

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zielstellung der Arbeit war die experimentelle Charakterisierung verschiedener 1-3 Komposite hinsichtlich ihrer dielektrischen, piezoelektrischen und elastischen Eigenschaften und die Modellierung mittels analytischer und numerischer Verfahren. Der Vorteil der analytischen Lösung liegt dabei in ihrer einfachen Handhabbarkeit, d.h. Parametervariationen können schnell in der Lösung erfaßt werden. Die numerische Methode der finiten Elemente (FEM) ist besonders zur Berechnung komplexer 3-dimensionaler Strukturen geeignet. Weiterhin gestattet sie die Modellierung des dynamischen Verhaltens von 1-3 Kompositen.

Mit dem Schlickerguß-Verfahren hergestellte 1-3 Komposite dienen in zweierlei Hinsicht als Modellstruktur. Zum einen erlaubt das Verfahren die Herstellung periodischer und nicht-periodischer Anordnung runder oder quadratischer Keramikstäbchen in einer Polymermatrix. Damit konnte der Einfluß der inneren Struktur auf die Eigenschaften von 1-3 Kompositen experimentell untersucht werden. Zum anderen stehen die für die Modellierung dieser effektiven Materialeigenschaften unbedingt erforderlichen Eigenschaften der verwendeten Einzelkomponenten, der piezoelektrischen Keramik und des passiven Polymers, zur Verfügung. Aus der Literatur bekannte und selbst entwickelte analytische Näherungen erlauben die Berechnung der effektiven dielektrischen, piezoelektrischen und elastischen Materialkoeffizienten des 1-3 Komposits aus den Materialkoeffizienten der Einzelkomponenten. Dabei werden der Oberflächeneffekt (ungleichmäßige Verformung der Oberfläche beim Anlegen eines elektrischen Feldes), die geometrische Form und Anordnung der Keramikstäbchen im Polymer sowie das Aspektverhältnis (Höhe : Breite) der Stäbchen nicht berücksichtigt. Der Einfluß dieser Faktoren wurde mit Hilfe der FEM untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß die effektiven Materialkoeffizienten des 1-3 Komposits in erster Linie nur von den Eigenschaften der Einzelkomponenten sowie deren Volumengehalt abhängen. Die Anordnung und Form der Keramikstäbchen spielte hingegen keine Rolle. Einzige Ausnahme unter den untersuchten Koeffizienten bildete die effektive elastische Nachgiebigkeit  $s_{11,eff}^E$ . Hier wurden für geringe PZT-Volumenanteile unterschiedliche Werte für quadratische und hexagonale Anordnungen gemessen, die auch durch FEM-Rechnungen erklärt werden konnten.

Das Aspektverhältnis der Stäbchen ist wichtig für die Größe des Oberflächeneffektes. Je kleiner das Verhältnis ist, um so größer ist der Einfluß der Oberflächenverformung auf die Gesamtverschiebung der Oberfläche und damit auf die piezoelektrischen Koeffizienten. Es wurde gezeigt, daß dies bei dem verwendeten quasistatischen Meßverfahren und den untersuchten Modellstrukturen für die Messungen des Koeffizienten  $d_{31,eff}$  berücksichtigt werden muß, auf die Messung des Koeffizienten  $d_{33,eff}$  jedoch keinen Einfluß hat.

Die Finite-Elemente-Methode wurde außerdem verwendet, um die dynamischen Eigenschaften von 1-3 Kompositen in Hinblick auf ihre Anwendung als Ultraschallwandler zu modellieren. Für die Auswertung von Impedanzspektren ist die Kenntnis und Zuordnung der Schwingungsmoden Voraussetzung. Bei Kompositen mit einer periodischen quadratischen Anordnung der Stäbchen sind zwei laterale Schwingungsmoden bekannt. Liegen sie im Bereich

der Dickenschwingung, so kommt es zu einer Verringerung des Kopplungsfaktors  $k_t$  und des Schalldrucks. Für 1-3 Kompositen mit einer hexagonalen Anordnung der Stäbchen konnte gezeigt werden, daß auf Grund der Periodizität ebenfalls zwei laterale Moden möglich sind. Allerdings wird die zweite auf Grund der starken Dämpfung experimentell nicht beobachtet. Bei gleichem Volumengehalt und Aspektverhältnis der Keramikstäbchen liegt die 1. laterale Resonanz bei hexagonaler Anordnung bei höheren Frequenzen als bei quadratischer Anordnung. Damit ist die vor allem bei Kompositen mit geringen Volumengehalten auftretende Kopplung mit der Dickenresonanz wesentlich schwächer. Durch die Verwendung materialspezifischer Dämpfungskonstanten gelang es, die experimentell bestimmten Impedanzspektren periodischer und nichtperiodischer Modellstrukturen mit Hilfe der FEM zu modellieren. Das eröffnet die Möglichkeit, in Zukunft periodische 1-3 Komposite bereits vor der Herstellung in Hinblick auf eine möglichst ungestörte Dickenresonanz zu optimieren.

Auf der Basis analytischer Lösungen wurde weiterhin eine Methode zur Berechnung der wichtigsten dielektrischen, piezoelektrischen und elastischen Koeffizienten der aktiven Komponente aus den effektiven Compositeigenschaften entwickelt und zur Beurteilung ihrer Genauigkeit eine Fehlerrechnung durchgeführt. Die experimentelle Überprüfung erfolgte mit den Modellstrukturen aus dem Schlickerguß-Verfahren. Aus den effektiven Eigenschaften der Komposite wurden die Materialkoeffizienten der Keramik (PIC151) berechnet. Die Koeffizienten  $s_{33,a}^E$ ,  $d_{33,a}$  und  $\epsilon_{33,a}^T$  stimmen gut mit den Daten überein, die vom Pulverhersteller PI Ceramics GmbH für Bulkkeramiken angegeben werden. Die Berechnung des elastischen Koeffizienten  $s_{33,a}^E$  erfolgte dabei aus der effektiven Steifigkeit  $c_{33,eff}^E$ , die aus der Dickenresonanz einer dünnen Kompositscheibe bestimmt wurde. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung des effektiven Koeffizienten  $s_{33,eff}^E$ . Dazu wird die Längsresonanz eines Zylinderschwingers gemessen. Diese erforderliche Geometrie läßt sich jedoch mit dem Schlickerguß-Verfahren nicht realisieren. Deshalb wurde hier ein 1-3 Komposit mit ALCERU®- Fasern als Modellstruktur verwendet.

Die Methode ist sehr gut geeignet, die Materialparameter dünner piezoelektrischer Keramikfasern zu bestimmen. Konventionelle Meßverfahren sind für Einzelfasern ungeeignet. Daher wurden die Fasern in Polymer eingebettet und aus den effektiven Eigenschaften des Faserkomposits die Materialkoeffizienten der Fasern berechnet. Es wurden undotierte PZT-Fasern mit einem Zr/Ti-Verhältnis zwischen 48/52 und 58/42 untersucht. Die dielektrischen, piezoelektrischen und elastischen Koeffizienten besaßen bei einem Zr-Gehalt von 53 mol% ein Maximum. XRD-Untersuchungen zeigten, daß bei dieser Zusammensetzung in den PZT-Fasern eine Koexistenz von tetragonaler und rhomboedrischer Phase vorliegt. Die Existenz einer solchen morphotropen Phasengrenze und das dort auftretende Maximum der Eigenschaften ist vergleichbar mit undotierten PZT-Bulkkeramiken. Die absoluten Werte der piezoelektrischen Koeffizienten der Fasern lagen jedoch teilweise deutlich unter den Werten der Bulkkeramiken. Eine Verbesserung der elektromechanischen Eigenschaften der Fasern kann durch Dotierungen erreicht werden. Erste Untersuchungen haben gezeigt, das Nd-dotierte PZT-Fasern deutlich höhere Piezokoeffizienten ( $d_{33,a} > 300$  pm/V) aufweisen. Es wird ebenfalls ein Maximum der

Eigenschaften an der morphotropen Phasengrenze beobachtet, die jedoch zu höheren Zr-Gehalten verschoben ist. Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Bestimmung der Materialkoeffizienten der Fasern leistet einen wichtigen Beitrag bei der Verbesserung des Herstellungsprozesses und der Optimierung der Fasereigenschaften.

Die beschriebenen experimentellen Untersuchungen sowie die Modellierung bezogen sich fast ausschließlich auf die Kleinsignaleigenschaften der 1-3 Komposite bzw. der piezoelektrischen Fasern. Die elektrischen und mechanischen Belastungen waren so gering, daß das Verhalten der Komposite als linear und ihre Materialkoeffizienten als konstant betrachtet werden konnten. Einzige Ausnahme war das in Abschnitt 3.2.2 diskutierte Polungsverhalten. Die dort verwendete nichtlineare FEM-Modellierung sowie die in [92] vorgestellten Ergebnisse bilden die Grundlage für die Modellierung des nichtlinearen Großsignalverhaltens von 1-3 Kompositen. Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten sollte die enge Verbindung von Modellierung und experimentellen Untersuchungen sein. Eine Hauptaufgabe wird dabei die Bestimmung der für die FEM-Modellierung notwendigen Materialparameter sein. Insbesondere ist hierbei auf die Eigenschaften des Polymers zu achten. Dies gilt ebenso für die Kleinsignaleigenschaften. Sowohl bei der Modellierung der effektiven Kompositeigenschaften als auch bei der Berechnung der Faserparameter wurden die Eigenschaften des Polymers als konstant angenommen. Ziel zukünftiger Untersuchungen sollte daher auch die Frequenzabhängigkeit insbesondere der mechanischen Eigenschaften des Polymers und der Einfluß auf den Komposit sein. Dazu erscheint es sinnvoll, auch verschiedene Polymere als passive Komponente zu verwenden.