

Kapitel 3

Biegeverhalten von Gradientenmaterialien

In diesem Kapitel wird die Modellstruktur eines Biegeelements aus der Gradientenmaterialien vorgestellt. Danach wird die Biegetheorie für diese Modellstruktur eingeführt und das Biegeverhalten von Aktuatoren analysiert. Die Ergebnisse werden mit Resultaten der Analyse mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) und experimentellen Ergebnissen von geklebten und monolithischen Aktuatoren aus Gruppe I und II verglichen.

3.1 Verteilung des elektrischen Feldes in seriell verbundenen Ferroelektrika bei niedrigen elektrischen Spannungen

Biegeelemente werden häufig bei kleinen elektrischen Spannung unterhalb der Koerzitivfeldstärke betrieben. In diesem Abschnitt wird die Verteilung des elektrischen Feldes in seriell verbundenen Ferroelektrika bei niedriger Anregungsspannung beschrieben.

Handelt es sich um homogene Ferroelektrika, hängt die elektrische Feldstärke E nur von der angelegten Spannung U zwischen den Elektroden und der Dicke h der Probe ab.

$$E_3 = \frac{U}{h}. \quad (3.1)$$

Wie bekannt, ist die Feldstärke in jedem Punkt des Ferroelektrikums zwischen den Elektroden homogen und hängt nicht von den dielektrischen Eigenschaften des Materials ab. Das gilt nur für den Fall, dass die Dielektrizitätskonstante des Materials ist überall konstant und die Leitfähigkeit vernachlässigt werden kann ($\sigma = 0$). Wenn zwei Ferroelektrika mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten elektrisch seriell verbunden werden, dann wird sich die elektrische Feldstärke in beiden Ferroelektrika unterscheiden. Das entsprechende Ersatzschaltbild besteht aus zwei in Serie geschalteten Kondensatoren. Es leicht zu zeigen, dass die elektrische Feldstärke in jedem Ferroelektrikum nur von der Dielektrizitätskonstante und der Dicke abhängig ist. Das gilt allerdings nur für niedrige elektrische Spannungen, wo der Zusammenhang zwischen elektrischer Feldstärke

und Polarisation linear ist. In diesem Fall ist die elektrische Verschiebung im Innern des Ferroelektrikums immer konstant und gleich der Ladungsdichte auf der Elektrode.

$$D_3 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33}^{(1)} E_3^{(1)} = \varepsilon_0 \varepsilon_{33}^{(2)} E_3^{(2)}, \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_{33}^{(1)} E_3^{(1)} = \varepsilon_{33}^{(2)} E_3^{(2)}. \quad (3.3)$$

Dabei ist ε_0 die absolute Dielektrizitätskonstante und $\varepsilon_{33}^{(i)}$ die Dielektrizitätskonstante des Materials. Bezeichnen wir die Dicke der ersten Schicht als $h^{(1)}$, der zweiten als $h^{(2)}$ und die Spannungen in den Schichten als $U_3^{(1)}$ und $U_3^{(2)}$, dann ergibt sich die Gesamtspannung U_{ges} aus

$$U_{ges} = U_3^{(1)} + U_3^{(2)} = h^{(1)} E_3^{(1)} + h^{(2)} E_3^{(2)}. \quad (3.4)$$

Aus Gl. (3.3) und (3.4) ergibt sich die jeweilige Spannung in den beiden Schichten

$$\begin{aligned} E_3^{(1)} &= \varepsilon_{33}^{(2)} \frac{U_{ges}}{h^{(1)} \varepsilon_{33}^{(2)} + h^{(2)} \varepsilon_{33}^{(1)}} \\ E_3^{(2)} &= \varepsilon_{33}^{(1)} \frac{U_{ges}}{h^{(1)} \varepsilon_{33}^{(2)} + h^{(2)} \varepsilon_{33}^{(1)}}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Wenn die Dicken der beiden Schichten gleich sind $h^{(1)} = h^{(2)} = h/2$ (h ist die Gesamtdicke), lässt sich Gl. (3.5) umformen zu

$$E_3^{(1)} = \frac{U_{ges}}{h} \frac{2\varepsilon_{33}^{(2)}}{\varepsilon_{33}^{(2)} + \varepsilon_{33}^{(1)}} = E_3 \frac{2}{\varepsilon_{33}^{(1)} \left(\frac{1}{\varepsilon_{33}^{(1)}} + \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(2)}} \right)}. \quad (3.6)$$

$$E_3^{(2)} = \frac{U_{ges}}{h} \frac{2\varepsilon_{33}^{(1)}}{\varepsilon_{33}^{(2)} + \varepsilon_{33}^{(1)}} = E_3 \frac{2}{\varepsilon_{33}^{(2)} \left(\frac{1}{\varepsilon_{33}^{(1)}} + \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(2)}} \right)}. \quad (3.7)$$

Wie man sieht, ist die Feldstärke in jeder Schicht abhängig vom Verhältnis zwischen den Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon_{33}^{(1)}$ und $\varepsilon_{33}^{(2)}$. In der Schicht mit höheren Dielektrizitätskonstante wird die Feldstärke niedriger und umgekehrt, in der Schicht mit kleiner Dielektrizitätskonstante wird die Feldstärke größer. Für einen Kondensator aus N Schichten, wird das Feld in jeder Schicht durch folgende Gleichung beschrieben

$$E_3^{(i)} = \frac{U_{ges}}{h \varepsilon_{33}^{(i)} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(i)}}} = \frac{E_3}{\varepsilon_{33}^{(i)} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(i)}}}. \quad (3.8)$$

3.2 Biegeaktuatoren mit Mehrschichtstruktur

3.2.1 Beschreibung der Modellstruktur

Klassische piezoelektrische Biegeelemente bestehen aus zwei oder mehr zusammen geklebten Schichten mit verschiedener dielektrischen, piezoelektrischen und elastischen Eigenschaften. Wird ein elektrisches Feld an einen solchen Aktuator angelegt, dann werden sich die oberen(unteren) Schichten verkürzen und die unteren(oberen) sich verlängern und der Aktuator wird sich biegen. Der Unterschied zwischen der Position des freien Endes eines einseitig fixierten Aktuators vor und beim Anlegen des Feldes wird durch die Auslenkung δ beschrieben.

Während der Biegung wird die mechanische Spannung \mathbf{T} im Aktuator stark ansteigen, weil sich eine Seite jeder Schicht verlängert und sich die andere Seite gleichzeitig verkürzt. In jedem Biegeaktuator existiert eine Ebene, die sich nicht verlängert oder verkürzt, wenn der Aktuator gekrümmt ist. Das Flächenträgheitsmoment dieser Ebene ist bei der Biegung gleich null und die Ebene selbst wird als **neutrale Achse** bezeichnet.

Im Unterschied zu konventionellen Biegeelementen sind die in dieser Arbeit untersuchten keramischen Aktuatoren mit einem Funktionsgradienten monolithisch und die Bereiche mit konstanten Eigenschaften können nicht deutlich voneinander unterschieden werden. Um das Biegeverhalten von monolithische Aktuatoren zu modellieren, wird das Biegeelement in erster Näherung als Mehrschichtstruktur mit N Schichten angenommen, wobei die Materialeigenschaften in jeder dieser Schichten konstant sind. Die

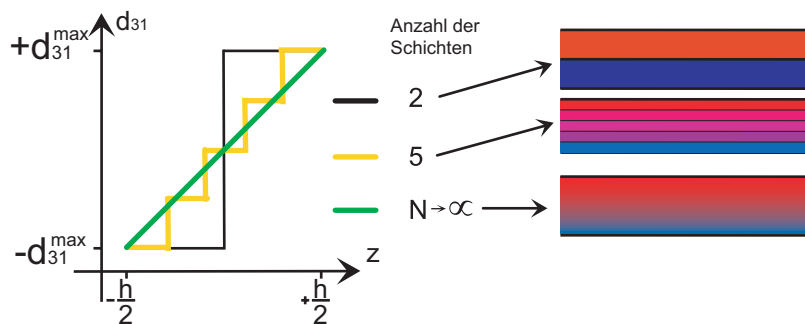


Abbildung 3.1: Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} für Aktuatoren aus 2 bzw. 5 Schichten und aus Gradientenmaterialien.

Schichten werden von unten nach oben gezählt, die unterste Schicht hat die Nummer 1, die oberste Schicht die Nummer N . Das Koordinatensystem sind so gewählt, dass die x -Achse in Längsrichtung und die z -Achse in Dickenrichtung der Probe zeigt. Die Abmessungen jeder Schicht sind konstant. Die Gesamtdicke ist h , die Dicke der i -ten Schicht ist $h^{(i)} = h/N$, Länge und Breite sind mit L bzw. w bezeichnet. Die Randbedingung für das Modell der Biegung einer solchen Struktur ist, dass die Länge viel größer als die Breite und die Breite viel größer als die Gesamtdicke ist, d. h. $L \gg w \gg h$ (s. Abb. 3.2). Die Bedingung $L \gg w$ erlaubt es außerdem, den Einfluss der Querbiegung

δ_y auf die Auslenkung δ zu vernachlässigen. Es wird angenommen, dass die obere und

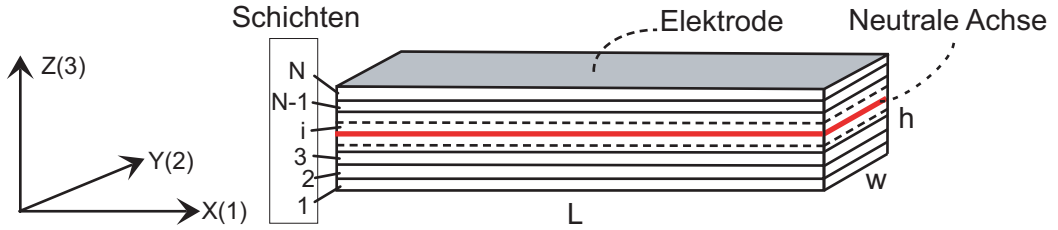


Abbildung 3.2: Modellstruktur eines piezoelektrischen Biegeaktuators

untere Schicht komplett und in einander entgegengesetzter Richtung gepolt sind. Die Polungsrichtung wird dabei durch ein unterschiedliches Vorzeichen gekennzeichnet. Dieses ist im Verhältnis zum angelegten elektrischen Feld zu sehen. Ist der piezoelektrische Koeffizient d_{31} negativ, so ist die Schicht in Richtung des angelegten Feldes gepolt. Ist das Vorzeichen positiv, so ist das angelegte Feld entgegengesetzt zur Polungsrichtung. Die inneren Schichten sind nur teilweise gepolt. Der Unterschied der piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} zwischen benachbarten Schichten ist konstant. Der piezoelektrische Koeffizient der i -ten Schicht ist demzufolge

$$d_{31}^{(i)} = d_{31}^{max} \left(\frac{2(i-1)}{N-1} - 1 \right). \quad (3.9)$$

3.2.2 Grundlagen der Biegetheorie

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Biegetheorie beruht auf der Theorie für piezoelektrische Biegeelemente von Michael A. Marcus [25]. Wird an einen Aktuator, wie er im vorherigen beschrieben wurde, ein elektrisches Feld in Richtung der Dicke (z -Achse) angelegt, so wird auf Grund der inhomogenen Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} eine Biegung des Aktuators erzeugt. Diese Biegung erfolgt relativ zur neutralen Achse (s. Abb. 3.3). Dabei ist n eine Zahl zwischen 0 und 1 und bezeichnet den Anteil (in Prozent) des Aktuators über der neutralen Achse. Die Position der neutralen Achse kann aus der Gleichgewichtsbedingung für die mechanischen Trägheitsmomente oberhalb und unterhalb der Achse bestimmt werden. Für Balken mit einem großen Verhältnis von Länge und Dicke wird der Biegeradius konstant und die neutrale Achse kann durch die folgende Gleichung gefunden werden

$$\frac{1}{R} \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} Y_p(z) z dz = 0. \quad (3.10)$$

wo R der Biegeradius und $Y_p(z)$ der Elastizitätsmodul oder Youngsche Modul sind. Letzterer charakterisiert das Verhältnis zwischen mechanischer Spannung und Dehnung.

Betrachten wir zwei Querschnitte AB und $A'B'$ des Aktuators, die im ungebogenen Zustand den Abstand dx voneinander haben (s. Abb. 3.3). Bei einer Biegung ändert sich der Abstand auf der neutralen Achse nicht, der Winkel zwischen beiden Querschnitten ergibt sich aus $d\phi = \frac{dx}{R}$, wobei R der Biegeradius der neutralen Achse ist. Die relative

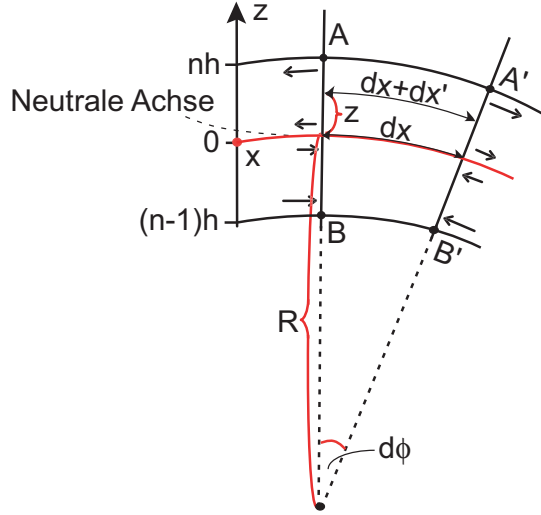


Abbildung 3.3: Verteilung der Deformation bei der Biegung

Dehnung S_1 einer im Abstand z von der neutralen Achse befindlichen Schicht ist

$$S_1 = \frac{dx'}{dx} = \frac{(R+z)d\phi - Rd\phi}{dx} = z \frac{d\phi}{dx} = \frac{z}{R}. \quad (3.11)$$

Weiterhin muss ein von außen erzeugtes Biegemoment gleich dem inneren Biegemoment sein. Für eine freie Biegung mit einem äußeren Biegemoment gleich Null gilt

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} z T_1(z) dA = 0, \quad (3.12)$$

wo $T_1(z)$ die mechanische Spannung und $dA = wdz$ die Elementarfläche mit der Breite w ist. Wird ein zweidimensionaler Spannungszustand angenommen ($T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0, T_1 \neq 0, T_2 \neq 0$), ergibt sich die Dehnung eines piezoelektrischen Material aus einem mechanischen und piezoelektrischen Anteil

$$S_1 = s_{11}T_1(z) + s_{12}T_2(z) + d_{31}(z)E_3(z) \quad (3.13)$$

mit den elastischen Nachgiebigkeiten des Materials s_{11} und s_{12} sowie dem piezoelektrischen Koeffizient $d_{31}(z)$ und der elektrischen Feldstärke E_3 als Funktion der Dicke.

Unter der Wirkung eines elektrischen Feldes wird sich der Aktuator nicht nur in der z -Richtung (3) und x -Richtung (1), sondern auch in y -Richtung (2) dehnen und sich demzufolge nicht nur in der Ebene \mathbf{xz} , sondern auch in der Ebene \mathbf{yz} biegen (s.

Abb. 3.4). Die Biegung in der Ebene \mathbf{yz} ist sehr klein wegen der im Vergleich zur Länge \mathbf{L} kleinen Breite \mathbf{w} . Sie hat fast keinen Einfluss auf die gesamte Auslenkung in der Richtung (3). Andererseits entsteht durch diese Biegung eine Spannungskomponente T_2 , die genauso groß ist wie die Komponente T_1 und deshalb nicht vernachlässigt werden kann. Dies unterscheidet diesen Ansatz von der Theorie von Marcus [25], die auf einem 1-dimensionalen Spannungszustand beruht. In piezoelektrischen Keramiken sind

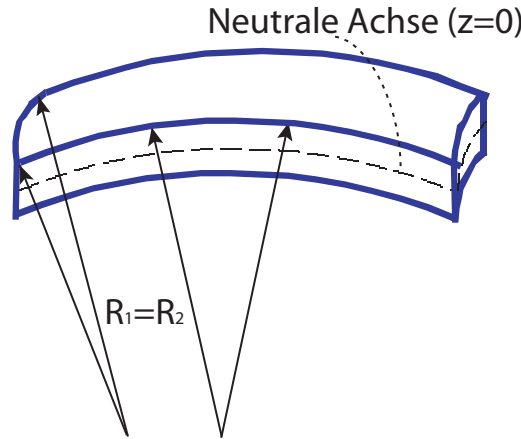


Abbildung 3.4: Zweidimensionale Biegung des Aktuators beim Anlegen eines elektrischen Feldes E_3

die piezoelektrischen Koeffizienten rotationssymmetrisch zur Polungsachse, demzufolge ist $d_{31} = d_{32}$. Wenn $L \ll h$ und $w \ll h$ erfüllt sind, sind beide Biegeradien $R_1 = R_2$ gleich und als Konsequenz $T_1 = T_2$. Da die mechanische Spannung T_2 nicht gleich null ist, wird die Dehnung S_1 höher.

Der in Gl. (3.10) verwendete Youngsche Modul ergibt sich bei Vernachlässigung der Scherspannungen und der Spannung T_3 aus

$$Y_p(z) = \frac{1}{s_{11} + s_{12}}. \quad (3.14)$$

Nach Einsetzen der Gl. (3.11), (3.13), (3.14) in Gl. (3.12) folgt nach einigen Umformungen

$$\frac{1}{R} = \frac{\int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) d_{31}(z) E_3(z) z dz}{\int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) z^2 dz}. \quad (3.15)$$

Die Auslenkung am freien Ende eines piezoelektrischen Aktuators mit der Länge \mathbf{L} ergibt sich aus

$$\delta = R(1 - \cos L/R). \quad (3.16)$$

Da der Biegeradius viel größer als die Länge des Aktuators ist und deshalb der Winkel

L/R sehr klein ist, vereinfacht sich mit der Näherung

$$\cos x = 1 - x^2/2 \quad (3.17)$$

die Gl. (3.16) zu

$$\delta = \frac{L^2}{2R}. \quad (3.18)$$

Setzt man in diese Gleichung die Gl. (3.15) ein, so erhält man für die Auslenkung eines piezoelektrischen Aktuators mit inhomogen verteilten Eigenschaften

$$\delta = \frac{L^2}{2R} = \frac{L^2 \int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) d_{31}(z) E_3(z) z dz}{2 \int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) z^2 dz}. \quad (3.19)$$

3.2.3 Biegeradius und Auslenkung

Berechnen wir den Biegeradius und die Auslenkung von oben beschriebenem Aktuator mit Mehrschichtstruktur aus der Abb. 3.2. Zunächst wird der Einfachheit halber angenommen, dass der Youngsche Modul Y_p in jeder Schicht gleich ist, d.h. der Aktuator eine symmetrische Struktur hat. Dann folgt aus Gl. (3.10), dass $z_{min} = -\frac{h}{2}$ und $z_{max} = \frac{h}{2}$ ist. Nehmen wir weiterhin an, dass die Dielektrizitätskonstante konstant ist. Daraus folgt, dass das elektrische Feld E_3 in jeder Schicht gleich ist. Der piezoelektrische Koeffizient $d_{31}^{(i)}$ der i -ten Schicht wird nach Gl. (3.9) berechnet. Wird dies in die Gleichung für den Biegeradius (3.15) eingesetzt, erhält man

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{E_3 Y_p \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2} + \frac{h}{N}} d_{31}^{(1)} z dz + \dots + E_3 Y_p \int_{-\frac{h}{2} + (i-1)\frac{h}{N}}^{\frac{h}{2} + i\frac{h}{N}} d_{31}^{(i)} z dz + \dots +}{Y_p \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} z^2 dz} \\ &\quad + \frac{E_3 Y_p \int_{-\frac{h}{2} + (N-1)\frac{h}{N}}^{\frac{h}{2} + \frac{h}{2}} d_{31}^{(N)} z dz}{Y_p \int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} z^2 dz} = \frac{6E_3 d_{31}^{max}}{hN^2(N-1)} \sum_{i=1}^N (2i - N - 1)^2, \end{aligned} \quad (3.20)$$

beziehungsweise

$$\frac{1}{R} = \frac{2E_3 d_{31}^{max}}{h} \left(\frac{N+1}{N} \right). \quad (3.21)$$

Durch Einsetzen der Gl. (3.21) in Gl. (3.19) bekommt man die Auslenkung als Funktion von der Anzahl der Schichten

$$\delta(N) = \frac{E_3 L^2 d_{31}^{max}}{h} \left(\frac{N+1}{N} \right). \quad (3.22)$$

Die Auslenkung nimmt also monoton mit der Anzahl der Schichten ab, strebt für große N jedoch einen Grenzwert an. Die größte Auslenkung wird mit einem Bieger mit $N=2$

Schichten (Bimorph) erzielt

$$\delta(N = 2) = \frac{E_3 L^2 d_{31}^{max}}{h} \left(\frac{3}{2} \right). \quad (3.23)$$

Ein Aktuator mit einem idealen Gradienten der piezoelektrischen Eigenschaften kann als Schichtstruktur mit einer unendlichen Anzahl der Schichten angenommen werden. Seine Auslenkung beträgt somit

$$\delta(N = \infty) = \frac{E_3 L^2 d_{31}^{max}}{h} .. \quad (3.24)$$

und beträgt somit 2/3 der Auslenkung eines Bimorphs.

3.2.4 Die mechanische Spannung im Aktuator während der Biegung

Die Komponente T_1 der mechanischen Spannung ist wie bereits erläutert ortsabhängig und kann durch Umformen der Gl. (3.13) berechnet werden

$$T_1(z) = Y_p(z)S_1(z) - Y_p(z)d_{31}(z)E_3(z). \quad (3.25)$$

Der piezoelektrische Koeffizient d_{31} ändert sich nur beim Übergang von einer Schicht zur anderen und bleibt innerhalb einer Schicht konstant. Ein solches Verhalten ist leicht als Abhängigkeit von der Nummer der Schicht i zu beschreiben (s. Gl. 3.9). Aber für die Untersuchung der Verteilung der mechanischen Spannung während der Biegung ist es notwendig, den Koeffizienten d_{31} als Funktion von der Koordinate $\mathbf{z} \in [z_{min} \dots z_{max}]$ darzustellen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung der Funktion $\text{INT}(x)$, die den ganzzahligen Anteil der Zahl liefert.

In Gl. (3.9) wurde der piezoelektrische Koeffizient d_{31} der i -ten Schicht als Funktion von i dargestellt. Eine Abhängigkeit von der z -Koordinate ($\mathbf{z} \in [z_{min} \dots z_{max}]$) kann durch Verwendung der Funktion $\text{INT}(x)$ dargestellt werden, die den ganzzahligen Anteil der Zahl x liefert

$$d_{31}(z) = \left(\frac{2}{(N-1)} \text{INT} \left[N \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right] \right). \quad (3.26)$$

Das Einsetzen der Gl. (3.9), (3.11) und (3.26) in Gl. (3.25) folgt

$$T_1(N, z) = E_3 d_{31}^{max} Y_p \left(\frac{2z(N+1)}{hN} - \left(\frac{2}{N-1} \text{INT} \left[N \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2} \right) \right] - 1 \right) \right). \quad (3.27)$$

Es kann gezeigt werden, dass die mechanische Spannung ihr Maximum beim Übergang zwischen der ersten und letzten Schicht bzw. der vorletzten und letzten Schicht hat. Die detaillierten Ergebnisse dieser Untersuchung sind im nächsten Abschnitt grafisch dargestellt. Betrachtet man das Maximum der Spannung T_1 an der Grenzfläche zwischen erster und zweiter Schicht $z = \dots$, dann kann es in Abhängigkeit von der Anzahl der

Schichten mit folgender Gleichung berechnet werden

$$T_1^{max}(N) = E_3 Y_p d_{31}^{max} \left(\frac{N + 2}{N^2} \right). \tag{3.28}$$

Genau wie die Auslenkung nimmt auch die maximale mechanische Spannung mit wachsender Anzahl der Schichten monoton ab. Der Grenzwert für $N = \infty$ ist hier jedoch 0. Ein Biegeaktuator mit einem idealen Gradienten der piezoelektrischen Eigenschaften hat zwar eine um 1/3 geringere Biegung als ein herkömmlicher Bimorph, ist jedoch nahezu spannungsfrei. Dies könnte zu einer Verlängerung der Lebenszeit und Verbesserung der Zuverlässigkeit des Aktuators führen.

3.3 Analytische und numerische Untersuchung des Biegeverhaltens von Aktuatoren

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der analytischen Untersuchung mit Hilfe der Gl. (3.11-3.28) dargestellt. Ein Teil davon werden mit Ergebnissen der Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) verglichen.

Der Hauptunterschied zwischen analytischer und numerischer Untersuchung ist, dass die analytische Näherung 1-dimensional ist, lediglich die Spannungskomponente T_2 wird bei der Berechnung der Dehnung S_1 berücksichtigt. Bei der Finiten-Elemente-Methode FEM wird das Problem hingegen vollständig 3-dimensional gelöst, d.h. auch Scherkomponenten und die Biegung in y-Richtung (Breite) werden berücksichtigt. Das untersuchte Biegeelement hat in entgegengesetzten Richtungen gepolte Schichten. Es wurden bei beiden Modellierungsmethoden die gleichen Abmessungen (freie Länge, Dicke), sowie die gleiche Anregungsspannung verwendet. Die piezoelektrischen Konstanten d_{31} wurden in den Schichten nach Gl. 3.9 variiert. Die anderen piezoelektrischen Koeffizienten d_{33} und d_{15} wurden analog angepasst. Die dielektrischen und elastischen Koeffizienten sind gleich für alle Schichten. In Tabelle 3.1 sind die für die Modellierung verwendeten Größen dargestellt.

Anzahl der Schichten (N)	2 bis 11
Abmessung, mm	L=14.8, w=4, h=1.32
Piezoelek. Koeffizienten, pm/V	$d_{33}=160, d_{31}=-73, d_{15}=250$
Dielektrizitätskonstante / ϵ_0	$\epsilon_{33} = 1950$
Elastische Koeffizienten	$s_{12}^E, s_{11}^E = 166GPa$
Angelegte elektrische Spannung	100 V

Tabelle 3.1: Für analytische und numerische Berechnungen verwendete Abmessungen und Materialkoeffizienten

3.3.1 Berechnung der Auslenkung

Wenn von Auslenkung die Rede ist, dann ist immer die Auslenkung des freien Endes des Biegeelements gemeint. Der Abstand zwischen dem Probenhalter (s. Abb. 1.10) und dem freien Ende des Aktuator wird als die **freie Länge** bezeichnet und bei der analytischen Berechnung (hier Gl. (3.22)) verwendet. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich sowohl bei der analytischen Berechnung als auch bei der FEM um lineare Modelle handelt. Die Ergebnisse also nur für kleine elektrische Felder und kleine Auslenkungen gültig sind. Das Vorzeichen des piezoelektrischen Koeffizienten beschreibt die Polungsrichtung kann und für unterschiedliche Schichten verschieden sein.

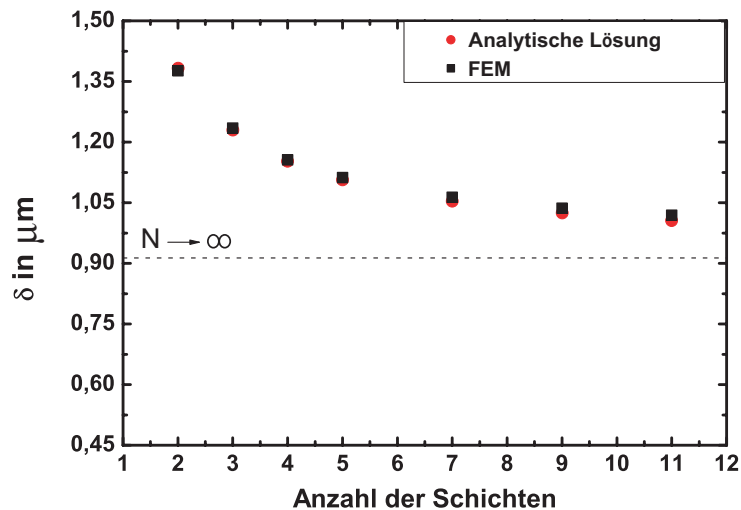


Abbildung 3.5: Abhängigkeit der Auslenkung von der Anzahl der Schichten für Bimorph, Trimorph und 4-morph. Die gestrichelte Linie ist die Auslenkung bei unendlicher Schichtanzahl

In Abb. 3.5 ist die Abhängigkeit der Auslenkung von der Anzahl der Schichten dargestellt. Die analytische Berechnung ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FEM. Das bedeutet, dass die in der analytischen Theorie gemachte eindimensionale Näherung ausreichend genau für die Beschreibung des 3-dimensionalen Biegeverhaltens ist.

Für beide Methoden nimmt die Auslenkung mit dem Anstieg der Anzahl der Schichten monoton ab. Der maximale Wert der Auslenkung wird für zwei Schichten erreicht. Die Auslenkung bei einer unendlichen Anzahl der Schichten bzw. einem linearen Gradienten ist mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet und ist nur um $1/3$ kleiner als die maximale Auslenkung, d.h. sie beträgt $2/3$ des Bimorphs.

Der Vorteil der analytischen Näherung besteht neben einer schnelleren Neuberechnung bei Änderung der Parameter auch in der Möglichkeit, einen idealen Gradienten ($N \rightarrow \infty$) zu modellieren. Mit Hilfe der FEM kann nur eine endliche Zahl von Schichten

realisiert werden. In dieser Arbeit wurden Modelle mit maximal 11 Schichten berechnet. Andererseits erlaubt die FEM, die Spannungsverteilung und Auslenkung in jedem Punkt des Aktuators zu berechnen und zu visualisieren (s. Abb. 3.6).

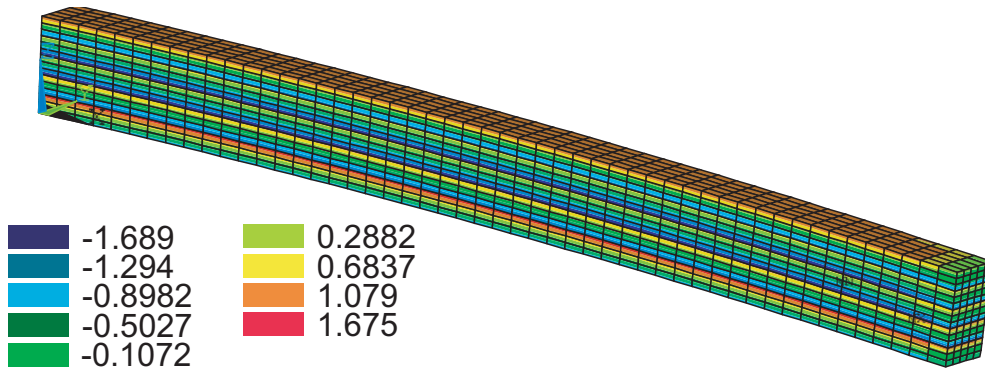


Abbildung 3.6: Visualisierung der Verteilung der Spannung T_1 eines Biegers ($N=5$) mit FEM

3.3.2 Verteilung der mechanischen Spannung

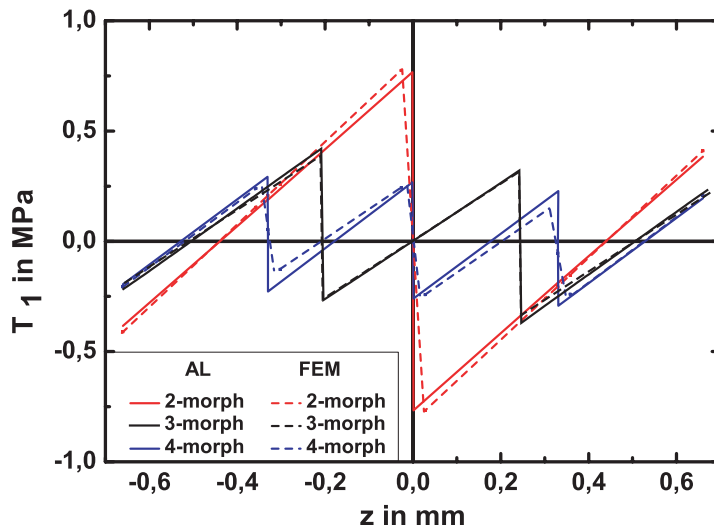


Abbildung 3.7: Verteilung der mechanischen Spannung T_1 , berechnet mit analytischer Näherung und FEM

Die Verteilung der mechanischen Spannung T_1 entlang der Dicke in Bimorph, Trimorph und 4-morph ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die analytischen Kurven sind mit Hilfe der Gl. (3.27) berechnet. Wie auch bei der Auslenkung ist die analytische Berechnung

in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der FEM. Die mechanische Spannung ist in allen drei Aktuatoren nicht monoton verteilt. Jeweils an den Grenzflächen der Schichten kommt es zu Sprüngen zwischen Zug- und Druckspannung. Das passiert, weil sich bei der Biegung gleichzeitig eine Seite jeder Schicht verlängert und die andere Seite sich verkürzt (Abb. 3.8). Das Problem bei klassischen, geklebten Aktuatoren ist deshalb, dass die maximalen mechanischen Spannung genau an der schwächsten Stelle, nämlich der Klebeschicht auftreten.

Die maximale Spannung in allen drei Aktuatoren tritt jeweils an der Grenze zwischen den letzten oberen bzw. unteren Schichten auf. Wie man sieht, reduziert sich die mechanische Spannung im Aktuator deutlich mit zunehmender Anzahl der Schichten. Schon für den 4-morph, ist die maximale Spannung zweimal kleiner als die im Bimorph.

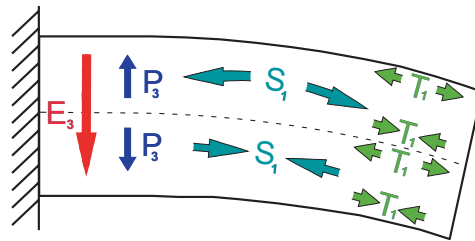


Abbildung 3.8: Zug- und Druckspannungen T_1 an der Grenze zwischen zwei Schichten

3.3.3 Maximale mechanische Spannung

In Erweiterung zur Theorie von Marcus wurde in der Biegetheorie in Abschnitt 3.2.2 zusätzlich zur mechanischen Spannungskomponente T_1 auch die Spannungskomponente T_2 eingeführt und damit eine Biegung in Richtung **(2)** (der Breite) berücksichtigt. Da die Breite im Vergleich zur Länge sehr klein ist, kann der Einfluss auf die Auslenkung vernachlässigt werden. Jedoch ist der Einfluss dieser nun zweidimensionalen Biegung auf die maximale mechanische Spannung nicht vernachlässigbar. In Abb. 3.9 ist die Verteilung der mechanischen Spannung in einem Trimorph (3-Schicht-System) für die verschiedenen Modellierungen dargestellt. Die erste analytische Näherung wurde nach der Theorie von Marcus ohne die Spannungskomponente T_2 berechnet. Bei der zweiten analytischen Näherung nach Gl. (3.25) wurde diese berücksichtigt. Das Ergebnis ist wie bereits gezeigt in guter Übereinstimmung mit der FEM-Modellierung. Die Näherung ohne T_2 Komponente liefert für das Maximum der mechanischen Spannung um 55 % kleinere Werte als die FEM-Modellierung. Das bedeutet, dass die Näherung des eindimensionalen Spannungszustandes (constant strain) bei Marcus für reale Bieger mit einer endlichen, von Null verschiedenen Ausdehnung in **(2)**-Richtung zwar für die Berechnung der Biegeauslenkung ausreichend ist, bei den mechanischen Spannungen aber zu kleine Werte liefert. Die maximale mechanische Spannung als Funktion von der Anzahl der Schichten ist in Abb. 3.10 dargestellt. Die Berechnung wurde bis N gleich 11 durchgeführt. Eine

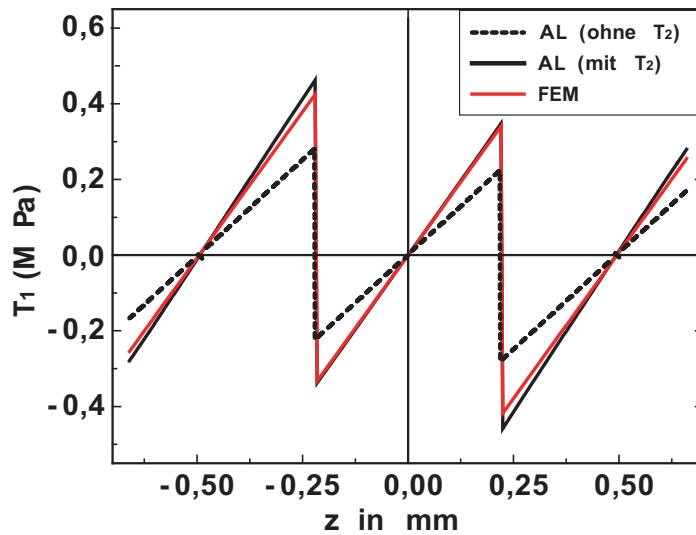


Abbildung 3.9: Ohne und mit Spannungskomponente T_2 berechnete Verteilungen der mechanischen Spannung im Trimorph im Vergleich zur FEM

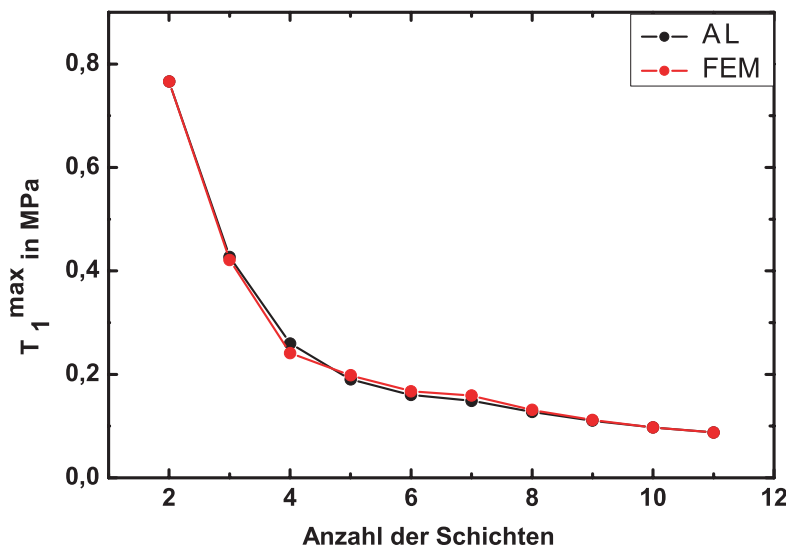


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der maximalen mechanische Spannung von der Anzahl der Schichten, berechnet mit analytischer Näherung und FEM

größere Anzahl von Schichten wäre mit der FEM nur mit sehr großem rechentechnischem Aufwand zu modellieren gewesen. Beide Methoden zeigen die gleiche monotone Abnahme der maximalen Spannung mit dem Anstieg der Anzahl der Schichten. Bei einer

weiteren Erhöhung der Schichtzahl N nähert sich die maximale mechanische Spannung gegen Null, d.h. für Aktuatoren aus Gradientenmaterialien (mit unendlicher Anzahl der Schichten) sollten die mechanischen Spannungen im Inneren theoretisch verschwinden. Praktisch bedeutet dies, dass die maximale Spannung für solche Aktuatoren sehr gering ist.

Der Vergleich der Abhängigkeiten der maximalen Spannung und der maximalen Auslenkung von der Anzahl der Schichten zeigt, dass die Verwendung von Gradientenmaterial in Biegeaktuatoren deren Lebenszeit vergrößern und ihre Zuverlässigkeit verbessert kann. Der Verlust bei der Auslenkung beträgt hingegen nur $1/3$.

Wie bereits gezeigt, hat der Bimorph bei gleichen maximalen Piezokoeffizienten in den äußeren Schichten die höchste Auslenkung. Um die gleiche Auslenkung mit höheren Schichtzahlen zu erreichen, kann die Anregungsspannung erhöht werden. Die Frage ist, in welchem Maße sich dabei die maximale mechanische Spannung erhöhen wird. Die Abb. 3.11 zeigt die benötigte Anregungsspannung für Aktuatoren mit 3 bis 11 Schichten, um die gleiche Auslenkung wie beim Bimorph zu erreichen. Gleichfalls sind die bei diesen Anregungsspannungen auftretenden maximalen mechanischen Spannungen dargestellt. Alle Berechnungen wurden mit Hilfe der analytischen Näherung durchgeführt. Obwohl die Anregungsspannung mit zunehmender Schichtzahl erhöht werden muss, um die Auslenkung konstant zu halten, nimmt die maximale mechanische Spannung trotzdem deutlich ab. Das bedeutet also, dass im Gradientenmaterial bei gleicher oder sogar höherer Biegung eine geringere maximale mechanische Spannung auftritt als beim klassischen Bimorph.

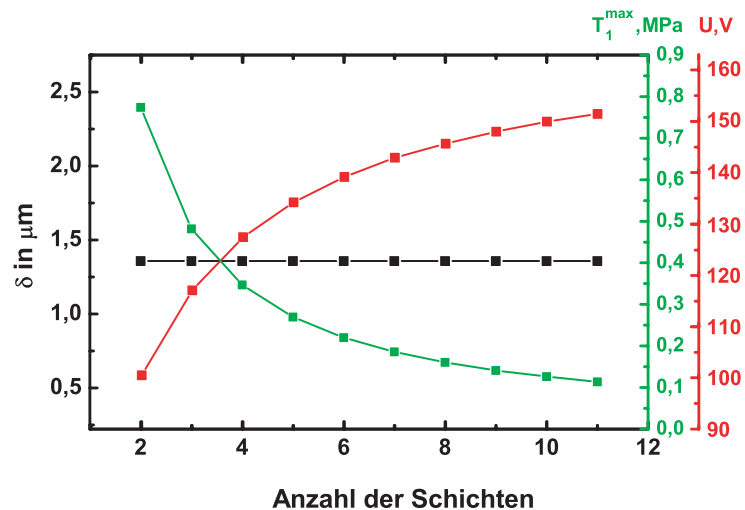


Abbildung 3.11: Maximale Anregungsspannung und maximale mechanische Spannung in Abhängigkeit von der Anzahl der Schichten bei konstanter Auslenkung. Der Wert der Auslenkung ist gleich der Auslenkung eines Bimorphs bei 100 V, d.h. $1.357 \mu\text{m}$

3.4 Aktuatoren mit nichtlinearer, kontinuierlicher Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31}

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Verteilung der piezoelektrischen Eigenschaften auf das Biegeverhalten besprochen. Der Hauptunterschied zwischen dem klassischen, geklebten Biegeelement und dem Aktuator aus Gradientenmaterialien ist, dass bei letzterem die Funktion der Verteilung der elektromechanischen Eigenschaften kontinuierlich ist. Im Abschnitt 3.2.2 wurde der piezoelektrische Koeffizient d_{31} als Funktion von der Anzahl bzw. Nummer der Schichten dargestellt. Bei dieser Stufenfunktion wurde der Übergang zum Gradientenmaterial durch einen Grenzübergang $N \rightarrow \infty$ realisiert. Dadurch erhält man jedoch nur eine lineare Verteilung des Koeffizienten d_{31} entlang der Koordinate z (Dicke). Zur allgemeineren Beschreibung der Verteilung wurde die folgende Funktion mit dem Parameter k verwendet

$$d_{31}(z) = d_{31}^{max} \frac{|z|}{z} \left(\frac{|z|}{z} \frac{2z}{h} \right)^k . \quad (3.29)$$

mit $k \in [0; \infty]$. In Abb. 3.12 ist der piezoelektrische Koeffizient d_{31} als Funktion von z für verschiedene Werte von k dargestellt. Wie man sieht, beschreibt die Funktion $d_{31}(z)$ für $k = 0$ die Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten im geklebten Bimorph. Für

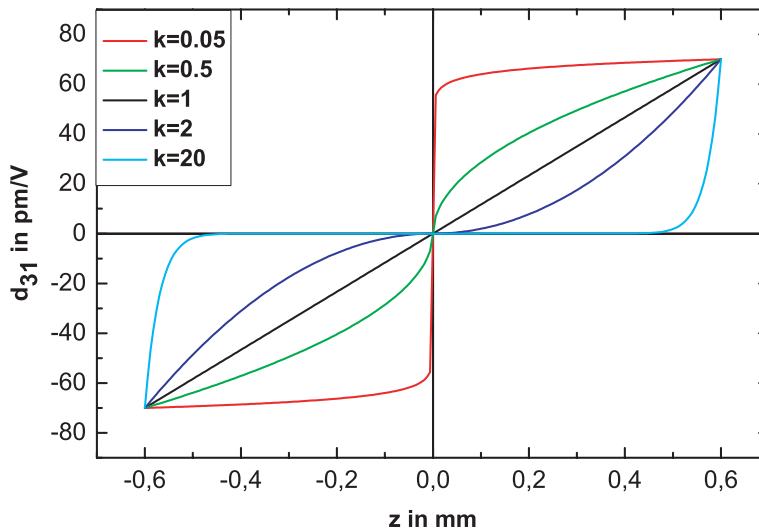


Abbildung 3.12: Graphische Darstellung der Gl. (3.29)

$k = 1$ erhält man die lineare, kontinuierliche Verteilung von $d_{31}(z)$. Obwohl Auslenkung und mechanische Spannung auch von den elastischen und dielektrischen Eigenschaften abhängig sind, wurde in diesem Abschnitt nur der piezoelektrische Koeffizient variiert.

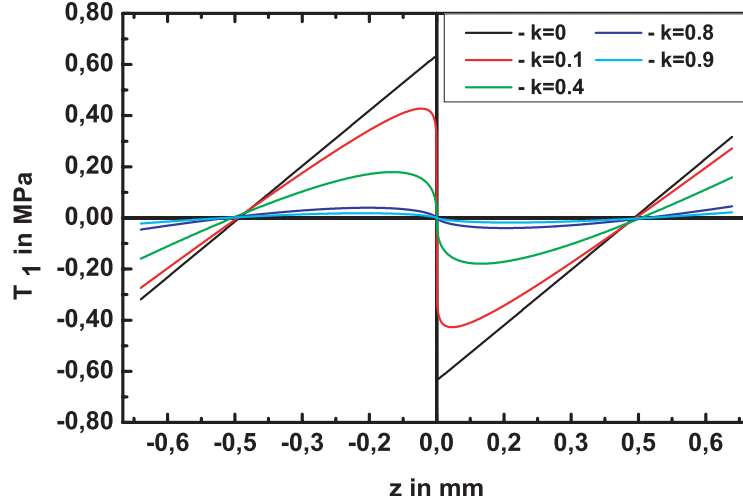


Abbildung 3.13: Die Verteilung der mechanischen Spannung bei verschiedenen Koeffizienten \mathbf{k} aus Gl. (3.31)

Das Einsetzen der Gl. (3.29) in Gl. (3.19) liefert für die Auslenkung

$$\delta(k) = \frac{3L^2 d_{31}^{max} E_3}{(2+k)h}. \quad (3.30)$$

Daraus folgt, dass mit steigendem \mathbf{k} die Auslenkung reduziert wird. Die maximale Auslenkung wird bei $\mathbf{k}=0$, d.h. für den klassischen Bimorph erreicht. Für einen linearen kontinuierlichen Gradienten bei $\mathbf{k}=1$ ist die Auslenkung um $1/3$ kleiner als die des Bimorphs.

Das Einsetzen der Gl. (3.30) in Gl. (3.25) liefert

$$T_1(z, k) = E_3 Y_p d_{31}^{max} \left(\frac{6z}{(2+k)h} - \left(\frac{2z}{h} \right)^k \right). \quad (3.31)$$

In Abb. 3.13 ist die Verteilung der mechanischen Spannung für verschiedene Koeffizienten \mathbf{k} dargestellt. Die Verteilung der mechanische Spannung als Funktion der Koordinate \mathbf{z} ist ähnlich wie bei der Abhängigkeit von der Anzahl der Schichten. Die sprunghafte Änderung der piezoelektrischen Koeffizienten im Bimorph erzeugt die größte mechanische Spannung. Je mehr sich die Verteilung der Eigenschaften der linearen annähert ($\mathbf{k} \rightarrow 1$), desto kleiner wird die maximale Spannung. Für $\mathbf{k}>1$ nimmt die maximale mechanische Spannung wieder zu. Die Untersuchung der Gl. (3.31) auf ihr Maximum liefert zwei Gleichungen

$$T_1^{max}(k) = E_3 Y_p d_{31}^{max} \left(\frac{k-1}{2+k} \right) \quad (k>1) \quad (3.32)$$

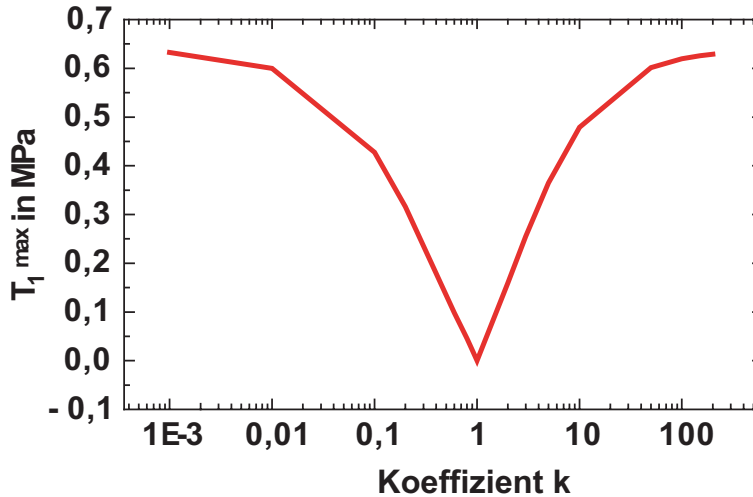


Abbildung 3.14: Maximale mechanische Spannung als Funktion des Koeffizienten k

$$T_1^{max}(k) = E_3 Y_p d_{31}^{max} \left(\frac{3}{2k + k^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{3}{2+k} - \left(\frac{3}{2k + k^2} \right)^k \right). \quad (k < 1) \quad (3.33)$$

Die Abhängigkeit der maximalen Spannung vom Parameter k für ein Zweischichtsystem ($N = 2$) ist in Abb. 3.14 dargestellt. Die Abnahme der mechanische Spannung mit der Annäherung an die lineare, kontinuierliche Verteilung der piezoelektrischen Eigenschaften ist in guter Übereinstimmung mit der Modellierung im Abschnitt 3.3.

Allgemein kann gesagt werden, dass eine Verringerung der mechanischen Spannung immer mit einer Verringerung der Auslenkung verbunden ist. Die beiden Extremfälle sind die stufenweise Verteilung, wie sie im klassischen geklebten Bimorph verwendet wird. Hier haben sowohl Auslenkung als auch mechanische Spannung ihr Maximum. Das andere Extrem ist ein Material mit einem idealen linearen Gradienten, in dem die mechanische Spannung auf ein Minimum reduziert wird, allerdings auch die Auslenkung geringer wird. Diese kann jedoch - wie gezeigt - durch eine höhere Anregungsspannung kompensiert werden.

In weiteren Untersuchungen müsste noch der Einfluss der dielektrischen und elastischen Eigenschaften einbezogen werden. Da jedoch der piezoelektrische Koeffizient das Biegeverhalten am stärksten beeinflusst, wurde darauf in dieser Arbeit verzichtet.

3.5 Analytische Analyse des Einflusses der dielektrischen Eigenschaften auf das Biegeverhalten

Wird der Funktionsgradient bei der Herstellung durch einen chemischen Gradient realisiert, so ändern sich im allgemeinen nicht nur die piezoelektrischen, sondern auch die

dielektrischen und elastischen Eigenschaften. Im folgenden soll der Einfluss der dielektrischen Koeffizienten auf das Biegeverhalten untersucht werden.

Nehmen wir an, dass die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon_{33}^{(i)}$ innerhalb jeder Schicht konstant ist, aber sich von Schicht zu Schicht unterscheidet. Eine konstante Dielektrizitätskonstante bedeutet aber auch, dass der Zusammenhang zwischen Polarisation und Feldstärke linear ist. Dies gilt nur für kleine Feldstärken. Wir nehmen weiterhin an, dass die elastischen Eigenschaften für alle Schichten konstant sind.

Die Verteilung der Dielektrizitätskonstante verursacht eine unterschiedliche Feldstärke E_3 in den einzelnen Schichten. Die Feldstärke in der i -ten Schicht ergibt sich aus

$$E_3^{(i)} = \frac{U_{ges}}{\varepsilon_{33}^{(i)} \sum_{i=1}^N \frac{h^{(i)}}{\varepsilon_{33}^{(i)}}} = \frac{U_{ges} \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{33}^{(i)}} \quad (3.34)$$

mit der effektiven Dielektrizitätskonstante

$$\frac{1}{\varepsilon_{eff}} = \sum_{i=1}^N \frac{h^{(i)}}{\varepsilon_{33}^{(i)}}. \quad (3.35)$$

Das Einsetzen der Gl. (3.34) in die Gl. (3.19) liefert nach einigen Umformungen eine Formel zur Berechnung der Auslenkung von Aktuatoren mit unterschiedlichen piezoelektrischen und dielektrische Eigenschaften

$$\delta = \frac{3L^2 U_{ges} \varepsilon_{eff}}{hN^2} \sum_{i=1}^N \frac{d_{ij}^{(i)} (2i - N - 1)}{\varepsilon_{33}^{(i)}}. \quad (3.36)$$

Der piezoelektrische Koeffizient in unserem Aktuator ändert sich vom Minimum bis Null und von Null bis zum Maximum (s. Abb. 3.1). Andererseits, je größer die Dielektrizitätskonstante der einzelnen Schicht ist, desto kleiner wird das elektrische Feld in dieser Schicht. Das bedeutet, um eine maximale Dehnung zu induzieren, sollte die Dielektrizitätskonstante der Schicht mit dem größten piezoelektrischen Koeffizient am kleinsten sein. Umgekehrt sollte die Schicht mit dem kleinsten piezoelektrischen Koeffizienten die größte Dielektrizitätskonstante haben. Bei einer optimalen Verteilung der dielektrischen Eigenschaften im Verhältnis zu den elektromechanischen kann die Differenz zwischen maximaler und minimaler Dehnung vergrößert und damit das Biegeverhalten verbessert werden.

Der Einfluss der Verteilung der Elastizitätskonstanten auf das Biegeverhalten wird hier nicht detailliert diskutiert, da sich die elastischen Eigenschaften im Vergleich zu den dielektrischen und piezoelektrischen im hier untersuchten Mischsystem $BaTiO_3 - BaSnO_3$ nur relativ geringfügig ändern. So ändert sich die elastische Nachgiebigkeit s_{11}^E im Bereich zwischen $6 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ und $13 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$. Im Vergleich dazu ändern sich die mit dielektrischen bzw. piezoelektrische Koeffizienten um ein Vielfaches.

3.6 Geklebte Aktuatoren aus BaTiO₃-Keramik

Mit der Biegetheorie wurden die Zusammenhänge zwischen angelegter Spannung und der Auslenkung oder der mechanischen Spannung dargestellt. Da mit unseren Messmethoden keine Möglichkeit besteht, die mechanische Spannung direkt zu messen, wurde nur die Abhängigkeit der Auslenkung von verschiedenen Parametern experimentell untersucht. Die experimentellen Ergebnisse wurden mit den analytischen Lösungen und der FEM verglichen. Die ersten Aktuatoren, die für die experimentellen Untersuchungen gebaut wurden, waren der klassische Bimorph sowie Trimorph und 4-morph. Bei dieser Art Aktuatoren unterschieden sich nur die piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} und d_{33} von Schicht zur Schicht durch entgegengesetztes oder teilweises Polen. Die Dielektrizitätskonstante änderte sich durch das Polen relativ gering, die Elastizitätskonstanten wurden als konstant betrachtet. Mit Hilfe dieser Aktuatoren sollte die Modellierung durch experimentelle Daten überprüft werden.

3.6.1 Die Struktur von Aktuatoren aus BaTiO₃-Keramik

Bei den in diesem Abschnitt untersuchten Aktuatoren bestanden alle Schichten aus undotierter grobkörniger BaTiO₃-Keramik, die mit dem klassischen Mixed-Oxide Verfahren hergestellt wurde. Die Schichten wurden einzeln geschnitten, geschliffen und mit Aluminium elektrodiert. Am Ende hatten alle Schichten folgende Abmessung: Länge 20 mm, Breite 4 mm und Gesamtdicke 1.2 mm. Die einzelnen Schichten hatten eine Dicke von $1.2/N$ mm (N ist die Anzahl der Schichten). Die Schichten wurden einzeln mit verschiedenen elektrischen Polungsfeldstärken gepolt. Stärke und Richtung des Polungsfelds wurde variiert, um die nötigen Unterschiede in den piezoelektrischen und dielektrischen Eigenschaften der Schichten zu erhalten. Die äußersten Schichten wurden jeweils bei 2 kV/mm in entgegengesetzter Richtungen gepolt. Beim Trimorph wurde die mittlere Schicht nicht gepolt. Beim 4-morph hingegen wurden die zwei mittleren Schichten nur teilweise, aber auch in entgegengesetzten Richtungen, gepolt. Die Polungsfeldstärke wurde so gewählt, dass ihre piezoelektrischen Koeffizienten nur halb so groß wie die der vollständig gepolten äußeren Schichten waren. Die Werte der piezoelektrischen und dielektrischen Kleinsignaleigenschaften der Schichten wurden jeweils 24 Stunden nach dem Polen gemessen. In Tabelle 3.2 sind die gemittelten Werte mehrerer Proben dargestellt. Abschließend wurden die Schichten mit einem leitfähigen Zweikomponentenkleber zu einer Mehrschichtstruktur zusammengeklebt (s. Abb. 3.15). Die Koeffizienten wurden

Aktuator	piezoelektrische und dielektrische Koeffizienten von Schichten							
	$d_{31}, pm/V$	ϵ_{33}	$d_{31}, pm/V$	ϵ_{33}	$d_{31}, pm/V$	ϵ_{33}	$d_{31}, pm/V$	ϵ_{33}
Bimorph	62	2006	-	-	-	-	-72	1974
Trimorph	62	1908	0	1781	-	-	-63	1890
4-morph	61	1921	32	1825	-31	1835	-60	1867

Tabelle 3.2: Die piezoelektrischen und dielektrischen Koeffizienten der einzelnen Schichten von geklebten Bimorph, Trimorph und 4-morph

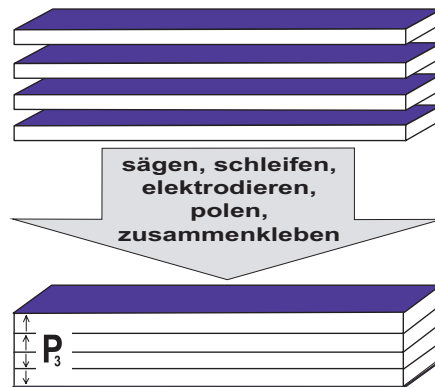


Abbildung 3.15: Graphische Darstellung der Herstellung der geklebten Aktuatoren

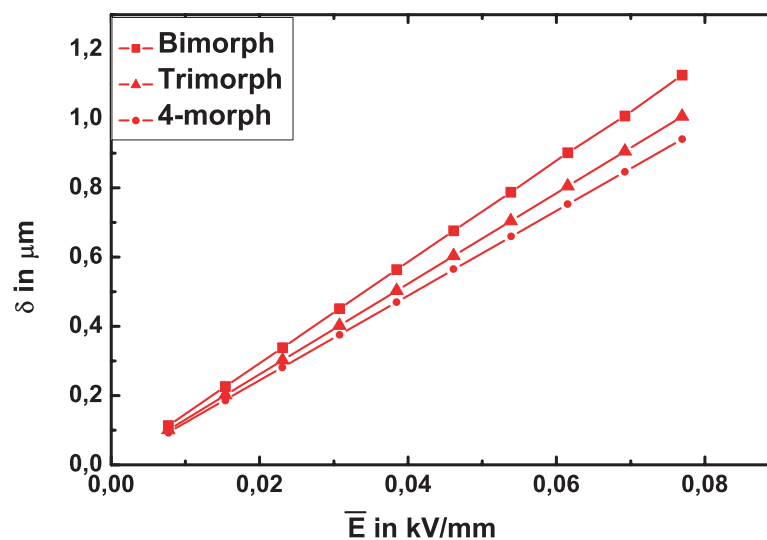


Abbildung 3.16: Abhängigkeit der Auslenkung der geklebten Bimorph, Trimorph und 4-morph von der elektrischen Feldstärke (analytische Näherung)

zur Berechnung der Auslenkung mit der Biegetheorie verwendet. Obwohl alle Schichten aus reiner BaTiO_3 Keramik sind, unterscheiden sich die Kleinsignaleigenschaften von Probe zu Probe auf Grund normaler statistischer Schwankungen wie sie von Keramiken bekannt sind (Schwankungen bei der Kornverteilung und Korngröße). Die mit der analytischen Näherung berechnete Abhängigkeit der Auslenkung von der Anregungsspannung ist in Abb. 3.16 dargestellt. Da in der hier betrachteten linearen Biegetheorie alle Parameter unabhängig von der Anregungsspannung U sind, ist auch die Auslenkung linear von U abhängig. Die Einflüsse verschiedener Parameter werden in den nächsten Abschnitten zusammen mit den experimentellen Ergebnissen diskutiert.

3.6.2 Biegeverhalten von Aktuatoren aus BaTiO₃

In Abb. 3.17 ist die Biegeauslenkung eines geklebten Bimorphs dargestellt, gemessen bei verschiedenen elektrischen Anregungsspannungen. Die Auslenkung wurden immer bei Raumtemperatur und 137 Hz gemessen. Wegen geringer mechanischer und dielektrischer Verluste ist die Auslenkung bei einem Wechselfeld nicht ganz linear, sondern zeigt eine leichte Hysterese. Die Anregungsspannung wurde an die äußeren Elektroden angelegt.

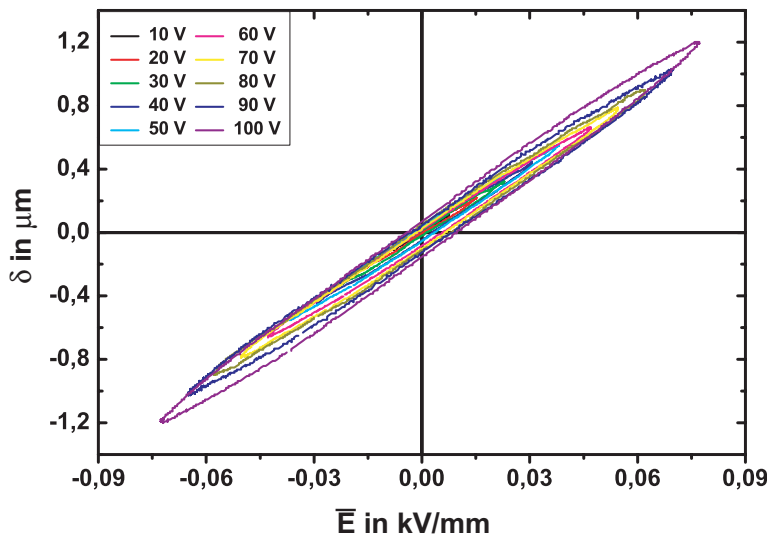


Abbildung 3.17: Biegehysterese eines geklebten Bimorphs bei verschiedenen elektrischen Feldstärken

Dadurch ist die Feldrichtung immer in einer Schicht parallel, in der anderen Schicht jedoch antiparallel zur Polungsrichtung. Um ein Depolarisieren zu vermeiden, wurde der maximale Wert der Anregungsspannung so klein gewählt, dass die Feldstärke in der Probe viel kleiner als die Koerzitivfeldstärke blieb. Die maximale Spannung betrug deshalb nicht mehr als 100 V. Die piezoelektrischen und dielektrischen Koeffizienten sind in diesem Feldstärkebereich konstant und die Abhängigkeit der Auslenkung von der Anregungsspannung ist linear. Das ist deutlich in Abb. 3.18 zu sehen, wo die maximale Auslenkung der geklebten Bimorph, Trimorph und 4-morph in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke dargestellt ist. Erst bei 100 V sind erste leichte Nichtlinearitäten sowohl in der Form der Biegehysterese (Abb. 3.17) als auch in der maximalen Auslenkung (Abb. 3.18) zu sehen.

3.6.3 Vergleich zwischen Experiment und Modellierung

In Abb. 3.19 werden die gemessenen Auslenkungen mit den analytischen und numerischen Modellierungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Schichten verglichen. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentellen Daten zu

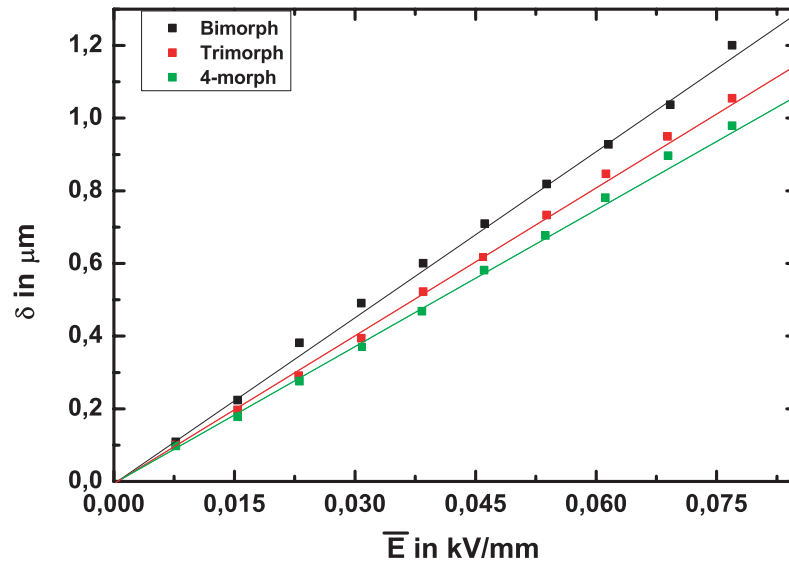


Abbildung 3.18: Gemessene Abhängigkeit der maximalen Auslenkung der geklebten Bimorph, Trimorph und 4-morph von der elektrischen Feldstärke

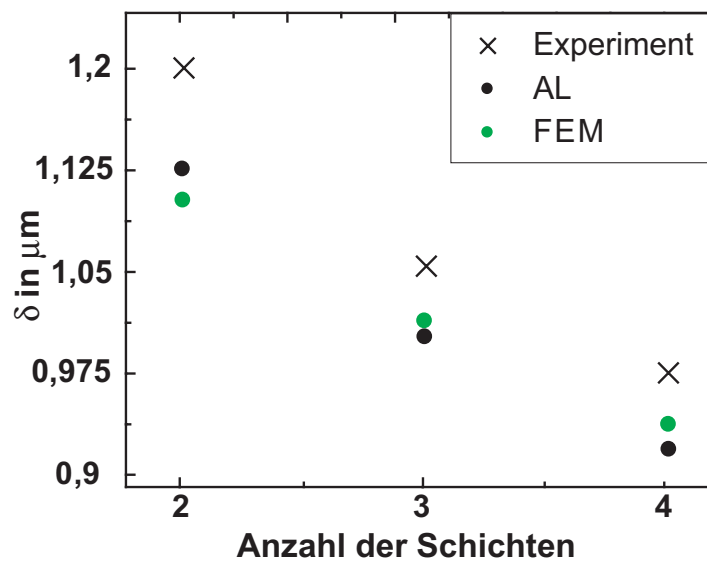


Abbildung 3.19: Gemessene und berechnete Biegeauslenkung in Abhängigkeit von der Anzahl der Schichten

beobachten. Die gemessene Werte sind für alle Proben etwa 6% größer als die berechneten Werte. Daher ist zu vermuten, dass es sich um einen geringen systematischen Fehler handelt. Im Bereich von $1 \mu\text{m}$ ist die Meßunsicherheit mit ca. 5% anzugeben. Da in der Modellierung ebenfalls experimentell ermittelte Werte (piezoelektrische und dielektri-

sche Koeffizienten, Schichtdicke, Anregungsspannung, freie Länge) verwendet wurden, sind auch diese Werte fehlerbehaftet. Mittels der Fehlerabschätzung nach Gauss beträgt dieser Fehler ebenfalls etwa 5 %.

Außerdem wurde beobachtet, dass die mechanischen Randbedingungen die Biegeauslenkung beeinflussen. In der Modellierung wurde von einer idealen Klemmung ausgegangen, d.h. die Probe ist quasi mit der Stirnseite fest an einer Wand befestigt. Im Experiment ist hingegen ein Teil der Probe im Probenhalter eingeklemmt. Mit Hilfe der FEM wurde diese reale Einspannung modelliert. In Abhängigkeit von der Länge des eingespannten Probenteils und der Einspannkraft nahm die Auslenkung um 2-3% zu. Prinzipiell kann man also davon ausgehen, dass das Modell durch das Experiment bestätigt wurde.

3.7 Monolithische Aktuatoren aus $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ -Keramik

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung des Biegeverhaltens von Aktuatoren aus $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ Keramik mit einem Gradient des Zinngehalts dargestellt. Zuerst werden die notwendigen Modifizierungen des bereits besprochenen Biegemodells diskutiert. Dann werden die Ergebnisse der Modellierung mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Um die Einflüsse von mechanischer Spannung und inneren Elektroden abzuschätzen, wurden wie im Abschnitt zum Polungsverhalten geklebte Aktuatoren mit gleicher chemischer Zusammensetzung untersucht.

3.7.1 Die Struktur von monolithischen Aktuatoren aus $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ -Keramik

Für die nun folgenden Biegeuntersuchungen wurden monolithische Aktuatoren aus $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3$ -Keramik verwendet. Der Zinngehalt in den Aktuatoren wurde kontinuierlich entlang der Dicke der Proben verändert. Parallel zu den monolithischen Aktuatoren wurden auch geklebte Aktuatoren mit der gleichen Verteilung des Zinngehalts untersucht. Der Unterschied zwischen geklebten und monolithischen Biegeelementen ist detailliert in den Grundlagen beschrieben (s. Abschnitt 1.4.2).

Wie bei der Untersuchung des Polungsverhaltens wurden 2 Gruppen von Aktuatoren untersucht. Es wurden Bimorph und Trimorph mit niedrigem Zinngehalt ($\approx 7,5$ mol%) sowie Bimorph, Trimorph und 4-morph mit höherem Zinngehalt (7,5 - 15 mol%) hergestellt. Die Zusammensetzung der Schichtsysteme und ihre Bezeichnung sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Die letzten Schritte der Herstellung der Aktuatoren sind in Abb. 3.20

Aktuatoren mit niedrigem Zinngehalt		Aktuatoren mit hohem Zinngehalt	
BTS(0-2.5)	B-1	BTS(7.5-15)	B-2
BTS(2.5-0-7.5)	T-1	BTS(7.5-12.5-15)	T-2
-	-	BTS(7.5-10-12.5-15)	V-2

Tabelle 3.3: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Aktuatoren

grafisch dargestellt. Die gesinterten monolithischen Aktuatoren wurden mit Aluminiumelektroden bedampft und gepolt. Die Aktuatoren wurden mit einer berechneten Po-

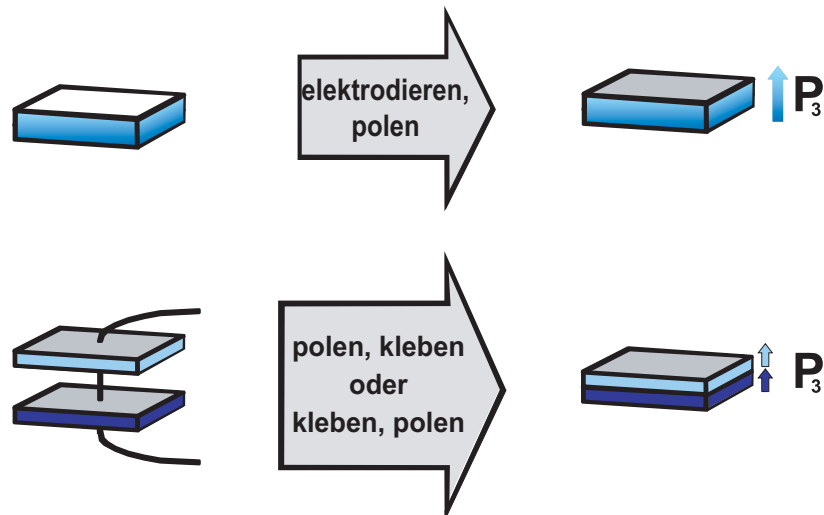


Abbildung 3.20: Graphische Darstellung des Unterschieds zwischen monolithischen und geklebten Aktuatoren

lungsfeldstärke oder mit 2 kV/mm gepolt. Die berechnete Polungsfeldstärke wurde aus der Untersuchung des Polungsverhaltens von Aktuatoren mit Mehrschichtstruktur übernommen. Die genauen Werte sind in der Tabelle 2.3 aufgelistet. Nach der Polung waren alle Schichten in den monolithischen Aktuatoren in der gleichen Richtung gepolt (unidirektionale Polung). Um den Einfluss der mechanischen Spannung und von inneren Elektroden auf das Biegeverhalten zu untersuchen, wurden so genannte **gepolt-geklebte Aktuatoren** und **geklebt-gepolte Aktuatoren** hergestellt. Die Schichten der gepolt-geklebten Aktuatoren wurden während des Polungsprozesses nur elektrisch mit dünnen schmalen Streifen aus Zinkfolie miteinander verbunden und waren somit mechanisch frei. Anschließend wurden sie für die Biegeexperimente zusammengeklebt. Die Schichten der geklebte-gepolten Aktuatoren wurden vor der Polung zusammen geklebt und erst dann gepolt. Deshalb waren sie während der Polung nicht mechanisch frei, sondern auf Grund der unterschiedlichen remanenten Dehnungen der benachbarten Schichten teilweise mechanisch geklemmt.

Die Schichten in den geklebt-gepolten Aktuatoren unterliegen ähnlichen (mechanischen) Bedingungen wie in monolithischen Aktuatoren. Die Hauptunterschiede sind nur die inneren Elektroden (leitfähiger Kleber) und die Tatsache, dass die monolithischen Biegeelemente keine scharfen Übergänge im Zinngehalt besitzen. Die zwei verschiedenen Arten geklebter Aktuatoren wurden hergestellt, um die Einflüsse der mechanischen Spannung beim Polen auf das Biegeverhalten des Aktuators zu untersuchen. Die Abmessungen aller Aktuatoren waren gleich: Länge 20 mm, Breite 4 mm, Dicke 1.2 mm.

3.7.2 Besonderheiten in der Biegetheorie für Aktuatoren mit unidirektionalem Gradient der Eigenschaften

Im Abschnitt 3.2.3 wurde die Biegetheorie für Aktuatoren mit einem so genannten bidirektionalen Gradient der Eigenschaften vorgestellt. Das heißt, dass z.B. der piezoelektrische Koeffizient vom negativen Maximalwert $-d_{31}$ bis zum positiven Maximalwert $+d_{31}$ variiert. In den hier untersuchten monolithischen Aktuatoren ist der Gradient unidirektional, d.h. der Koeffizienten variiert von einem minimalen Wert zu einem maximalen Wert mit demselben Vorzeichen, da alle Schichten in der gleichen Richtung gepolt sind. Unter dieser Voraussetzung muss die Biegetheorie geringfügig modifiziert werden.

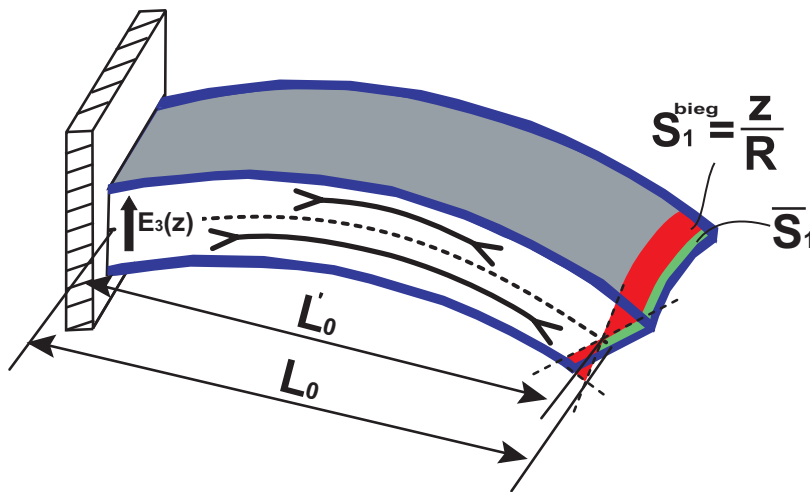


Abbildung 3.21: Schematische Darstellung eines unidirektionalen Aktuators mit der Biegedehnung S_1^{bieg} und der mittleren piezoelektrischen Dehnung \overline{S}_1

Nehmen wir an, dass das elektrische Feld in der Polungsrichtung angelegt ist. Da die Schichten in der gleichen Richtung gepolt sind, ziehen sie sich alle in Richtung S_1 zusammen, allerdings unterschiedlich stark auf Grund der unterschiedlichen piezoelektrischen Koeffizienten. Durch diese ungleichmäßige Dehnung der Schichten wird sowohl eine Biegung des Aktuators als auch eine von Null verschiedene durchschnittliche Dehnung \overline{S}_1 der Schichten in Richtung (1) hervorgerufen (s. Abb. 3.21). Die Gesamtlänge eines solchen Aktuators wird beim Anlegen des elektrischen Feldes in Polungsrichtung kleiner und in der entgegengesetzten Richtung größer. Dies steht im Unterschied zum bidirektionalen Aktuator, wo die Gesamtlänge bei der Biegung konstant bleibt, das heißt, die neutrale Achse keine Längenänderung erfährt. Die gesamte Dehnung S_1 ergibt sich für den unidirektionalen Aktuator aus folgender Gleichung

$$S_1 = S_1^{bieg} + \overline{S}_1 = \frac{z}{R} + \overline{S}_1. \quad (3.37)$$

Die Position der neutralen Achse, die durch die Zahl n beschrieben wird (s. Abschnitt 3.2.2),

kann man aus der folgenden Gleichung bestimmen

$$\int_{(n-1)h}^{nh} T_1 dz = \int_{(n-1)h}^{nh} S_1 Y_p(z) dz = \frac{1}{R} \int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) z dz + \overline{S}_1 \int_{(n-1)h}^{nh} Y_p(z) dz = 0. \quad (3.38)$$

Die mittlere Dehnung \overline{S}_1 wird aus der ersten Gleichgewichtsbedingung bestimmt, bei der sich die mechanischen Trägheitsmoment in Bezug zur neutralen Achse gegenseitig aufheben

$$\int_{(n-1)h}^{nh} \left(d_{31}(z) E_3(z) - \overline{S}_1 Y_p(z) \right) dz = 0. \quad (3.39)$$

Durch Einsetzen der Gl. (3.37), (3.38) und (3.39) in Gl. (3.12) erhält man nach einigen Umformungen den Krümmungsradius der Biegung

$$\frac{1}{R} = \frac{\int_{(n-1)h}^{nh} d_{31}(z) E_3(z) Y_p(z) z dz - \int_{(n-1)h}^{nh} \overline{S}_1 Y_p(z) z dz}{\int_{(n-1)h}^{nh} z^2 Y_p(z) dz}. \quad (3.40)$$

Die Auslenkung des freien Endes erhält man durch Einsetzen von Gl. (3.40) in Gl. (3.16)

$$\delta = \frac{L^2 \int_{(n-1)h}^{nh} d_{31}(z) E_3(z) Y_p(z) z dz - \int_{(n-1)h}^{nh} \overline{S}_1 Y_p(z) z dz}{2 \int_{(n-1)h}^{nh} z^2 Y_p(z) dz}. \quad (3.41)$$

Mit Hilfe der Gl. (3.13) kann die mechanische Spannung als Funktion der z-Koordinate berechnet werden

$$T_1(z) = \left(\overline{S}_1 + \frac{z}{R} \right) Y_p(z) - d_{31} E_3(z) Y_p(z). \quad (3.42)$$

In Abb. 3.22 ist die Verteilung der mechanischen Spannung in Aktuatoren mit unidirektionalem und bidirektionalem Gradienten verglichen. Die maximale mechanische Spannung von klassischen bidirektionalen Aktuatoren ist verständlicherweise deutlich höher, da die maximalen und minimale Werte des Koeffizienten d_{31} verschiedene Vorzeichen haben. Beim unidirektionalen Aktuator, wo die Schichten nur in einer Richtung gepolt sind, reduziert sich sowohl die mechanische Spannung als auch die maximale Auslenkung.

3.7.3 Biegeverhalten von Aktuatoren mit niedrigem Zinngehalt

Im folgenden Abschnitt wird das Biegeverhalten von Proben mit niedrigem Zinngehalt unter 7,5 mol% untersucht. Es handelt sich dabei um die Zweischichtkombination aus reinem $BaTiO_3$ und BTS2.5, sie wird kurz als B-1 bezeichnet. Das zweite System besteht aus den drei Schichten BTS(2.5-0-7.5) und trägt die Bezeichnung T-1. Beide Systeme wurden bereit im Abschnitt zum Polungsverhalten verwendet. Die Konfigurationen B-1 und T-1 wurden als Biegeaktuatoren gewählt, da die Schichten über große piezoelektrische Koeffizienten und eine hohe remanente Polarisierung verfügen. Beim Trimorph T-1

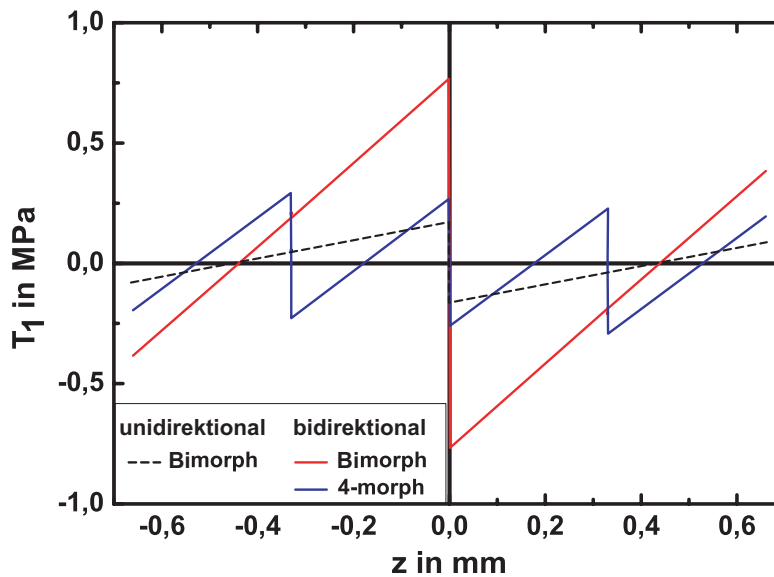


Abbildung 3.22: Verteilung der mechanischen Spannung im bidirektionalen Bimorph und 4-morph im Vergleich zum unidirektionalen Bimorph bei gleicher Anregungsspannung

ist die Besonderheit, dass kein konstanter chemischer Gradient gewählt wurde, sondern sich das reine BT in der Mitte der Probe befindet. Der Grund dafür ist, dass die piezoelektrischen Koeffizienten von BT in der Mitte zwischen denen von BTS2.5 und BTS7.5 liegen (vgl. Abb. 1.5).

In Abb. 3.23 sind die Biegehysteresen von monolithischen, geklebt-gepolten und gepolt-geklebten B-1 Aktuatoren dargestellt. Alle Proben wurden bei der berechneten Feldstärke (1.52 kV/mm) gepolt. Zunächst muss festgestellt werden, dass die maximale Auslenkung von allen Biegehysteresen sehr gering ist. Die Form der Biegehysteresen ist qualitativ bei allen Proben gleich und dadurch gekennzeichnet, dass das Maximum der Auslenkung nicht beim Feldstärkemaximum zu finden ist. Dieser Effekt ist beim geklebt-gepolten Aktuator etwas kleiner und auch die Hysterese ist etwas schmaler.

Interessant ist die allgemein fast ovale Form der Biegehysteresen. Der Grund könnte in den annähernd gleichen Werten der ferroelektrischen und elektromechanischen Eigenschaften liegen. Die beiden Schichten BT und BTS2.5 haben eine fast gleich große remanente Polarisation und Dielektrizitätskonstante. Dadurch fällt die angelegte Spannung zu ungefähr gleichen Teilen in den beiden Schichten ab. Darüber hinaus unterscheiden sich auch die piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} nur gering. Die absoluten Werte sind zwar relativ hoch und es wird eine entsprechend große Dehnung S_1 erzeugt. Aber die Differenz dieser Dehnungen, die entscheidend für die Biegeauslenkung ist, ist sehr gering. Dies erklärt zum einen die geringen Werte von weniger als $0,1 \mu\text{m}$ bei 50 V. Zum anderen reagiert dadurch die Biegung auch sehr empfindlich auf kleine Änderungen in der Spannungsverteilung zwischen beiden Schichten. Somit spielen auch kleinste Nicht-

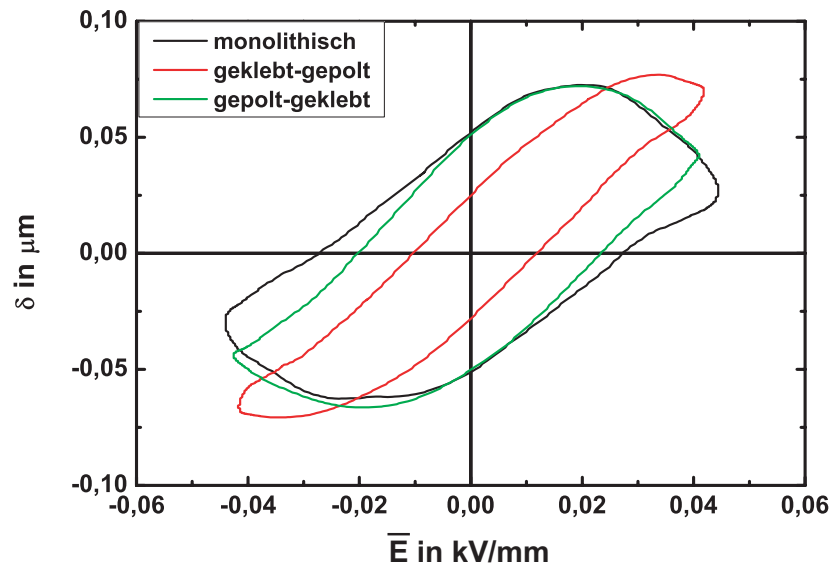


Abbildung 3.23: Biegehysteresen von monolithischen, geklebt-gepolt, gepolt-geklebten Proben B-1 bei 50 V und 137 Hz

linearitäten der dielektrischen und piezoelektrischen Koeffizienten, die auch bei kleinen Anregungsspannungen vorhanden sind, eventuell eine Rolle.

Nichtlineare piezoelektrische und dielektrische Materialeigenschaften sind aber in dem hier verwendeten Biegemodell nicht berücksichtigt. Dadurch sind auch die Abweichungen zwischen den experimentellen Daten und der Modellierung für diese Proben teilweise zu erklären. In Abb. 3.24 ist dieser Vergleich zwischen Modellierung und Experiment für verschiedene Anregungsspannungen dargestellt. Der monolithische Bimorph zeigt eine besonders starke nichtlineare Abhängigkeit der maximalen Auslenkung von der Anregungsspannung. Hier spielt das Vorhandensein der Zwischenschicht mit dem Zinngradienten von 0 auf 2,5 mol% eine Rolle. Diese auch von den Materialeigenschaften her undefinierte Schicht kann insbesondere die lokale Spannungsverteilung in der Probe beeinflussen und die damit verbundenen Probleme verstärken.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Messgenauigkeit der Auslenkung im Bereich unter $1 \mu\text{m}$ stark nachlässt. Die Empfindlichkeit der Apparatur ist zwar auch hier noch sehr hoch, allerdings ist der absolute (systematische) Fehler durch die Kalibrierung hier im Bereich des Messwertes.

In Abb. 3.25 sind die experimentell bestimmten Biegehysteresen von monolithischen BTS(0-2.5) (B-1) und BTS(2.5-0-7.5) (T-1) dargestellt. Die Biegeauslenkung wurde bei Raumtemperatur und einer Sinusspannung von 50 V und 137 Hz gemessen. Beim Trimorph scheint der Einfluss der nichtlinearen Effekte geringer zu sein. Die Hysterese zeigt nicht das anormale Verhalten, besitzt aber ebenfalls eine sehr geringe maximale Auslenkung.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Aktuatoren mit niedrigem Zinngehalt B-1

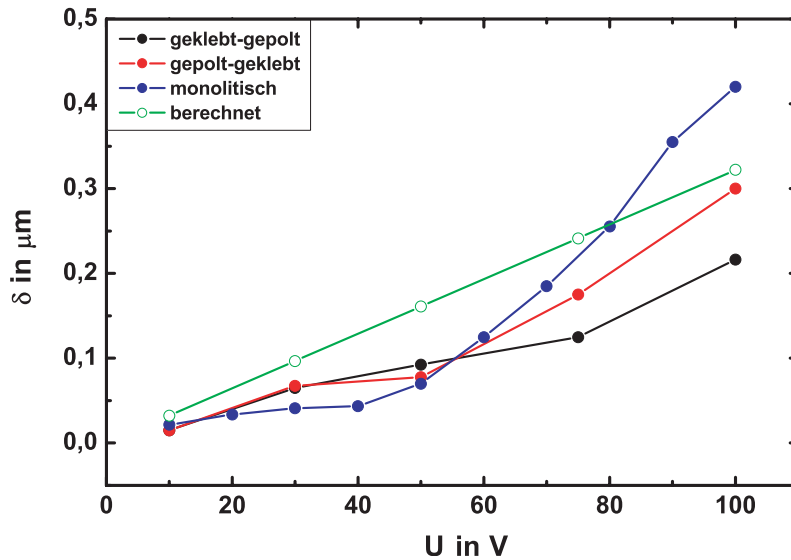


Abbildung 3.24: Die Abhängigkeit der maximale Auslenkung von der elektrische Spannung für den Aktuator B-1

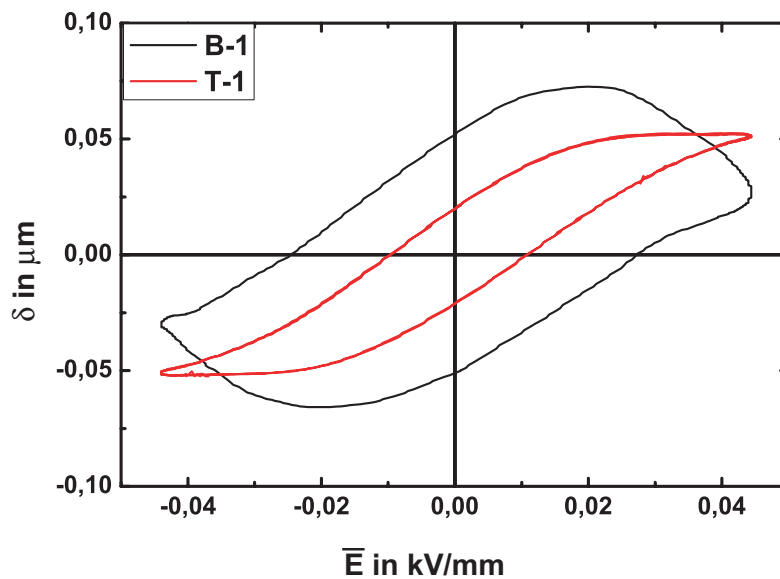


Abbildung 3.25: Biegehysterese von monolithischen Bi- und Trimorph mit geringem Zinngehalt bei 50 V und 137 Hz

und T-2 nur sehr kleine Biegeauslenkung zeigen und stark von nichtlinearen Effekten beeinflusst sind. Deshalb sind diese Konfigurationen für Biegeelemente nicht geeignet.

3.7.4 Biegeverhalten von Aktuatoren mit höherem Zinngehalt

Das Biegeverhalten von Aktuatoren mit höherem Zinngehalt unterscheidet sich deutlich von denen mit niedrigem Zinngehalt. Erwartungsgemäß sollten die Aktuatoren mit 7.5 bis 15 mol% Sn auf Grund des größeren Unterschiedes in den piezoelektrischen Eigenschaften eine größere Biegeauslenkung zeigen. In Abb. 3.26 ist die Auslenkung von monolithischen Bi-, Tri- und 4-morphen (B-2, T-2, V-2) bei 50 V dargestellt. Die Messungen wurden ebenfalls bei Raumtemperatur und 137 Hz durchgeführt. Die Kurven zeigen eine deutlich geringere Hysterese und eine wesentlich höhere Auslenkung als die Aktuatoren mit geringem Zinngehalt. Die maximale Auslenkung des 4-morphs ist 6 mal höher als die des Bimorphs B-1. Andererseits ist aber auch festzustellen, dass die nichtlinearen Effekte

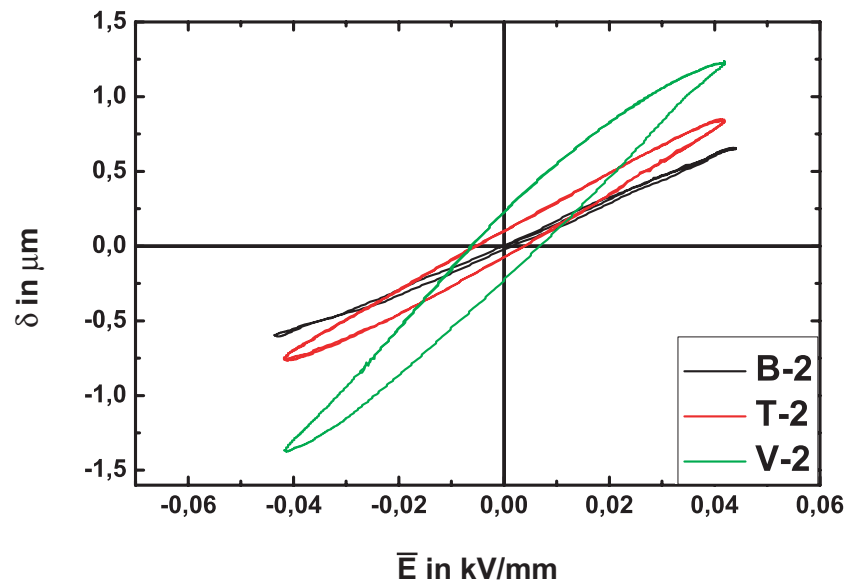


Abbildung 3.26: Biegeauslenkung von monolithischen Bi-, Tri- und 4-morph (B-2, T-2, V-2) mit hohem Sn-Gehalt bei 50 V und 137 Hz

- Vergrößerung der Biegehysterese - mit zunehmender Anzahl der Pulverschichten leicht zunehmen. Es ist deshalb anzunehmen, dass eine Verbesserung des Gradienten immer zu einer Vergrößerung der Nichtlinearität im Biegeverhalten führen wird. Andererseits wurde gezeigt, dass der Gradient des Zinngehalts im 4-morph V-2 bereits schon fast linear ist, so dass eine weitere Erhöhung der Schichten wohl zu keiner weiteren Zunahme der Nichtlinearität führen sollte. (s. Abb. 1.7). Die Abhängigkeiten der maximale Auslenkung von geklebten und monolithischen Aktuatoren von der angelegten elektrischen Spannung sind in Abb. 3.27 miteinander verglichen. Die höchste Auslenkungen erreichen die Modell-Aktuatoren, bei denen die Schichten beim Polen nur elektrisch verbunden wurden und anschließend zusammengeklebt wurden (gepolte-geklebt). In dieser Modellstruktur waren die Schichten während der Polung mechanisch frei. Vermutlich haben die Schichten deshalb ein wenig höhere piezoelektrische Koeffizienten. Die niedrigste

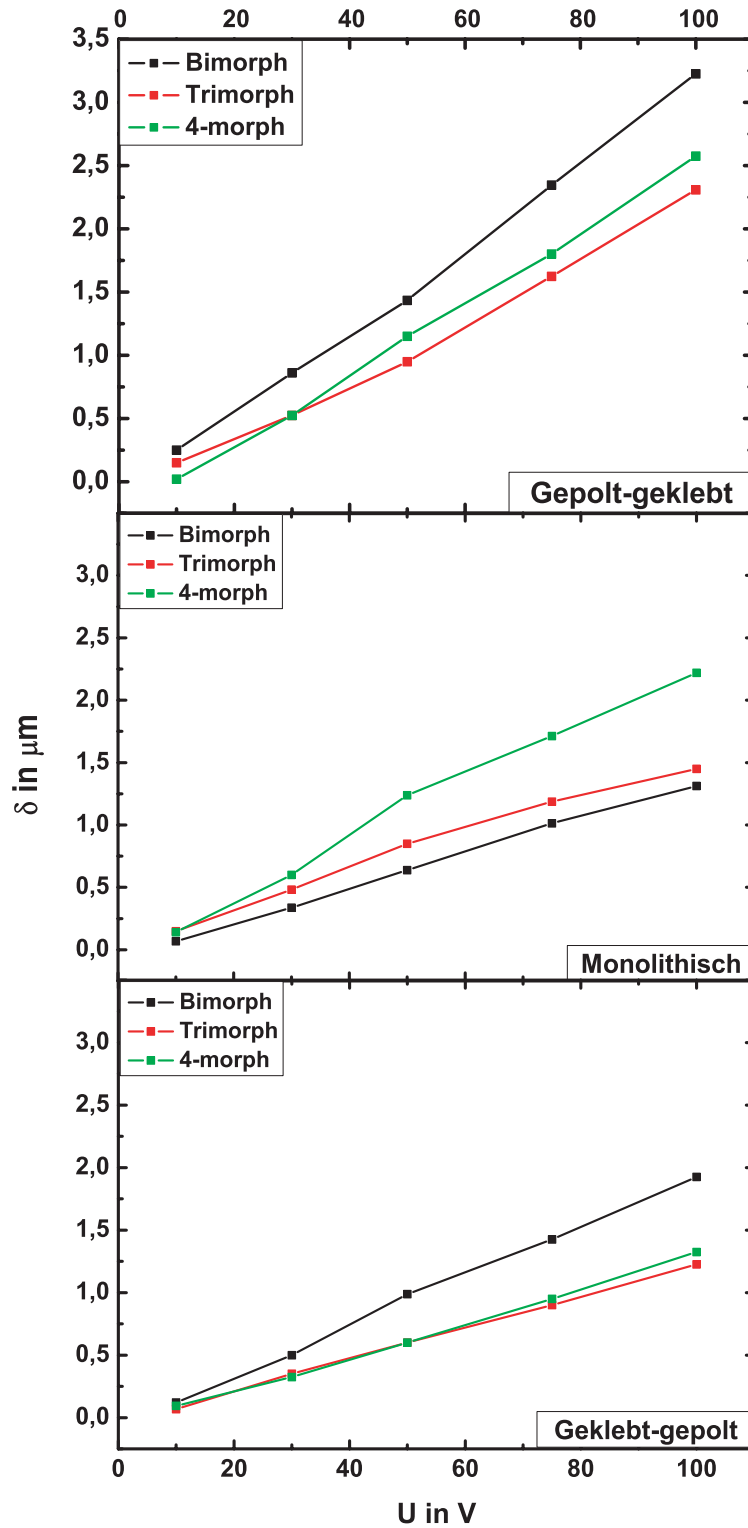


Abbildung 3.27: Auslenkung als Funktion der Anregungsspannung für gepolt-geklebt, monolithische und geklebt-gepolt B-2, T-2 und V-2. Probendicke beträgt immer 1.1 mm

maximale Auslenkung haben die geklebt-gepolt Aktuatoren, bei denen die Polung erst nach dem Zusammenkleben durchgeführt wurde. Obwohl bei der Untersuchung des Polungsverhaltens keine großen Abweichungen zwischen diesen Proben festgestellt wurden, gibt es im Biegeverhalten doch deutliche Unterschiede. Dies kann sowohl auf die mechanische Klemmung beim Polen als auch auf den Einfluss der Klebeschicht auf das Polen zurückgeführt werden. Die Klebeschicht fehlt bei den monolithischen Aktuatoren, die insbesondere beim 4-morph ein deutlich besseres Biegeverhalten zeigen als die geklebt-gepolteten Proben. Da aus der Theorie eigentlich folgt, dass mit zunehmender Schichtzahl die Biegung leicht abnimmt, im Experiment aber das Gegenteil beobachtet wurde, liegt die Schlussfolgerung nah, dass der annähernd lineare Zinngradient das Polungsverhalten auf Grund der Verringerung der mechanischen Spannungen deutlich verbessert. Dafür spricht auch, dass mit Zunahme der Pulverschichten im monolithischen Aktuator, also mit Verbesserung des Gradienten die maximale Auslenkung zunimmt. So ist die Auslenkung des monolithischen 4-morphs vergleichbar mit dem gepolt-geklebten System, bei dem die Schichten im (mechanisch) spannungsfreien Zustand gepolt wurden.

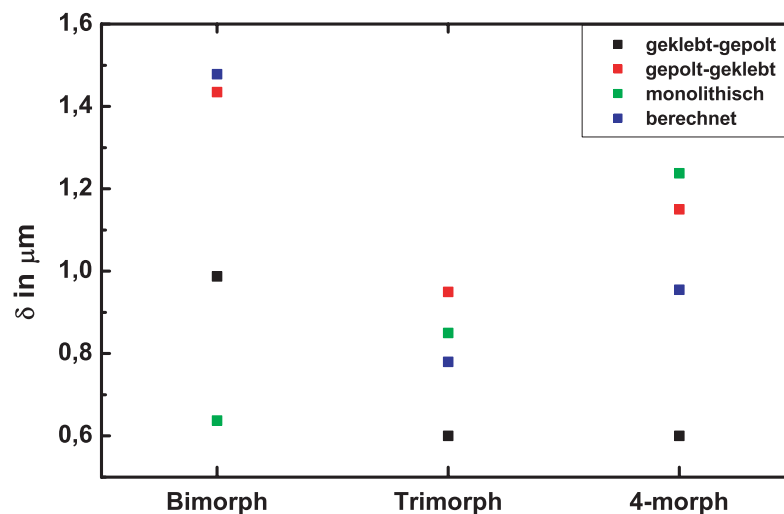


Abbildung 3.28: Auslenkung als Funktion der Anzahl der Schichten für monolithische Proben und Modellstrukturen im Vergleich zur Modellierung bei 50 V

Für den Vergleich von Experiment und linearer Modellierung wurden die Ergebnisse bei kleinen Feldstärken (Anregungsspannung 50 V) betrachtet, um nichtlineare Effekte möglichst auszuschließen. Die berechneten und gemessenen Werte der Auslenkung von B-2, T-2 und V-2 bei 50 V sind in Abb. 3.28 dargestellt. Für die Modellierung wurden die dielektrischen und piezoelektrischen Koeffizienten der gepolt-geklebten Proben verwendet, die jeweils nach dem Polen an den einzelnen Schichten bestimmt wurden, bevor diese zusammengeklebt wurden. Deshalb sind auch die Ergebnisse der Modellierung in erster Linie nur mit diesen Proben vergleichbar, eine gute Übereinstimmung kann dabei

festgestellt werden. Qualitativ stimmen auch die Werte der geklebt-gepolten Proben mit der Modellierung überein. Die deutlich geringeren Werte sind auf die bereits diskutierte schlechtere Polung auf Grund mechanischer Klemmung zurückzuführen. Bei beiden Modellstrukturen ist jedoch wie auch bei der Modellierung eine leichte Zunahme der Biegung beim 4-morph zu beobachten. Dies widerspricht nur scheinbar der Biegetheorie aus Abschnitt 3.7.2, nach der die Auslenkung mit zunehmender Schichtzahl abnehmen sollte. Es müssen hier insbesondere zwei Aspekte berücksichtigt werden. Zum einen sind die Schichten teilweise nur unvollständig gepolt, so dass der Zinngradient nicht zwangsläufig zu einem entsprechenden Gradienten der piezoelektrischen Eigenschaften führt. Zum anderen beeinflussen die dielektrischen Eigenschaften der zusätzlichen inneren Schichten beim Tri- und 4-morph die Verteilung der elektrischen Feldstärke zusätzlich.

Die monolithischen Aktuatoren besitzen Übergangsbereiche zwischen den ursprünglichen Pulverschichten, in denen die Zinnkonzentration wegen der Diffusion beim Sintern sich stetig ändert, und deren Eigenschaften unbekannt sind. Obwohl diese Bereiche in der Modellierung nicht berücksichtigt wurden, kann außer beim Bimorph doch eine gute Übereinstimmung mit der Theorie festgestellt werden. Die Auslenkung erreicht im Gegensatz zu den geklebt-gepolten Proben vergleichbare Werte wie die gepolt-geklebten Aktuatoren. Der Funktionsgradient sorgt offensichtlich für eine Verringerung der mechanischen Spannung in der Probe, die nicht nur die Funktionstüchtigkeit des Aktuators verbessern kann, sondern bereits beim Polungsvorgang dafür sorgt, dass das Ergebnis vergleichbar mit einzeln gepolten Schichten wird.

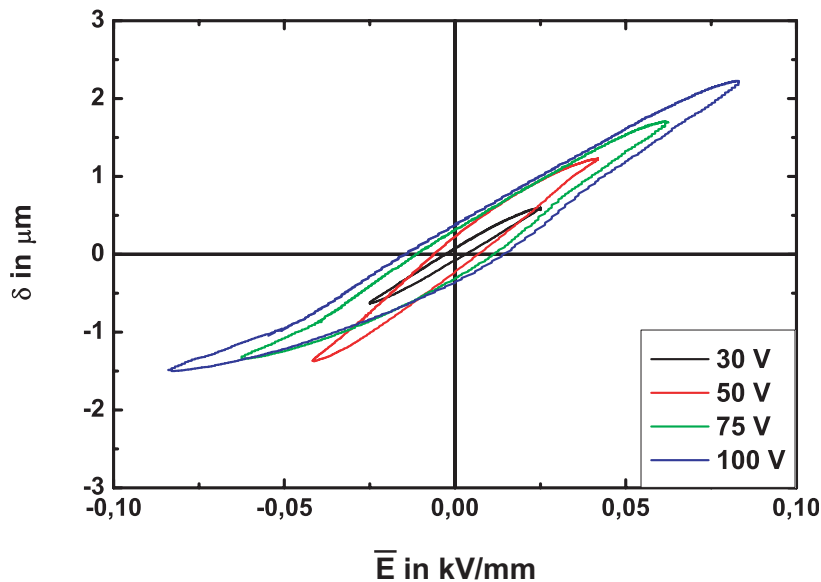


Abbildung 3.29: Biegehysteresen eines monolithischen 4-morph V-2 bei 137 Hz

Im Gegensatz zu den Aktuatoren mit geringem Zinngehalt ist das Biegeverhalten der Proben mit höherem Zinngehalt bei größeren Feldstärken stark vom Vorzeichen der Anregungsspannung abhängig (s. Abb. 3.29). Ab einer Spannung von 75 V wurden

bei den hier untersuchten Proben deutliche Unsymmetrien der Auslenkung zwischen der positiven und negativen Spannungsrichtung beobachtet. Dabei entsprach die positive Richtung der Polungsspannung. Wird das Gradientenmaterial in entgegengesetzter Richtung angeregt, so kann es in einigen Bereichen (Schichten) zur Depolarisierung oder bei höheren Spannungen sogar zur Umpolung kommen, wenn das lokale Feld die Koerzitivfeldstärke überschreitet. Diese ist bei höherem Zinngehalt geringer. Die Depolarisierung von Teilbereichen verringert selbstverständlich die Biegeauslenkung. Wird die Spannung in negativer Richtung noch weiter erhöht, so kann man sogar eine positive Biegeauslenkung erzeugen. Die Auslenkungskurve nimmt dann eine Form an, die der Dehnungs-Feldstärke-Kurve von Ferroelektrika (Schmetterlingskurve) ähnelt. Bis zu einem gewissen Grad sind diese Effekte reversibel und können mit einer erneuten Polung rückgängig gemacht werden. Für Anwendungen ist das Depolarisieren oder gar Umpolen jedoch ungeeignet, da die maximale Auslenkung eher verringert wird. In der Praxis werden Biegeaktuatoren deshalb unipolar in Richtung der Polungsspannung betrieben.

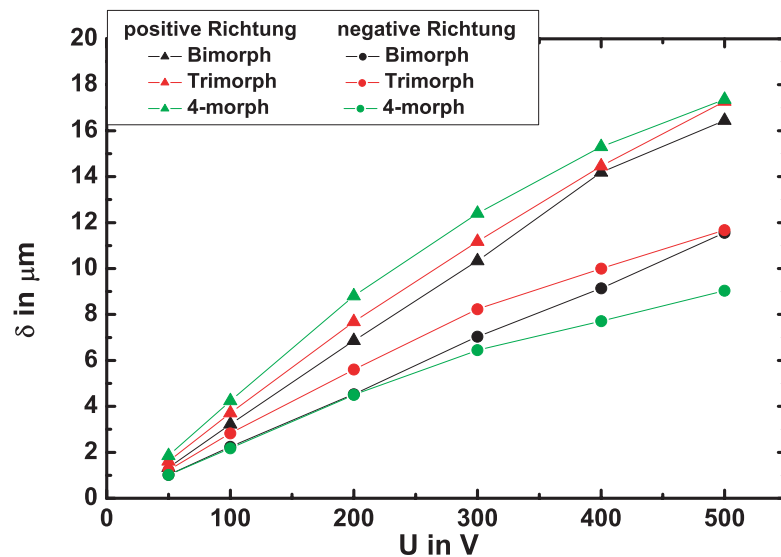


Abbildung 3.30: Abhängigkeit des Biegeverhaltens monolithischer Aktuatoren mit hohem Zinngehalt von Polungsrichtung und Größe der Anregungsspannung bei 137 Hz

Eine solche unipolare Anregung bis 500 V wurde bei der folgenden Untersuchung des Einflusses der Richtung des Polungsfeldes verwendet. Bei der Diskussion des Polungsverhaltens der Aktuatoren wurde gezeigt, dass die Auslenkung des Systems davon abhängt, an welcher Seite - BTS7.5 oder BTS15 - die Polungsspannung angelegt wurde. In Abb. 2.20 wurden die Polungsrichtungen als positiv und negativ bezeichnet. In Abb. 3.30 ist die maximale Auslenkung von unterschiedlich gepolten monolithischen Aktuatoren als Funktion der Anregungsspannung dargestellt. Es wurden jeweils drei Aktuatoren in positiver Richtung und drei in negativer Richtung gepolt. Die unipolare

Anregungsspannung wurde immer in Polungsrichtung angelegt und betrug maximal 500 V. Nach dem bereits beschriebenen nichtlinear zunehmenden Anstieg der Auslenkung bei Spannungen > 50 V, kommt es bei einer weiteren Spannungserhöhung zu einem leichten Abflachen der Kurve. Insgesamt kann die Biegeauslenkung im untersuchten Bereich in erster Näherung allerdings als linear abhängig von der Anregungsspannung bezeichnet werden.

Die Auslenkung der Aktuatoren in Abb. 3.30 ist bei gleicher Anregungsspannung höher als die in Abb. 3.27. Der Grund dafür liegt in der höheren Polungsfeldstärke von 2 kV/mm, mit der diese Proben gepolt wurden. Der Einfluss der Größe der Polungsfeldstärke wird im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

3.7.5 Vergleich des Biegeverhaltens von Aktuatoren mit verschiedener Verteilung der Eigenschaften

Der Vergleich des Biegeverhaltens der monolithischen Aktuatoren mit hohem und niedrigem Zinngehalt zeigt, dass große piezoelektrische Koeffizienten der Schichten (bei niedrigen Zinngehalten, B-1, T-1) nicht automatisch hohe Auslenkungen garantieren. Entscheidend ist die Verteilung der Eigenschaften nach dem Polungsvorgang. In Abb. 3.31 wurden die Verteilungen des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} in den geklebten Trimorphen mit niedrigem (T-1) und hohem Zinngehalt (T-2) miteinander verglichen. Die

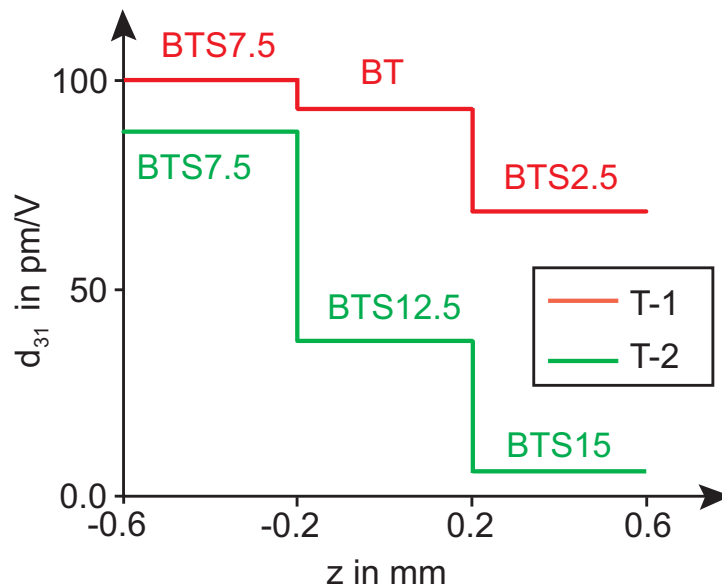


Abbildung 3.31: Graphische Darstellung der Verteilung des piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} in T-1 und T-2

Schichten von B-1 und T-1 haben alle große piezoelektrische Koeffizienten, aber der Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen Wert ist geringer als der bei B-2, T-2

und V-2. Zum Beispiel beträgt dieser Unterschied bei T-1 nur 25%, während er bei T-2 fast 96% ist. Der große Unterschied zwischen den piezoelektrischen Koeffizienten führt zu einem großen Unterschied zwischen den Dehnungen $S_1^{(i)}$ der Schichten, die letztlich für die Biegung verantwortlich sind. Der Vergleich der maximalen Auslenkungen von T-1 und T-2 bestätigt dies. In den Konfigurationen B-2, T-2 und V-2 mit hohem Zinngehalt ist diese Voraussetzung besser erfüllt.

In Abb. 3.31 ist außerdem gut zu erkennen, dass insbesondere im System mit höherem Sn-Gehalt (T-2) die BTS7.5-Schicht mit dem höchsten piezoelektrischen Koeffizienten d_{31} nur unvollständig gepolt ist (vgl. auch Abb. 1.5). Im Trimorph T-1 ist der Polungsgrad dieser Schicht zwar höher, aber immer noch nicht ideal. Hier liegt auch das Potential für weitere Optimierungen, die im nächsten Kapitel diskutiert werden. Allerdings wurden dabei nur noch Systeme mit hohem Zinngehalt und hohen Auslenkungen untersucht.

Die Dehnung der einzelnen Schichten wird aber ebenso von den dielektrischen Eigenschaften bestimmt. Es ist leicht zu sehen, dass der Unterschied zwischen dem maximalen und minimalen Wert der Dehnung dann am größten wird, wenn in der Schicht mit dem höchsten piezoelektrischen Koeffizient d_{31}^{max} auch das höchste lokale elektrische Feld E_3^{max} entsteht. Andersherum sollte in der Schicht mit dem kleinsten piezoelektrischen Koeffizient d_{31}^{min} das lokale elektrische Feld E_3^{min} minimal sein. Die Gl. (3.43) beschreibt den maximalen bzw. minimalen Wert der Dehnung. Der Gradient der piezoelektrischen Eigenschaften muss also umgekehrt proportional zum Gradient der dielektrischen Eigenschaften sein, um eine möglichst maximale Biegung des monolithischen Biegers zu erzielen.

$$\begin{aligned} S_1^{max} &= d_{31}^{max} E_3^{max} = d_{31}^{max} \frac{U_{ges}}{h \varepsilon_{33}^{(min)} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(i)}}} \\ S_1^{min} &= d_{31}^{min} E_3^{min} = d_{31}^{min} \frac{U_{ges}}{h \varepsilon_{33}^{(max)} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_{33}^{(i)}}}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Deshalb zeigen die Systeme B-1, T-1 aus Schichten mit höheren piezoelektrischen Koeffizienten, aber mit relativ ähnlichen Dielektrizitätskonstanten, viel kleinere Auslenkungen als die Systeme B-2, T-2, V-2 aus der Schichten mit niedrigeren, aber sehr stark variierenden piezoelektrischen Koeffizienten und sehr verschiedenen Dielektrizitätskonstanten.

Generell kann man daraus die Schlussfolgerung ziehen, dass Aktuatoren mit guten Biegeeigenschaften nicht unbedingt aus ferroelektrischen Werkstoffen mit möglichst maximalen piezoelektrischen Eigenschaften (z.B. PZT, PMN) hergestellt werden müssen, sondern auch Keramiken oder Keramiksysteme mit geringeren piezoelektrische Eigenschaften (wie das $Ba(Ti, Sn)O_3$ -System) verwendet werden können. Entscheidend ist, wie stark die piezoelektrischen und dielektrischen Eigenschaften differieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass es dadurch relativ einfach sein sollte, bleihaltige Hochleistungskeramiken durch umweltverträglichere bleifreie Materialien zu ersetzen.