen Parametern (Ablenkungswinkel: α , Auslenkung: δ , Verschiebungsvolumen: V und Ladung: Q , siehe Abb. 2) aus den piezoelektrischen Zustandsgleichungen abgeleitet.

Abb. 1: Externe Parameter M , F , p , U

Abb. 2: Interne Parameter α , δ , V , Q

Die symmetrische Übertragungsmatrix e_{ij} beschreibt den Biegezustand des Balkens bei unterschiedlichen mechanischen und elektrischen Belastungen:

Die vollständigen Beziehungen lauten:

mit den Abkürzungen A, B, K:

wobei:

- L, w : Länge, Breite des Biegebalkens [m]
- h_{Si} : Substratdicke (hier Silizium) [m]
- h_p : Dicke der Piezoschicht [m]
- S_{11}^{Si} : Steifigkeitskoeffizient des Substrats [m^2/N]
- S_{11}^p : Steifigkeitskoeffizient der Piezoschicht [m^2/N]
- d_{31} : transversaler piezoelektrischer Koeffizient [C/N]
- ϵ_{33} : Dielektrizitätskonstante in E-Feldrichtung [As/Vm]

Die maximale Auslenkung δ beträgt am Balkenende bei Anlegen einer Spannung U an die

$$\delta = e_{24} U = \frac{3 d_{31} A B L^2}{K U}$$

piezoelektrische Schicht:

Die maximal erreichbare Kraft, die der Bimorph-Balken ausüben kann, läßt sich durch die Federsteifigkeit e_{22}^{-1} ausdrücken:

$$F \sim \frac{1}{(e_{22})^3} \delta \sim \frac{1}{(e_{22})^3} \cdot e_{24} \cdot U$$

Der vollständige Zusammenhang ergibt sich zu:

$$F \sim \frac{3}{4} \frac{d_{31} w B}{L} \cdot U$$

In den obigen Ausdrücken gewichten die Konstanten A [m/Pa^3], B [mPa] und K [m^4/Pa^2] die Steifigkeiten mit den entsprechenden Schichtdicken. Der Zusammenhang zwischen der Auslenkung δ bzw. ausübbarer Kraft F und der angelegten elektrischen Spannung U ist linear. Die Abhängigkeit von der Balkenlänge L ist bei der Auslenkung quadratisch, bei der Kraft umgekehrt proportional. Nachfolgend soll der Einfluß der Wandlergeometrie untersucht werden. Variiert wurden die Balkenlänge L , die Substratdicke h_{Si} und die Piezoschichtdicke h_{p} . Die Steifigkeitskoeffizienten vom Silizium-Substrat S_{11}^{Si} und der Piezoschicht S_{11}^{p} , sowie der transversale piezoelektrische Koeffizient d_{31} für ZnO wurden der Tabelle 1 entnommen. Tabelle 2 enthält die Proportionalitätskonstanten e_{24} zwischen der Auslenkung und der angelegten Spannung U . Die Balkenbreite w beträgt bei den Abschätzungen $50 \mu\text{m}$:

Tabelle 2: Auslenkungs-Konstanten e_{24} für einen Silizium-Balken mit ZnO-Schicht

h_{Si}	h_{p}	$L = 1 \text{ mm}$	2 mm	5 mm
$10 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$0,12 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,47 \mu\text{m}/\text{V}$	$2,95 \mu\text{m}/\text{V}$
	$5 \mu\text{m}$	$0,06 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,26 \mu\text{m}/\text{V}$	$1,60 \mu\text{m}/\text{V}$
$20 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$0,03 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,13 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,82 \mu\text{m}/\text{V}$
	$5 \mu\text{m}$	$0,02 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,09 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,57 \mu\text{m}/\text{V}$
$30 \mu\text{m}$	$1 \mu\text{m}$	$0,02 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,06 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,38 \mu\text{m}/\text{V}$
	$5 \mu\text{m}$	$0,01 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,05 \mu\text{m}/\text{V}$	$0,29 \mu\text{m}/\text{V}$

Ein Vergleich mit FEM-Rechnungen zeigt, daß die analytischen Ergebnisse bei den beiden Extremfällen (fett gedruckt) bis auf etwa 10 % übereinstimmen und damit für erste Abschätzungen herangezogen werden können. In Tabelle 3 sind die Proportionalitätskonstanten e_{24}/e_{22} zwischen der Kraft F und der angelegten Spannung U aufgelistet.

Tabelle 3: Kraft-Konstanten e_{24}/e_{22} für einen Silizium-Balken mit ZnO-Schicht

h_{Si}	h_p	$L = 1 \text{ mm}$	2 mm	5 mm
10 μm	1 μm	2,43 $\mu\text{N/V}$	1,22 $\mu\text{N/V}$	0,49 $\mu\text{N/V}$
	5 μm	2,45 $\mu\text{N/V}$	1,23 $\mu\text{N/V}$	0,49 $\mu\text{N/V}$
20 μm	1 μm	4,86 $\mu\text{N/V}$	2,43 $\mu\text{N/V}$	0,97 $\mu\text{N/V}$
	5 μm	4,88 $\mu\text{N/V}$	2,44 $\mu\text{N/V}$	0,98 $\mu\text{N/V}$
30 μm	1 μm	7,29 $\mu\text{N/V}$	3,64 $\mu\text{N/V}$	1,46 $\mu\text{N/V}$
	5 μm	7,31 $\mu\text{N/V}$	3,66 $\mu\text{N/V}$	1,46 $\mu\text{N/V}$

Legt man eine typische Feldstärke von $E = 10 \text{ V}/\mu\text{m}$ bei ZnO zugrunde, so ergibt sich eine erreichbare Auslenkung von $10 \text{ V} * 2,95 \mu\text{m/V} = 29,5 \mu\text{m}$ bei den Balkenabmessungen $L = 5 \text{ mm}$, $h_{Si} = 10 \mu\text{m}$ und $h_p = 1 \mu\text{m}$ (Variante 1). Die maximal ausübhbare Kraft beträgt $50 \text{ V} * 7,31 \mu\text{N/V} = 366 \mu\text{N} \approx 0,4 \text{ mN}$ für einen Balken mit den Abmessungen $L = 1 \text{ mm}$, $h_{Si} = 30 \mu\text{m}$ und $h_p = 5 \mu\text{m}$ (Variante 2).

Je länger der Balken ist, desto größer werden die Auslenkungen, während die ausübhbaren Kräfte geringer werden. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, hat die Piezoschichtdicke h_p kaum einen Einfluß auf die Kräfte, lediglich die Balkendicke h_{Si} . Die Kraftwirkung läßt sich weiter steigern, wenn die Balkenbreite w vergrößert wird: $F \sim d_{31} w h_{Si} / L$. Im Gegensatz zu den Kräften geht bei den Auslenkungen die effektive Gesamtdicke des Balkens $h_{eff} = f(h_{Si}, h_p)$ quadratisch im Nenner ein: $\delta \sim d_{31} w (L/h_{eff})^2$. In der Tabelle 4 sind die beiden Extremfälle (Variante 1: langer Balken und Variante 2: kurzer Balken) analytisch mit den Materialien AlN und PZT (siehe Materialdaten aus Tabelle 1)

berechnet worden. Während die Steifigkeiten S_{11} von AlN, ZnO und PZT nicht stark differieren (Verhältnis: 1,0 / 2,24 / 4,36), unterscheiden sich die piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} sehr stark (Verhältnis: 1,0 / 2,6 / 80). Die elektrische Feldstärke E betrug jeweils 10 V pro μm Schichtdicke.

Tabelle 4: Einfluß des Schichtsystems auf die Auslenkungen und Kräfte

Größe:	AlN	ZnO	PZT	Verhältnis	Dimension
$\delta_{\max} [\mu\text{m}]$	19,1	29,5	548	1/1,5/29	Variante 1 $U = 10 \text{ V}$
$F_{\max} [\mu\text{N}]$	3,8	4,9	81,7	1/1,3/22	
$\delta_{\max} [\mu\text{m}]$	0,34	1,0	11,5	1/2,9/34	Variante 2 $U = 50 \text{ V}$
$F_{\max} [\mu\text{N}]$	273	366	6500	1/1,3/24	

Aufgrund des hohen piezoelektrischen transversalen Koeffizienten d_{31} bietet PZT die größten möglichen Auslenkungen (ca. 0,5 mm) und Kräfte (ca. 6,5 mN). In der 5. Spalte der Tabelle sind die Verhältnisse der bei gleicher Geometrie und Spannung erreichbaren Auslenkungen und Kräfte dargestellt.

Nichtlineares Großsignalverhalten

Sowohl die analytischen Abschätzungen, als auch die numerischen FEM-Berechnungen gehen von einem linearen piezoelektrischen Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und den mechanischen Reaktionen des Systems aus. Bei hohen Feldstärken können aber nichtlineare Effekte auftreten, sog. Elektrostriktion:

$$\epsilon_i = d_{ij}E_j + d_{ijk}E_jE_k + \dots$$

Aus der Literatur [Smig2a] ist bekannt, daß für einen $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZnO}$ -Bimorph die Auslenkungen eine sowohl lineare, als auch quadratische Abhängigkeit von der

elektrischen Spannung haben können. Empirisch ermittelt ergibt sich eine etwa 2,5-fach größere Abhängigkeit vom quadratischen Spannungsanteil: $\delta \sim (U + 2,5 \cdot U^2)$.

Finite-Elemente Berechnungen

Mit Hilfe piezoelektrischer FEM-Berechnungen wurde der Einfluß des Schichtdickenverhältnisses von Siliziumstruktur zu Dünnschicht untersucht. Berechnet wurde für Bimorphmembranen der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} , der sich durch die Serien- f_s und Parallelresonanzfrequenz f_p des piezoelektrischen Ersatzschaltbildes ausdrücken läßt:

$$k_{\text{eff}}^2 \approx \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \approx 2 \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right)$$

Ziel der Schichtdickenoptimierung ist ein möglichst hoher elektromechanischer Kopplungsfaktor zwecks maximaler Bauteilhübe und Stellkräfte. Das verwendete dreidimensionale FE-Modell einer Viertelmembran berücksichtigt die anisotropen Materialeigenschaften der ZnO-Dünnschicht und die kristallbedingte (111)-Einspannung der Siliziummembran. Die Abmessungen der Membran betragen $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$, die Membrandicke beträgt $20 \text{ }\mu\text{m}$. Das FE-Modell weist eine durchgehende, unstrukturierte ZnO-Beschichtung auf. Es wurden die Materialeigenschaften von Bulkmaterial verwendet und eine evtl. Verspannung der Zinkoxidschicht nicht berücksichtigt. In Abb. 3 ist der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} für den Grundmode für verschiedene piezoelektrische Schichten in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses $t_{\text{Si}}/t_{\text{piezo}}$ dargestellt. In Tabelle 5 sind die für für verschiedenen Materialien berechneten, jeweils optimalen Schichtdicken t_{piezo} , die Resonanzfrequenzen f_s und f_p , sowie die daraus abgeleiteten maximalen effektiven Kopplungsfaktoren k_{eff} aufgelistet.

Tabelle 5: Vergleich der Materialien AlN, ZnO und PZT. Abhängigkeit des effektiven Kopplungsfaktors k_{eff} vom Schichtdickenverhältnis:

Material:	$t_{\text{Si}}/t_{\text{piezo}}$	t_{opt}	$f_s \text{ [kHz]}$	$f_p \text{ [kHz]}$	k_{eff}
AlN	3,3 - 4	$5\text{-}6 \text{ }\mu\text{m}$	4,58	4,60	0,09
ZnO	2 - 2,5	$9 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$	4,05	4,15	0,22
PZT	1,2 - 1,5	$15 \pm 2 \text{ }\mu\text{m}$	3,35	3,63	0,39

Im Gegensatz zu den rein materialabhängigen Kopplungsfaktoren k_{mat} der Tabelle 1 enthalten die effektiven Kopplungsfaktoren k_{eff} zusätzlich den Geometrieanteil für eine quadratische Membran. In den Zusammenhang zwischen den Auslenkungen bzw. Kräften und der elektrischen Spannung geht direkt der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor ein [VIB]:

$$\delta \sim k_{\text{eff}} U \quad \text{und} \quad F \sim k_{\text{eff}} U$$

Ein weiterer Einfluß auf die Effizienz kann die Art der Ansteuerung des Wandlers haben. Es ist daher sicherzustellen, daß die piezoelektrische Dünnschicht strukturiert wird, um im Bereich von Zugspannungen (bzw. Druckspannungen) auf der Bauteiloberfläche nur Dehnungen (bzw. Kontraktionen) zu erzeugen.

Optimierung des piezoelektrischen Antriebs

Das piezoelektrische Wandlungsprinzip eignet sich gut für den Antrieb von Aktoren. Durch die geeignete Wahl der Strukturgeometrie (Balken, Membran, BOSS-Membran), der Schichtdickenverhältnisse und der Elektroden- und Schichtstrukturierung kann der Geometrieanteil des Kopplungsfaktors k_{geo} vergrößert werden. Die Optimierung der Materialeigenschaften ist nur in einem durch die Prozeßtechnologie vorgegebenem engen Bereich möglich. Eine Optimierung kann erfolgen:

- durch eine geeignete Wahl des Substrates (Silizium, Si_3N_4) und der piezoelektrischen Schicht (AlN, ZnO, PZT) kann der materialabhängige Anteil k_{mat} verbessert werden.
- das Verhältnis der Steifigkeiten des Substrates und der Schicht $E_{\text{Sub}} / E_{\text{piezo}}$ sollte im Rahmen der technologischen Möglichkeiten so groß wie möglich gewählt werden
- durch eine geeignete Strukturierung der piezoelektrischen Schicht und bipolarer elektrischer Anregung kann eine etwa doppelte Auslenkung erreicht werden.
- bei Anwendungen, die einen resonanten Betrieb des Aktors zulassen, erhöht sich die dynamische Amplitude A_{dynam} um etwa die Schwingungsgüte Q . Diese beträgt

bei Biegebalken ca. 500-1000 bei unstrukturierten Membranen etwa 50-100 (bei Normalluftdruck).

-bei hohen Feldstärken, kann aufgrund der Elektrostriktion etwa mit einem zusätzlichen quadratischen Spannungsbeitrag gerechnet werden (ca. Faktor 2).

- durch Vergrößerung des Verhältnisses von Wandlerbreite zu Balkenlänge w/L kann etwa eine Größenordnung bei der Kraftwirkung erzielt werden. Die Auslenkungen sind in erster Näherung unabhängig von der Wandlerbreite.
- durch prozeßtechnisch bedingte Einflüsse kann der piezoelektrische Koeffizient d_{31} um etwa 20-50% gesteigert werden.

Allerdings ist zu beachten, daß bei praktischen Anwendungen die piezoelektrischen Dünnschichten in der Regel innere Spannungen aufweisen können und auch Hystereseeffekte [Smig2b] auftreten können.

Literaturverzeichnis:

- [Fra88]: Franz, J.: Piezoelektrische Sensoren auf Siliziumbasis für akustische Anwendungen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr.: 87, VDI Verlag, Düsseldorf (1988)
- [Lan82]: Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik, Gruppe III, Band 17a, Berlin, Springer Verlag (1982)
- [Sie81]: VIBRIT - Piezokeramik von Siemens, Datenblatt, Stand: Januar 1981, Redwitz
- [Smig1a]: Smits, J.G., Dalke, S.I., Cooney, T.K., The constituent equations of piezoelectric bimorphs, Sensors & Actuators A, 28 (1991) p. 41-61
- [Smig1b]: Smits, J.G., Choi, W., The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs, IEEE Transactions on UFFC, Vol. 38, No. 3 (1991), p.256
- [Smig2a]: Smits, J.G., Choi, W., Very large deflection with quadratic voltage dependence of ZnO on Si₃N₄ bimorph, IEEE Transactions on UFFC, Letters, Vol. 39, No. 2 (1992) p. 302
- [Smig2b]: Smits, J.G., Design consideration of a piezoelectric-on-silicon microrobot, Sensors & Actuators A, 35 (1992) p. 129-135
- [VIB]: VIBRIT - Piezoceramics from Siemens, Ord.-No.: N-281/5035-101