Numerische Untersuchung der Beanspruchung von Piezofaser-Kompositen in metallischen Umformverbunden

Reimund Neugebauer[1], Reiner Kreißig[2], Sebastian Hensel[1]

[1]Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz
[2]Professur für Festkörpermechanik FKM, Technische Universität Chemnitz

1 Einleitung

In den Teilprojekten B1 und B2 werden Herstellungsverfahren im Hinblick auf Tauglichkeit für eine fertigungsgerechte Integration von Piezo-Modulen bei der Umformung flächenhafter Strukturen untersucht. Als wesentlicher Ansatz liegt den betrachteten Verfahren die Erweiterung um eine schwimmende Lagerung für die Piezo-Patches bei der Umformung zugrunde. Mittels gezielter Beeinflussung der Kontaktschubspannungen durch Minimierung der Reibung soll eine Umformung von Piezo-Metall-Verbunden bei geringer Belastung der hochspröden Piezokeramikwerkstoffe ermöglicht werden. In enger Zusammenarbeit mit B1 werden im Teilprojekt B2 durch numerische Simulationen die Grundlagen für eine Beurteilung der Umformprozesse und der dabei auf die Patches einwirkenden Beanspruchungen geschaffen. Für die Betrachtung der Piezofasern im Gesamtverbund werden Ersatzmodelle entwickelt, mit denen eine Submodellierung der einzelnen Keramikfaser und somit die Berechnung der sich lokal einstellenden Spannungs- und Verschiebungsfelder möglich wird.

2 Material- und Geometriemodelle der Umformung

Die Untersuchung der Umformbarkeit der Verbunde wurde unter Einteilung in die prinzipiellen Belastungsszenarios einfache Biegung und Biegung mit doppelter Krümmung durchgeführt. Einfache Krümmung des Umformverbundes wurde mittels Drei-Punkt-Biegung, doppelte Krümmung durch Streckziehen realisiert. In Bild 1 ist das jeweils verwendete globale Geometriemodell unter Ausnutzung der Viertelsymmetrie dargestellt. Bei den größeren Abbildungen wurde das obere Blech ausgespart, die kleineren zeigen den gesamten Umformverbund mit Werkzeugflächen. Die Abmessungen entsprechen denen der Versuchsaufbauten und Proben des Teilprojektes B1.

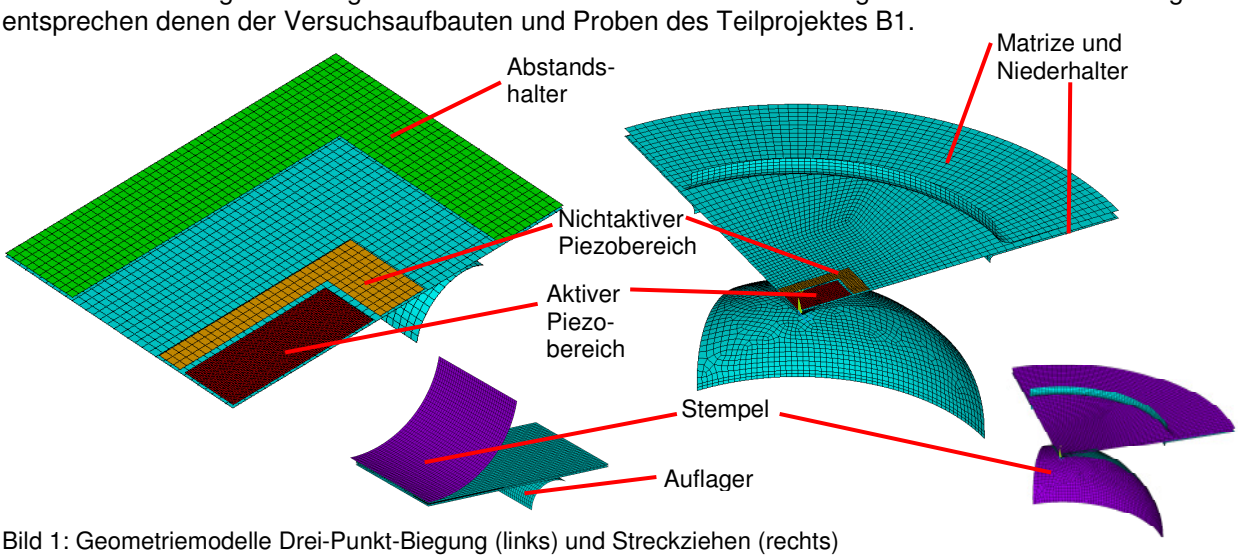

Bild 1: Geometriemodelle Drei-Punkt-Biegung (links) und Streckziehen (rechts)

Die Bleche wurden in der Simulation mit elasto-plastischer Materialcharakteristik durch Verwendung der in B1 aufgenommenen Fließkurven des Aluminiummaterials abgebildet.
Für die Werkzeuggeometrien wurde ein starres Materialverhalten angenommen.
Mit Ausnahme des Montagebandes (Abstandshalter in Bild 1) im Drei-Punkt-Biegeversuch wurden die Geometrien durch lineare quadrilaterale Schalenelemente nachgebildet. Für das Montageband wurden Volumenelemente mit ebenfalls linearen Ansatzfunktionen verwendet.

In einer Voruntersuchung zum rheologischen Verhalten des eingesetzten nicht angelierten Klebststoffs wurde die dynamische Viskosität bei Raumtemperatur zu $\eta = 3Pa \cdot s$ bestimmt und das Fluidverhalten in sehr guter Näherung als newtonisch charakterisiert (Viskosität unabhängig von der Schergeschwindigkeit). Damit lässt sich durch den Zusammenhang

$$\frac{\tau}{\eta} = \frac{\partial u}{\partial y} \tag{1}$$

unter Annahme laminarer inkompressibler Strömung näherungsweise die Schergeschwindigkeit $\partial u / \partial y$ bestimmen (u Strömungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung x, y Richtung senkrecht zur Strömungsrichtung, $\partial u / \partial y$ Strömungsgeschwindigkeitsänderung quer zur Strömung, τ Fluidschubspannung, η dynamische Viskosität)

An einer Wandung wird die Schubgeschwindigkeit aus der Strömung direkt auf die Wand übertragen. Nach obigem Zusammenhang gilt dann für die Schergeschwindigkeit

$$\frac{\tau_{Wand}}{\eta} = \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{Wand} \tag{2}$$

Bei Einsetzen der aufgezeichneten dynamischen Viskosität und einer als gering einzustufenden Wandschubspannung von 3 MPa ergibt sich

$$\left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{Wand} \cong \left.\frac{\Delta u}{\Delta y}\right|_{Wand} = \frac{3MPa}{3Pa \cdot s} = 1E+06 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{m} = 1000 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{mm} = 1 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{\mu m} \tag{3}$$

Im Bereich der Wand muss die Strömung somit von 1000 m/s in 1 mm Abstand zur Wand auf 0 m/s an der Wand verzögert werden, um eine Wandschubspannung von 3 MPa einzuleiten. Für den teilgelierten Zustand des Klebstoffs wurde $\eta = 50..150 Pa \cdot s$ bestimmt. Es ergibt sich eine Verzögerung von 20 m/s auf 0 m/s innerhalb eines Millimeters.

Bei moderaten Geschwindigkeitsgefällen senkrecht zur Wand werden nur sehr geringe Schubspannungen in den Piezo-Patch eingeleitet. Daher wird die Wirkung der schwimmenden Lagerung durch einen Reibkoeffizienten von m=0 abgebildet und die Fluidwirkung nicht direkt in das Modell eingebunden (Druck- und Geschwindigkeitsfeld mit Fluid-Struktur-Kopplung).

In einem durch B1 durchgeführten Auszugsversuch wurde dieser Sachverhalt für niedrige Geschwindigkeiten bestätigt (Bild 2). Ein Piezopatchstreifen wurde mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min aus einer mit teilgeliertem Klebstoff befüllten Kavität gezogen und dabei der Kraft-Weg-Verlauf aufgezeichnet. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die gesamte Reaktionskraft in Wandschubspannungen umgesetzt wird, lässt sich mit Breite und fluidbenetzter Höhe des Streifens die effektive Wandschubspannung zu $\tau_{Wand} = 0.04 MPa$ bestimmen.

$$\tau_{Wand} = \frac{F_{Auszug}}{2 \cdot hb\big|_{Streifen}} \tag{4}$$

In weiteren Untersuchungen ist die Aufnahme der geschwindigkeits- und aushärtungsgradabhängigen Einflüsse im Auszugsversuch mit verfeinerter Messmethodik geplant. Mittels eines nutzerspezifischen Fortran-Moduls lassen sich sowohl die Abhängigkeit von den Relativverschiebungen der Bleche und des Patches, als auch die Kompensation der Reibungsnormalkraftkomponenten implementieren. Der aktuelle Reibkoeffizient kann um die Normalkkraftkomponente am betrachteten Knoten in jeder Iteration reduziert werden und somit die Reibungsabhängigkeit vom Kontaktdruck ausgleichen.

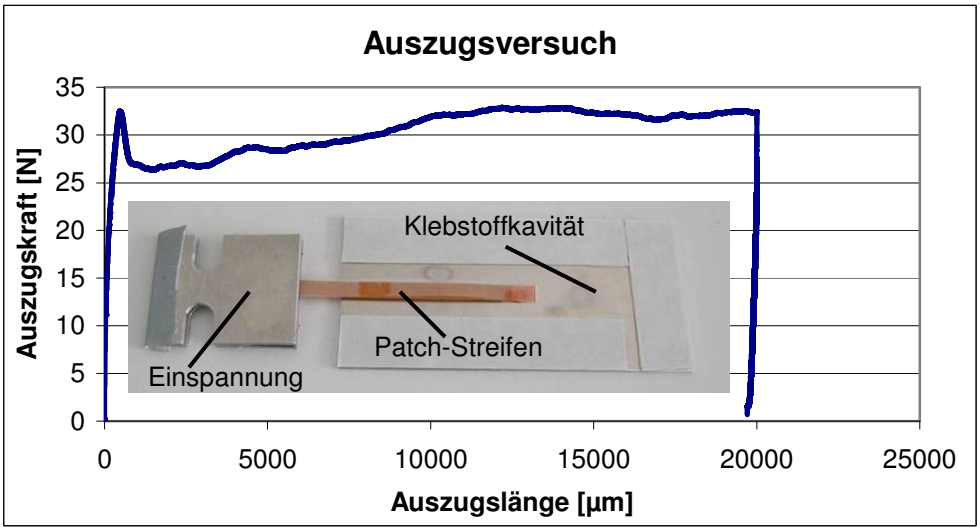

Bild 2: Kraft-Weg-Verlauf Auszugsversuch

Das Kunststoffmontageband im Drei-Punkt-Biegeversuch definiert zum einen den Klebstoffspalt, zum anderen sorgt es für die Kraftflussübertragung zwischen den Blechen. Es nimmt dabei erhebliche Schub-, Druck- und an den Rändern Zuglasten auf, was sich besonders bei ersterem in der Relativverschiebung der Blecheränder um bis zu 3 mm äußert. Das Montageband besitzt hyperelastische Materialeigenschaften, die im Modell Berücksichtigung finden müssen, damit die korrekte Verschiebung der Bleche berechnet werden kann.
Bei der Einbindung des Montagebands in die Simulation wurde ein Ersatzmodell mit Volumenelementen gebildet. Ober- und Unterseite des Bandes werden auf die Shell-Referenzebenen der Bleche erweitert. In den Referenzebenen in der Mitte der Bleche liegen die Shellknoten, die mit den Knoten der Volumenelemente des Montagebands verschmolzen werden. Es erfolgt somit eine Modellierung einer perfekten Anbindung des Bandes an die Bleche. Die Vorteile dieser Vorgehensweise liegen in der Vermeidung zusätzlicher Kontaktdefinitionen und der Verringerung der Elementanzahl, da durch die Erweiterung auf die Referenzebenen eine größere Banddicke mit den einhergehenden geringeren Aspektverhältnissen der Volumenelemente modelliert werden kann. Nachteilig ist die Notwendigkeit das Ersatzmodell mit den experimentellen Ergebnissen zu kalibrieren.
Mit der FE-Software Ansys lassen sich die Koeffizienten verschiedener hyperelastischer Materialmodelle iterativ den eingelesenen Versuchsdaten angleichen. Für die Modellierung wurde das Blatz-Ko-Materialmodell mit einem Parameter (anfänglicher Schubmodul) gewählt.
Im einachsigen Zugversuch wurde der Kraft-Weg-Verlauf einer Montagebandprobe bestimmt und für den Input in Ansys vorbereitet. Als Ergebnis der Materialparameterbestimmung wurde ein anfänglicher Schubmodul von G=1.1 GPa berechnet.

3 Ermittlung homogenisierter Materialparameter Piezo-Patch

Die Mikrostrukturen von Piezo-Patches können in den globalen Modellen keine Berücksichtigung finden, da bei korrekter Abbildung der Keramikfasergeometrie und weiterer beteiligter Kunststoffkomponenten eine zu aufwendige Ortsdiskretisierung des Problems mit der damit verbundenen stark erhöhten Berechnungsdauer entsteht. Daher wird für den Piezo-Patch ein homogenisiertes orthotropes Ersatz-Materialmodell gebildet. Grundlage der Homogenisierung bildet die numerische Betrachtung des Patches an der kleinsten zyklisch wiederkehrenden Struktureinheit – der Einheitszelle – deren Geometrie in Schliffen ermittelt wurde (Bild 3). Mittels der in [1] vorgeschlagenen Methode der Äquivalenz der elastischen Arbeit lässt sich anhand geeignet gewählter Lastfälle eine Verschmierung der bekannten Materialparameter der Patch-Komponenten vornehmen.
Bei der Beschreibung einer zyklischen Teilstruktur muss für die Randbedingungen gelten, dass jeder Knoten auf den freien Rändern (identisch strukturierte Schnittufer) die gleichen Verschiebungen erfährt wie der ihm zugeordnete Knoten, der dieselbe Position auf der Fläche des gegenüberliegenden Randes einnimmt.

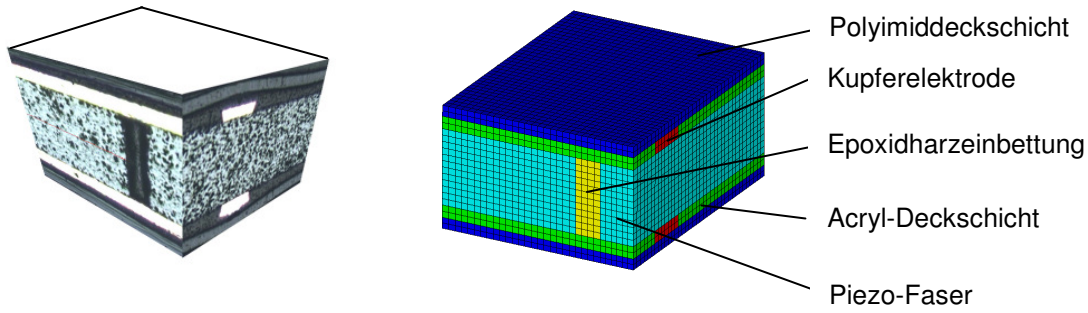

Bild 3: Geometriemodell Einheitszelle

In Bild 4 sind die entsprechenden Lastfälle an der Einheitszelle für die Ermittlung der Materialparameter für ein orthotropes Materialmodell eines Schalenelements dargestellt (Falschfarbendarstellung: v.Mises Vergleichsspannung). Zusätzlich abgebildet, sind die für die spätere Rücktransformation aus dem globalen Modell benötigten Lastfälle Biegung in Haupt- und Nebenrichtung (κ_{11} und κ_{22}). Die Auflösung der Nachgiebigkeitsmatrix und Gleichsetzen mit der elastischen Arbeit führt auf die Beziehung 5.2. Praktisch wird der integrale Wert für die linear-elastische Arbeit im numerischen Modell der Einheitszelle elementweise durch Multiplikation mit dem aktuellen Elementvolumen ermittelt.

$$W_{elast} = \frac{1}{2}\int(\varepsilon^T Q\varepsilon)dV = \frac{V}{2}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{66}\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}Q_{11} & Q_{12} & 0\\ Q_{12} & Q_{22} & 0\\ 0 & 0 & Q_{66}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{66}\end{pmatrix} \tag{5.1}$$

$$W_{elast} = \frac{V}{2}(Q_{11}\varepsilon^2{}_{11} + Q_{22}\varepsilon^2{}_{22} + Q_{66}\varepsilon^2{}_{66} + 2Q_{12}\varepsilon_{11}\varepsilon_{22}) = \sum_{elem} W_{elast,elem}\cdot V_{elem} \tag{5.2}$$

Nach Aufbringung und Auswertung der Lastfälle stehen mit Inversion der Nachgiebigkeitsmatrix die Koeffizienten der homogenisierten Steifigkeitsmatrix zur Verfügung, aus denen sich die ingenieursmäßigen orthotrop linear-elastischen Materialkonstanten extrahieren lassen.

E_{11} = 31.01 GPa G_{12} = 6.74 GPa (6)

E_{22} = 20.37 GPa n_{12} = 0.301

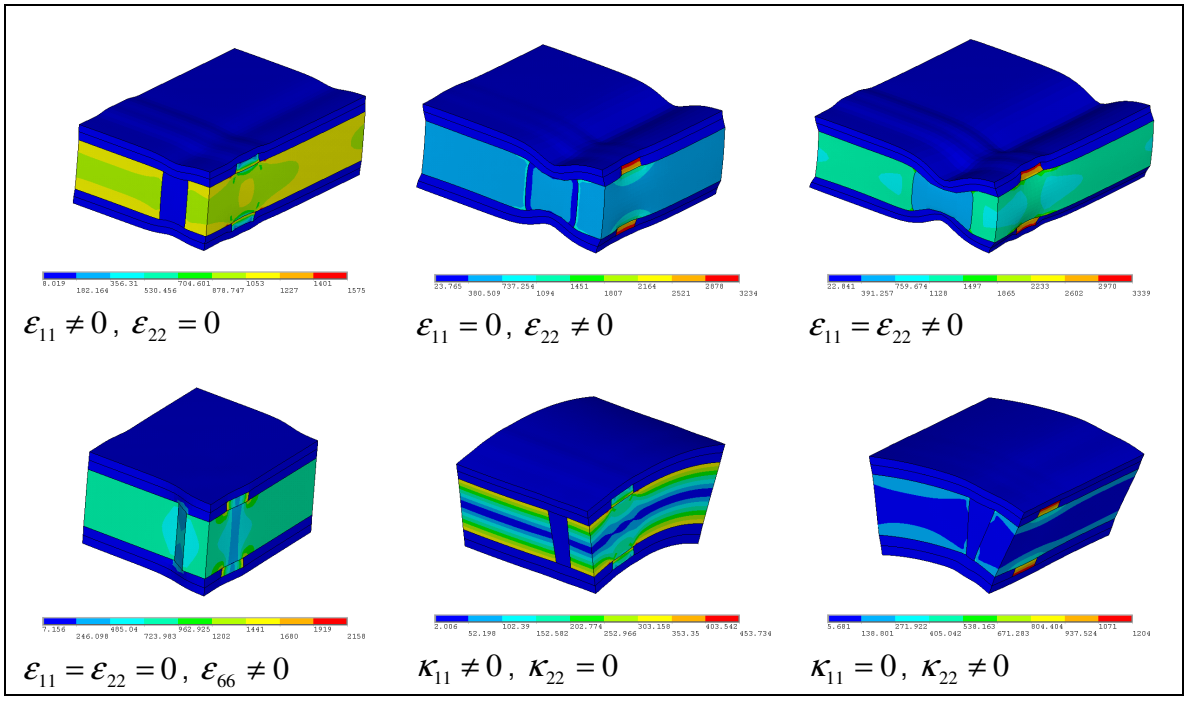

Bild 4: Lastfälle zur Bestimmung Materialparameter und Krümmungen, v.Mises Vergleichsspannungen

4 Validierung und Ergebnisse der globalen Simulationen

Die in B1 durchgeführten Umformversuche zu den globalen Lastfällen Drei-Punkt-Biegung und Streckziehen dienen der Validierung der in B2 aufgestellten Material- und Geometriemodelle.
Eine Gegenüberstellung von experimentell aufgenommenen und numerisch bestimmten Stempelkraft-Verschiebungs-Verläufen der Drei-Punkt-Biegung und des Streckziehens erfolgt in Bild 5.

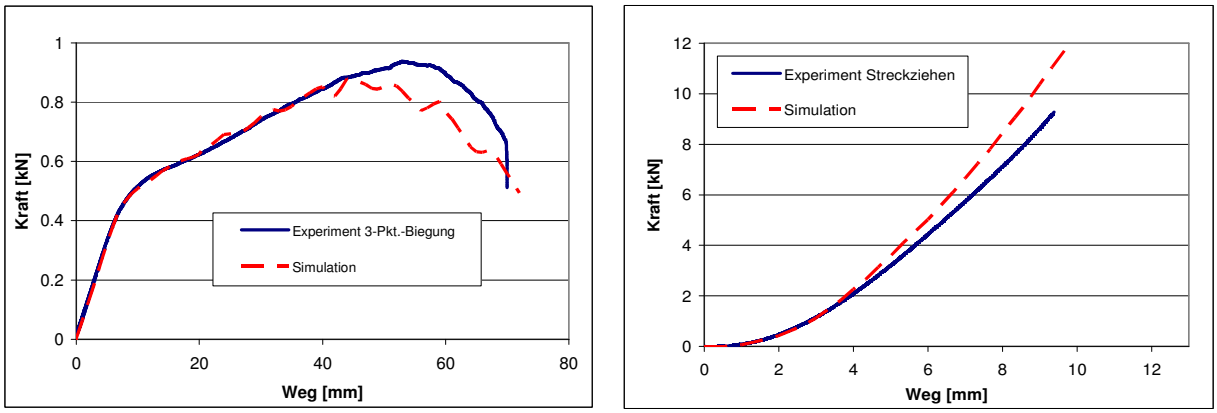

Bild 5: Simulative und experimentell ermittelte Kraft-Weg-Verläufe der Umformversuche

Die Kalibrierung des Ersatzmodells für das Montageband erfolgte durch den Abgleich mit den Ergebnissen der experimentellen Biegeversuche. Der anfängliche Schubmodul des hyperelastischen Blatz-Ko-Ansatzes wurde von G=1.1 GPa auf G=1.5 GPa erhöht.

5 Rücktransformation in das Submodell

Ein Vorteil der oben beschriebenen Homogenisierungsmethode liegt darin, dass sich die Ergebnisse aus den Berechnungen mit Einheitslastfällen (Deformationen, Spannungen) für die Rücktransformation der Lasten des globalen Modells in das Submodell der Einheitszelle nutzen lassen [1]. Bei Zerlegung der globalen Belastung am Patch in Membran-, Schub- und Biegedehnungen können die Verschiebungs- und Spannungsfelder der Homogenisierung skaliert und linear überlagert werden [2]. Speziell für die Biegung ergibt sich dabei die Notwendigkeit antizyklische Randbedingungen über der Höhe der Einheitszelle an den gegenüberliegenden Schnittufern einzuführen [2]. Die Biegedeformation wird als lineare Verschiebungsfunktion über der Einheitszellenhöhe mit wechselndem Vorzeichen und dabei konstantem mittigem Nulldurchgang angesetzt. Die Biege-Extrema an Ober- und Unterseite des Submodells ergeben sich aus dem globalen Modell durch Subtraktion des Membrananteils der Schalenmitte von der Gesamtdeformation an den äußeren Dicken-Integrationspunkten eines Patch-Schalenelements.
In Bild 6 ist die wesentliche Beanspruchung der Piezofaser in der Einheitszelle als Spannung in Faserrichtung für die Drei-Punkt-Biegung und das Streckziehen dargestellt. Die Lasten entstammen stark beanspruchten Regionen der Patchmitte. Lokale Spannungsüberhöhungen (z.B. im Bereich der Kontaktierung der Faser) resultieren aus den stark unterschiedlichen elastischen Materialeigenschaften benachbarter Elemente.
Im Gegensatz zur Drei-Punkt-Biegung entsteht beim Streckziehen eine deutlich höhere Grundbeanspruchung der Piezo-Faser. Die Ursache hierfür ist die Entwicklung von Membrandehnungen infolge doppelter Krümmung und orthotroper Materialcharakteristik im globalen Modell.

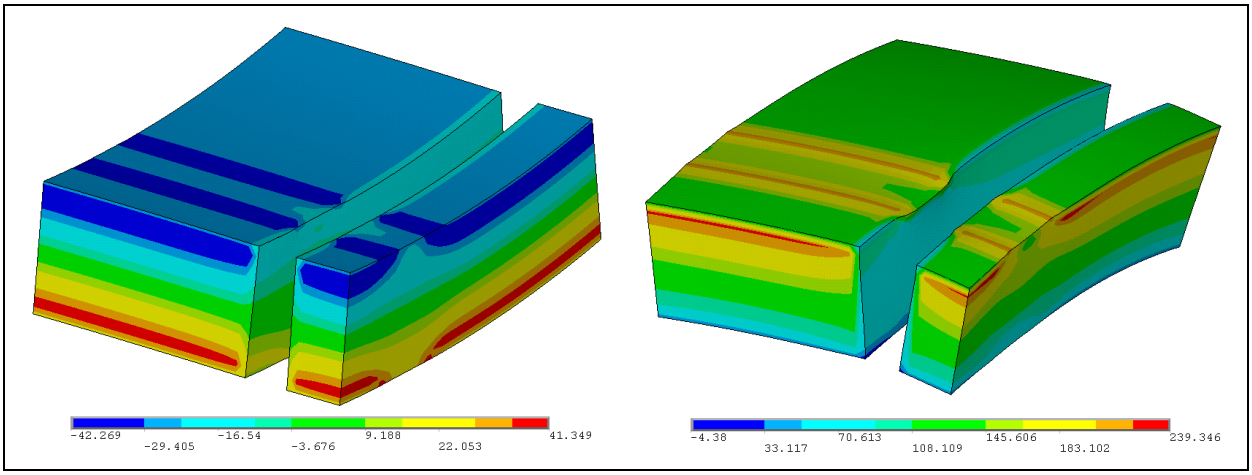

Bild 6: Piezo-Faser-Spannung in Faserrichtung für 3-Punkt-Biegung (links) und Streckzug (rechts)

6 Zusammenfassung

Die verwendete Homogenisierungsmethode lässt sich gleichermaßen für eine Ermittlung der effektiven Materialeigenschaften einer zyklisch aufgebauten Struktur wie für die Rücktransformation der globalen Belastungen in das Einheitszellensystem nutzen. Die Strukturinteraktion wird anhand eines globalen Modells ermittelt und in einem Submodell die Beanspruchung der Strukturkomponenten lokal ausgewertet. Es steht somit eine Methode zur Beurteilung der Umformgrenzen von Piezo-Metall-Verbunden zur Verfügung, die bei geringem Berechnungsaufwand eine differenzierte Betrachtung der hochspröden Verbundkomponenten ermöglicht.

7 Literatur

[1] Schmidt, R.: „Berechnung elastischer Konstanten für inhomogene Bauteile mit periodischer Struktur“, 19. CAD-FEM User ' s Meeting, Potsdam (2001)
[2] Kranz, B.; Drossel, W.-G.: Rechnerische Beanspruchungsermittlung bei adaptiven Kompositen mit Piezokeramischen Fasern, Darmstadt 15./16.03.2006; DVM-Bericht 901, Seite 43-52