

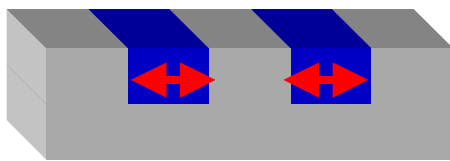
## Berechnungsmodell für das elektromechanische Verhalten von flächigen Piezofaser-Metall-Modulen

Burkhard Kranz, Welf-Guntram Drossel

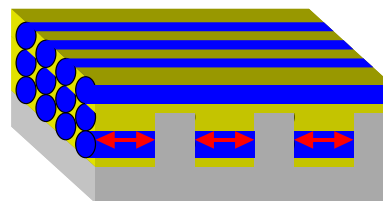
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz/Dresden

### 1 Einleitung

Die Prozesskette *Umformen/Blech* des Sonderforschungsbereiches/Transregio 39 *PT-PIESA* beschäftigt sich mit der Gestaltung eines in eine flächige Metallstruktur integrierten Sensor/Aktor-Funktionsbereiches durch das direkte Einbringen von Piezofasern bzw. Piezofaserkompositelementen in die Blechstruktur mit dem Potential einer nachfolgenden plastischen Formgebung der umgebenden Bereiche des Konstruktionswerkstoffs. In Bild 1 sind zwei prinzipielle Ausführungsformen von Piezo-Metall-Verbunden dargestellt, zum einen unter Verwendung von massiven Einzelfasern bzw. -stäben und zum anderen unter Verwendung von Piezofaserkomposit. Im weiteren wird das einzubringende piezoelektrische Material vorerst als homogenes Material betrachtet und als Piezofaser bezeichnet.



Einzelfaser quer



Komposit geschlitzt

Bild 1: Prinzipielle Ausführungsformen von Piezo-Metall-Verbunden

Ziel des Teilprojektes C1 ist die Entwicklung eines methodischen Vorgehens auf der Grundlage der Finiten-Elemente-Methode, mit dessen Hilfe die Auslegung der elektro-mechanischen Interaktion für die funktionelle und geometrische Gestaltung eines solchen Piezofaser-Metall-Verbundes möglich ist. Dabei bildet die Homogenisierung der Parameter zur Materialbeschreibung des Verbundes einen Schwerpunkt. Die *Homogenisierung der Materialparameter* ist notwendig, um den Piezofaser-Metall-Verbund mit vertretbarem Berechnungsaufwand in Modelle übergeordneter Strukturebenen (Bauteil, Maschinen-/Anlagenkomponenten, Gesamtmaschine) integrieren zu können.

Andererseits soll das Berechnungsverfahren auch Aussagen zu den Beanspruchungen des Piezofaser-Metall-Verbundes und seiner Einzelkomponenten, insbesondere des Piezomaterials, infolge äußerer Belastung z. B. durch Umformen des Halbzeugs liefern. Dies soll durch *Lokalisierung der Beanspruchungen* erreicht werden.

### 2 Finite-Elemente-Modell

Ausgehend von der periodischen Struktur des Piezofaser-Metall-Verbundes (vgl. Bild 2) werden die Untersuchungen mithilfe eines repräsentativen Teilvolumens (Einheitszelle) durchgeführt.

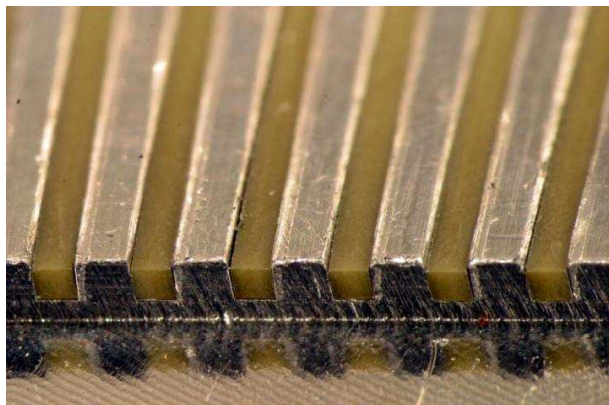


Bild 2: Versuchsmuster eines Piezofaser-Metall-Verbundes (aus [1], Vorarbeiten zum Teilprojekt A2: Mikrostrukturierung und Integrationstechnologie)

Die methodische Entwicklung erfolgt anhand eines 2-D-Modells der Einheitszelle (vgl. Bild 3). Die Geometrie des Piezofaser-Metall-Verbundes wird durch den entsprechenden Querschnitt repräsentiert. Die elektrische Ansteuerung des in der aktuellen Bearbeitungsphase favorisierten Designs mit elektrischer Kontaktierung der Piezofasern an den mechanischen Kontaktflächen zwischen Piezofaser und isoliertem Metall führt zu Verformungen in der Querschnittsebene, die ebenfalls durch ein 2-D-Modell abgebildet werden können.

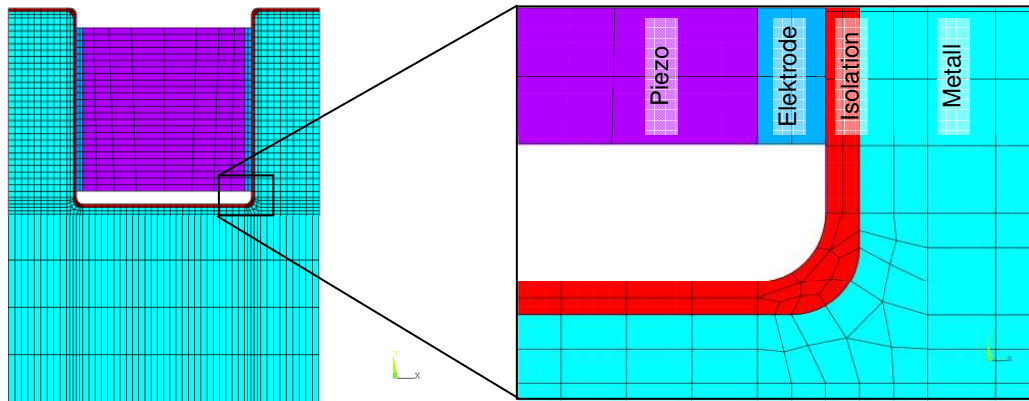


Bild 3: Finite-Elemente-Modell der Einheitszelle (ANSYS)

Wie aus Bild 3 ersichtlich ist, werden im Modell folgende Modulbestandteile geometrisch berücksichtigt:

- metallischer Grundkörper,
- Isolationsschicht,
- Elektroden,
- Piezofaser.

Dabei werden metallischer Grundkörper und Isolationsschicht als unmittelbar mechanisch verbunden betrachtet, ebenso wie Piezofaser und Elektroden. Zwischen Elektroden und Isolationsschicht sind im Finite-Elemente-Modell Kontaktelemente angeordnet, die sowohl lösbaren mechanischen Kontakt als auch elektrischen Kontakt abbilden und damit die Veränderung der elektrischen Feldverteilung bei partiellem Abheben der Piezofaser von der Wandung der Kavität beschreiben können.

Um die Kompatibilität des elektrischen Freiheitsgrades (elektrisches Potential) und der zugehörigen Kraftgröße (elektrische Ladung) auch zwischen den verschiedenen Modellbestandteilen gewährleisten zu können, ist es erforderlich, alle Materialien als piezoelektrisch zu vereinbaren. Damit wird sichergestellt, dass die entsprechende Kraftgröße im gesamten Modell die *negative* elektrische Ladung ist. Dies resultiert aus der entsprechenden Umsetzung des piezoelektrischen Materialverhaltens im verwendeten Programmsystem ANSYS [2]. Nicht-piezoelektrisches Verhalten ist durch Nullsetzen der entsprechenden Materialparameter bzw. Verwendung vernachlässigbar kleiner Werte zu definieren.

### 3 Homogenisierung und Lokalisierung

Ansatzpunkt der methodischen Entwicklung zur Homogenisierung der Materialparameter und Lokalisierung der Beanspruchungen für die Piezofaser-Metall-Verbunde ist das in [3] für elastische Komposite vorgestellte und in [4] und [5] für piezoelektrische Materialien erweiterte Verfahren.

Kernpunkt dieser Einheitszellenmethode ist die Gleichheit der Formänderungsenergie der betrachteten Einheitszelle und des effektiven (gemittelten) Materials. Dabei müssen für piezoelektrische Materialien sowohl der elastische, der dielektrische und der piezoelektrische Energieanteil betrachtet werden. Durch geeignete Verwendung von Einheitslastfällen am Modell der Einheitszelle, die Richtungskomponenten der Verzerrung bzw. des elektrischen Feldes betreffend, können die entsprechenden homogenisierten Materialparameter (Elastizitätskonstanten, piezoelektrische Konstanten und Dielektrizitätskonstanten) bestimmt werden. Die bei Berechnung der Einheitslastfälle ermittelten Phasenkonzentrationstensoren (z. B. Dehnungsverteilung in den Komponenten/Phasen des repräsentativen Volumens infolge äußerem elektrischem Feld) werden als Skalierungsfaktoren für die mit homogenisiertem Material bestimmten Beanspruchungen verwendet,

um die Beanspruchungen der Komponenten/Phasen der Einheitszelle zu berechnen. Für eine detailliertere Beschreibung der Methode sei auf die angegebene Literatur [3] und [4] verwiesen. Voraussetzung für die Anwendung dieses Vorgehens ist, dass am Rand der Einheitszelle kein wesentlicher Beanspruchungsgradient auftritt. Das bedeutet, dass die Einheitszelle klein in Bezug auf die globalen Beanspruchungsgradienten sein muss.

Diese Voraussetzung ist für den Piezofaser-Metall-Verbund in Blechausführung, wie er im Rahmen des SFB/TR 39 untersucht wird, nicht gegeben. In Bild 4 wird beispielhaft die mechanische Spannungsverteilung bei Wirken eines elektrischen Feldes an den Piezofasern für ein 2-D-Gesamtmodell eines Piezofaser-Metall-Moduls und im Bereich eines repräsentativen Teilvolumens dargestellt.

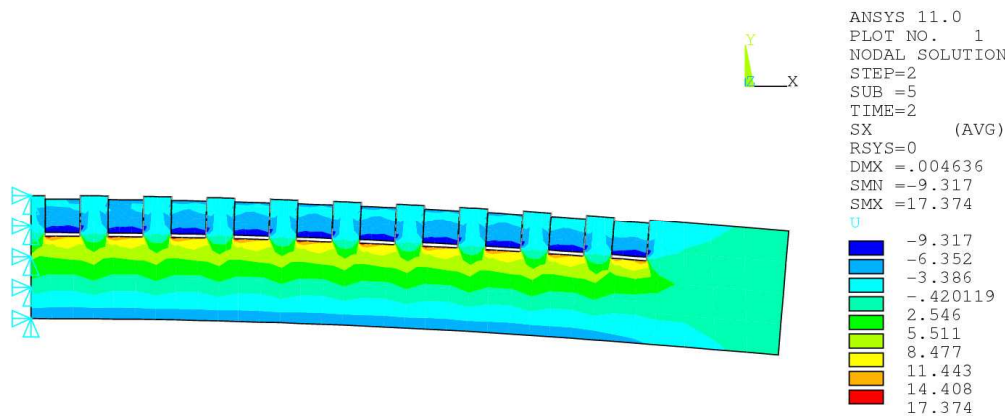


Bild 4: Mechanische Spannungen eines Piezofaser-Metall-Verbundes infolge elektrischer Ansteuerung

Das repräsentative Teilvolumen erstreckt sich über die Gesamthöhe des Blechmoduls. Das Modell der Einheitszelle muss dementsprechend nicht nur homogene Beanspruchung an den Rändern abbilden können, sondern auch Biegebeanspruchung.

Die Beziehungen zwischen den Freiheitsgraden (Verschiebungen und elektrisches Potential) an gegenüberliegenden Rändern der Einheitszelle müssen in einem ersten Ansatz so modifiziert werden, dass sie nicht nur die Periodizität (periodische Randbedingungen) abbilden, sondern auch linear über dem Rand verlaufende Verzerrungen einprägen können. Für die Zwangsbedingung zwischen den Verschiebungen in x-Richtung an zugeordneten Knoten gegenüberliegender Ränder  $x = x_0 = \text{const}$  ergibt sich beispielhaft<sup>1</sup>:

$$-u_{x,l} + u_{x,r} = S_{xx,0} \cdot l_{EZ,x} + S_{xx,1} \cdot l_{EZ,x} \cdot \left( \frac{y}{l_{EZ,y}} - \frac{1}{2} \right)$$

- mit
- $u_{x,l}$  ..... Verschiebung in x-Richtung am linken Rand
  - $u_{x,r}$  ..... Verschiebung in x-Richtung am rechten Rand
  - $l_{EZ,x}$  ..... Länge der Einheitszelle in x-Richtung
  - $l_{EZ,y}$  ..... Länge der Einheitszelle in y-Richtung
  - $S_{xx,0}$  ..... Einheitsdehnung Membrananteil
  - $S_{xx,1}$  ..... Einheitsdehnung Biegeanteil

Bild 5 gibt die Verteilung der mechanischen Spannungen infolge Einheitsbiegebelastung der Einheitszelle sowie den mechanischen Kontaktstatus zwischen Piezofaser/Elektrode und Grundkörper/Isolationsschicht bei vorspannungsfreier Integration der Piezofasern wieder.

<sup>1</sup> Der Anteil aus der Schubverzerrung wurde nicht mit angegeben.

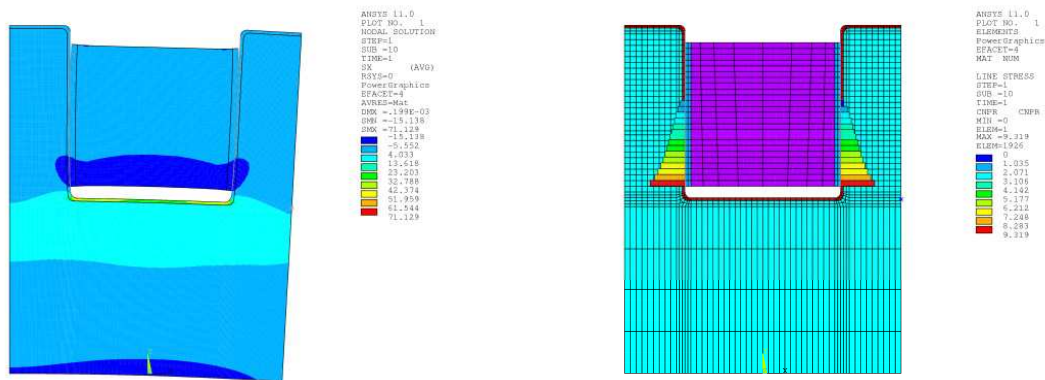


Bild 5: Mechanische Spannungen und mechanischer Kontaktdruck in der Einheitszelle infolge Einheitsbiegebelastung

Vorspannungsfreie Integration der Piezofasern führt infolge der Biegeverformung des Grundkörpers zu nur partiellem mechanischem Kontakt, d. h. die Lastübertragung erfolgt nur über Teilflächen der Piezofasern.

Auch eine gleichmäßige mechanische Vorspannung der Piezofasern z. B. durch ein gleichmäßiges Übermaß (Piezofaserbreite bzgl. Kavitätsbreite) führt zu diesem Effekt, da bereits diese mechanische Vorspannung zu einer Biegeverformung führt (vgl. Bild 6).

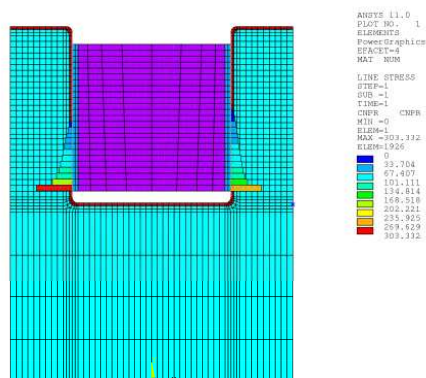


Bild 6: Mechanischer Kontaktdruck bei Integration der Piezofasern mit Vorspannung (geometrisches Übermaß Piezofaser – Kavität)

Im weiteren sind also Möglichkeiten zu suchen, die ein partielles mechanisches Lösen der Piezofasern von den Wänden der Kavitäten verhindern. Die aus den Überlegungen zur Simulation resultierende Idee, die Kavitäten mit einem Hinterschnitt zu versehen (keine senkrechten Wände, oben engere Öffnung als unten), bereitet sowohl bei der Mikrostrukturierung (Teilprojekt A2) als auch bei dem Aufbringen der Isolatorschicht (Teilprojekt A3) Schwierigkeiten.

#### 4 Ausblick

Mit dem vorgestellten Modell der Einheitszelle des Piezofaser-Metall-Moduls steht ein parametrisiertes Finite-Elemente-Modell zur Verfügung, mit dem homogenisierte Materialparameter zur Beschreibung des elektro-mechanischen Verhaltens der Piezofaser-Metall-Module ermittelt werden können. Bei dieser Homogenisierung ist zu beachten, dass durch elektrische Ansteuerung des homogenisierten Modells eine Biegeverformung hervorgerufen wird. Dies ist möglicherweise durch ein geschichtetes/gradientes Material abzubilden.

Bei der Lokalisierung der Beanspruchungen sind die Beanspruchungen am homogenisierten Modell in Membran- und Biegebeanspruchungen aufzuteilen, um eine entsprechende Zuordnung zu den Phasenkonzentrationssensoren der Einheitslastfälle an der Einheitszelle vornehmen zu können.

Mit den Aussagen zu den Beanspruchungen der Komponenten des Piezo-Metall-Verbundes wird eine Bewertung konkreter Parameter dieser Module (Abmessungen, Materialien) hinsichtlich günstiger

---

Gestaltung der Integration (Teilprojekt A2: Mikrostrukturierung und Integrationstechnologie) sowie zulässiger Belastung z. B. bei Umformung (Teilprojekte B1/B2: Formgebung) möglich sein.

## 5 Literatur

- [1] Schubert, A.: Technologiestudie zum Fügen von Piezofasern und Blech; Interner Bericht, Fraunhofer IWU/TU Chemnitz 2006
- [2] ANSYS, Rev. 11.0, SAS IP, Inc., 2007
- [3] Schmidt, R.: Berechnung elastischer Konstanten für inhomogene Bauteile mit periodischer Struktur, 19. CAD-FEM Users' Meeting, Potsdam (2001)
- [4] Kranz, B. u. Drossel, W.-G.: Homogenisierung von Materialkennwerten und Lokalisierung von Beanspruchungen bei Kompositen mit Piezohohlfasern, 37. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge "Technische Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer", 22./23. Februar 2005, TU Hamburg-Harburg
- [5] Drossel, W.-G. u. Neugebauer, R. u. Kranz, B.: Study about possibilities for direct integration of piezo-fibers in sheet metal, in: Dapino, M.J.: Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials 2007 : 18-23 March 2007, San Diego. Bellingham, WA: SPIE, 2007. (SPIE Proceedings Series 6526), Paper 65260J