

Zusammenfassung

Keramische **Materialien mit einem Funktionsgradienten** (engl. Functionally graded materials - **FGM**) sind monolithische Werkstoffe mit in einer oder mehreren Richtungen veränderten Eigenschaften. Die in dieser Arbeit untersuchten Keramiken haben einen eindimensionalen Gradient der chemischen Zusammensetzung in Richtung der Probendicke. Die Eignung dieser Gradientenmaterialien für Biegeaktuatoren wurde untersucht. Während der Biegung steigt die mechanische Spannung im Aktuator stark an. Das verkürzt die Lebenszeit und verschlechtert die Zuverlässigkeit des Biegeaktuators. Die Verwendung von Gradientenmaterialien für Biegeaktuatoren sollte zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Verlängerung der Lebenszeit der Aktuatoren führen.

In dieser Arbeit wurde das Mischoxidsystem $\text{BaTi}_{(1-x)}\text{Sn}_x\text{O}_3 - \text{BaTi}_{(1-y)}\text{Sn}_y\text{O}_3$ (BTS) zur Herstellung monolithischer Keramik mit inhomogener chemischer Zusammensetzung verwendet. Die Eigenschaften dieser Keramik sind stark vom Zinngehalt abhängig. Zur Herstellung der Proben wurde das Mischoxidverfahren verwendet. Die Untersuchung der monolithischen inhomogenen $\text{Ba}(\text{Ti},\text{Sn})\text{O}_3$ -Keramik bestand aus zwei Teilen: Polungs- und Biegeverhalten des Gradientenmaterials.

Das Polungsverhalten der Aktuatoren wurden an Hand der Neukurven der Polarisierung und Dehnung untersucht. Es wurde gezeigt, dass sich im Gradientenmaterial der größte Teil der Polungsfeldstärke im Bereich mit der kleinsten spontanen Polarisierung konzentriert und nur dieser Bereich komplett gepolt wird. Je höher die spontane Polarisierung in einer Schicht ist, desto schlechter wird dieser Bereich gepolt. Trotz dieser nur teilweisen Polung insbesondere der stark piezoelektrisch aktiven Schichten, konnte ein ausreichender Gradient der piezoelektrischen und dielektrischen Eigenschaften erzeugt und nachgewiesen werden. Hier ergibt sich die Möglichkeit, durch Änderung der Parameter des Gradientenmaterials die Verteilung der Eigenschaften zu kontrollieren und zu optimieren.

Das Polungsverhalten des Gradientenmaterials zeigt eine starke Abhängigkeit von der Polungszeit. Je länger das elektrische Feld an ein solches Material angelegt wird, desto größer ist der Einfluss der Leitfähigkeit der verwendeten Keramik. Dadurch kann die Polarisierung in einer nur teilweise gepolten Schicht mit der Zeit weiter ansteigen und so den Polungsgrad verbessern. Es wurde ein Modell zur Beschreibung dieses Prozesses entwickelt und durch experimentelle Untersuchungen bestätigt.

Um die Auswirkungen des Funktionsgradienten auf das Biegeverhalten abzuschätzen, wurden analytische und numerische Modellierungen und experimentelle Ergebnisse miteinander verglichen. Es wurde gezeigt, dass dabei der Bimorph die maximale Auslenkung, aber auch die größte mechanische Spannung hat. Je besser der Gradient z.B. der piezoelektrischen Eigenschaften ist, desto geringer wird die Auslenkung und die mechanische Spannung. Für den Fall eines idealen Gradienten des piezoelektrischen Koeffizienten beträgt die Auslenkung des Biegeaktuators bei gleicher Anregungsspannung nur noch $2/3$ der Auslenkung eines Bimorphs. Jedoch geht die maximale mechanische Spannung gegen Null, das Biegeelement ist nahezu spannungsfrei. Die geringere Auslenkung im Gradientenmaterial kann durch eine Erhöhung der Anregungsspannung kompensiert werden. Selbst in diesem Fall bleibt bei gleicher Auslenkung die mechanische Spannung

im Gradientenmaterial um ein Vielfaches kleiner als im klassischen Bimorph.

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) bestätigte die beschriebenen Ergebnisse und war in sehr guter Übereinstimmung mit der analytischen Näherung. Bei der experimentellen Untersuchung des Biegeverhaltens wurde die Auslenkung eines einseitig fixierten Biegeaktuators in Abhängigkeit von kleinen Anregungsspannungen gemessen. Es wurden sowohl monolithische Gradientenmaterialien als auch entsprechende Modellstrukturen mit bis zu 4 Schichten untersucht. Die Ergebnisse waren in guter Übereinstimmung sowohl mit der analytischen Modellierung als auch mit der FEM. Das bedeutet, dass die in der analytischen Theorie gemachte eindimensionale Näherung ausreichend genau für die Beschreibung des Biegeverhaltens ist.

Im letzten Teil der Arbeit wurde mittels der gewonnenen Erkenntnisse über das Polungs- und Biegeverhalten die Biegeaktuatoren aus Gradientenmaterial optimiert. Am Beispiel des monolithischen 4-morph mit annähernd linearem Zinngradient ist es gelungen, durch die Erhöhung der Polungsfeldstärke in Richtung parallel zum Gradienten und Verlängerung der Polungszeit die Auslenkung deutlich zu erhöhen. Das führt zu der Schlussfolgerung, 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 piezoelektrischen Eigenschaften (wie das Ba(Ti,Sn)O₃-System) verwendet werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass es dadurch relativ einfach sein sollte, bleihaltige Hochleistungskeramiken durch umweltverträglichere bleifreie Materialien zu ersetzen.

Die Lebenszeit der verschiedenen Aktuatoren wurde durch Untersuchung der Abhängigkeiten des Biegeverhaltens von der Anzahl der elektrischen Zyklen bestimmt. Dabei blieben die maximalen Werte der Auslenkung bis $2 \cdot 10^5$ Zyklen konstant und nahmen danach um bis zu 10 % ab. Eine generelle Aussage über das Langzeitverhalten konnte nach den ersten Versuchen noch nicht getroffen werden. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Generell wurde bewiesen, dass es möglich ist, monolithische Keramiken mit einem chemischen Gradienten zu polen und den dadurch entstandenen Funktionsgradienten für die Anwendung als Biegeaktor zu nutzen. Im Idealfall wird der Aktuator mit linearem Gradient sogar ein nahezu spannungsfreies Biegeverhalten zeigen. In zukünftigen Arbeiten sollten noch weitere Optimierungen durchzuführen werden. So können z.B. die Schichtdicken oder die chemische Zusammensetzung verändert werden, um den Funktionsgradienten der piezoelektrischen und dielektrischen Eigenschaften zu optimieren. Die Grundlagen dafür wurden in dieser Arbeit dargelegt. Die theoretische und experimentelle Untersuchung des Polungsverhaltens bei längeren Polungszeiten von Mehrschichtsystemen sowie die Modellierung des nichtlinearen Biegeverhaltens wird die Aufgabe zukünftiger Arbeiten sein.