

Integration von Piezosensorik in Aluminiumbleche für das Structural Health Monitoring

Schubert, Andreas^{2,3}; Neugebauer, Reimund¹; Jahn, Stephan F.²; Müller, Michael¹; Müller, Benedikt²

¹ Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, TU Chemnitz

² Professur Mikrofertigungstechnik, TU Chemnitz

³ Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

benedikt.mueller@mb.tu-chemnitz.de

Abstract

Die direkte Integration von Piezokeramik-Fasern in die Oberfläche von Blech ist ein neuer Ansatz zur Herstellung aktiver Werkstoffverbunde, sogenannter Smart Materials. Der vorliegende Beitrag beschreibt das Funktionsprinzip und die prototypische Umsetzung direkt integrierter Piezokeramik-Fasern am Beispiel des Aufbaus von Piezo-Metall Sensormodulen, welche zukünftig für das Structural Health Monitoring eingesetzt werden sollen. Durch einen Mikroumformprozess werden in die Oberfläche von Aluminiumblechen Mikrokavitäten mit den Abmaßen $0,3 \times 0,3 \times 10 \text{ mm}^3$ eingebracht. Im Anschluss werden elektrodierte und polarisierte Piezokeramik-Fasern mit einer Querschnittsfläche von $0,26 \times 0,27 \text{ mm}^2$ in einem Mikromontageprozess in die Kavitäten eingelegt und umformtechnisch gefügt. Wesentliche Herausforderung ist neben den kleinen Abmessungen der Piezokeramik-Fasern und Kavitäten die Einhaltung enger Toleranzen. Es wurde ein Aluminiumblech mit integrierter Piezosensorik aufgebaut und der Funktionsnachweis erbracht. Durch eine dynamische Erregung des Bleches wurde eine zum Auslenkungssignal proportionale Ladung generiert. So konnte die Sensorfunktion und damit die Funktion der mechanischen Ankopplung der Piezokeramik an das Blech erfolgreich nachgewiesen werden.

1 Einleitung

Die Herstellung aktiver Werkstoffverbunde durch Funktionsintegration von piezoelektrischen Sensoren und Aktoren ist eine Schlüsseltechnologie für den Leichtbau, mit der Zielstellung kleinere, leichtere und sichere Produkte herzustellen. Piezokeramik/Metall-Verbundwerkstoffe werden bisher fast ausschließlich durch Aufkleben oder Laminieren von Sensoren oder Aktoren hergestellt. Ein neuer Ansatz ist die direkte Integration von Piezokeramik-Fasern in Blech. Die direkte Ankopplung des mechanisch steifen Piezowerkstoffes an den Trägerwerkstoff Blech ohne polymere und damit elastische Zwischenschichten ermöglicht die verlustarme Übertragung von Spannungen und Dehnungen. Derartige Piezokeramik/Metall-Kompositwerkstoffe können sowohl zur Detektion impulsartiger oder periodischer Verformungen des Bauteils, als auch für das Structural Health Monitoring (SHM) eingesetzt werden. Gegenüber dem Stand der Technik des Aufklebens kommerziell erhältlicher Flächenaktuatoren, z.B. Macro Fiber Composites (MFC) wird die aktive Komponente direkt in das Bauteil verlagert. Dies erspart ein zusätzliches Packaging der piezoelektrischen Bauelemente und resultiert vor allem in einer außerordentlichen Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen.

Innerhalb des Sonderforschungsbereich SFB/TR 39 PT-PIESA der Deutschen Forschungsgemeinschaft werden Technologien und Prozessketten für die Herstellung von Piezofaser/Metall-Kompositen im Sinne diskreter Substrukturen in Blechen erforscht. Eine verteilte Anordnung derartiger Substrukturen, im Folgenden als Piezo-Metall-Module bezeichnet, ermöglicht die Fertigung von Großblechen als Halbzeug für aktive Strukturbauteile [1]. Im Folgenden werden der Aufbau, die Herstellung der Module und Ergebnisse des Funktionsnachweises anhand von Prototypen näher beschrieben.

2 Herstellung des Piezo-Metall-Moduls

2.1 Modulaufbau und Prozesskette

Der prinzipielle Aufbau des Piezo-Metall-Moduls ist in *Abb. 1* dargestellt. Die Piezokeramik-Fasern sind parallel in Mikrokavitäten, die sich in der Oberfläche des Blechs befinden, angeordnet. Die Fasern haben eine rechteckige Querschnittsfläche von $0,26 \times 0,27 \text{ mm}^2$ und eine aktive Länge von 10 mm. Die Herstellung und parallele Anordnung von Piezokeramik-Fasern zur Herstellung der geforderten geringen Maß-, Form- und Lagetoleranzen wird in [2] beschrieben. Die Piezokeramik-Fasern bestehen dabei aus zwei Lagen Piezokeramik sowie einer Mittelelektrode.



Abb. 1: Aufbau des Piezo-Metall-Sensor Moduls

Zur Herstellung des Piezo-Metall-Moduls werden 10 Kavitäten mit einer Tiefe und Breite von jeweils 0,3 mm in ein Blech (1,5 mm) der Legierung AL 5182 eingebracht, welche z. B. in der Automobilindustrie Anwendung findet. Der Abstand zwischen zwei Kavitäten beträgt 0,5 mm, was eine Stegbreite von 0,2 mm ergibt. Die Mikrostrukturierung erfolgt durch Mikrofließpressen. Um einen Kurzschluss der Piezoelemente mit dem als Gegenelektrode verwendeten Blech zu verhindern, wird mittels PECVD eine keramische Isolationsschicht ($\text{SiH}(\text{CH}_3)_3$; "3MS") auf die Kavitätsböden abgeschieden [3]. Nach dem Einlegen der Piezoelemente erfolgt durch einen zweiten Umformschritt ein form- und kraftschlüssiges Fügen der Piezoelemente mit dem Blech. *Abb.2* zeigt die gesamte Prozesskette zur Herstellung des Piezo-Metall-Moduls.

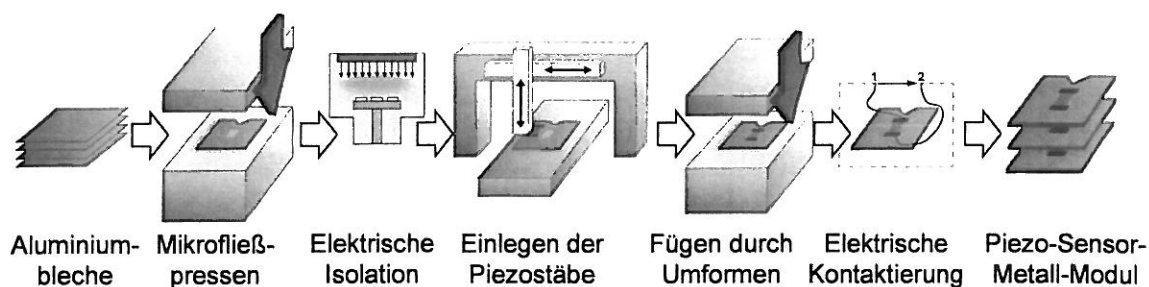


Abb. 2: Prozesskette zur Herstellung des Piezo-Sensor-Metall-Moduls

2.2 Mikrostrukturierung des Aluminiumbleches

Zielgeometrie sind zehn parallele Primärkavitäten mit einem Querschnitt von jeweils $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$ und einer Länge von 10 mm. Zusätzlich zu diesen werden vier Sekundärkavitäten in das Blech eingebracht. Abb. 3 zeigt die Abmessungen der Kavitäten und eine Abbildung der Mikrostruktur.

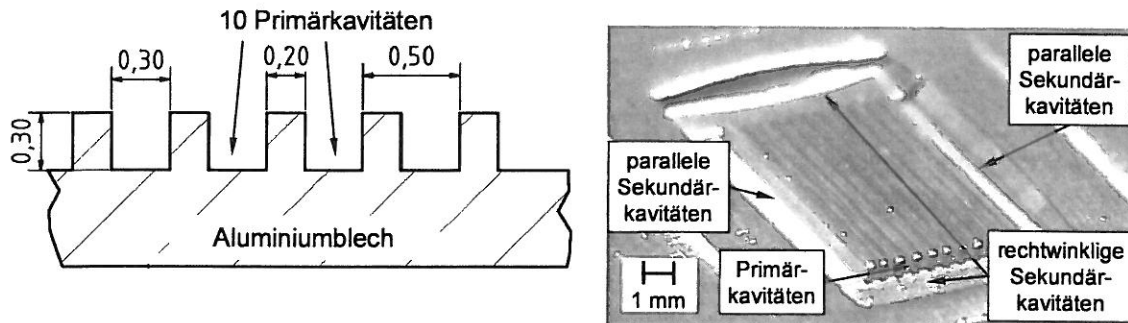


Abb. 3: Abmaße der Primärkavitäten der Mikrostruktur

Die rechteckigen Sekundärkavitäten mit einem Querschnitt von $2,0 \times 0,3 \text{ mm}^2$ werden für die elektrische Parallelschaltung der Piezokeramik-Fasern durch Sammelelektroden benötigt. Die parallel zu den Kavitäten positionierten Sekundärkavitäten sind mit einem Querschnitt von $1,0 \times 0,5 \text{ mm}^2$ um 0,2 mm tiefer als der Rest der Struktur ausgelegt und dienen als Fließsperren um den seitlichen Werkstofffluss zu beschränken. Mit den Sekundärkavitäten beträgt die gesamte umzuformende Fläche $7,2 \times 14,0 \text{ mm}^2$.

Für den Umformprozess wurde eine 200 kN Präzisionsumformmaschine der Firma Hegewald & Peschke benutzt, in die ein monolithisches Hartmetallwerkzeug integriert wurde. Zur Strukturierung wird das Verfahren Mikrofließpressen eingesetzt, bei dem durch hohen Druck des Stempels auf das Werkstück das Material in entgegengesetzter Richtung in die Negativstruktur des Werkzeuges fließt und die Kavitäten ausformt. Das monolithische Werkzeug und umgeformte Kavitäten sind in Abb. 4 dargestellt.

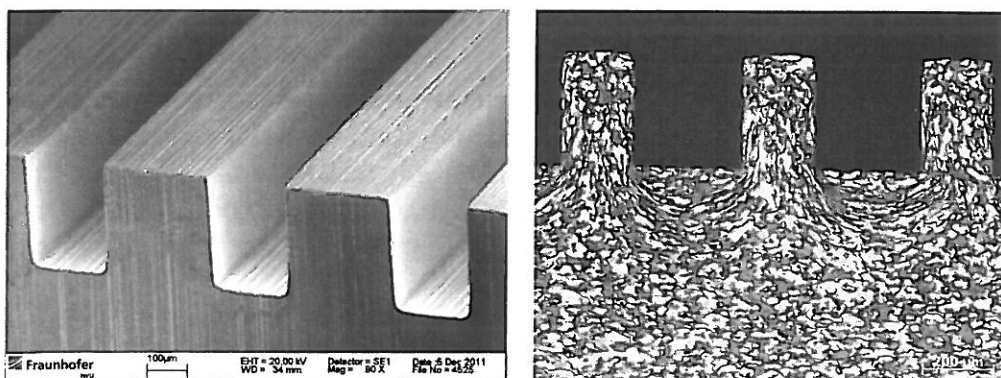


Abb. 4: REM-Aufnahme des monolithischen Werkzeugs (links) und Schlibfbild einer umgeformten Mikrostruktur (rechts)

2.3 Piezokeramikstäbe mit Mittelelektrode

Die Herstellung der Piezokeramik-Fasern mit Mittelelektrode erfolgt durch Außentrennschleifen von Piezokeramik-Platten. Die Platten bestehen dabei aus zwei Piezokeramiklagen mit einer Zwischenschicht aus Lot. Diese Platten werden durch Weichlöten von metallisierten und polarisierten Einzelkeramikplatten (M1100, Johnson Matthey Catalysts) mit einem niedrigschmelzenden Elektroniklot (Sn42Bi58) hergestellt.

Im Anschluss wird die gewünschte Plattendicke ($260\ \mu\text{m}$) und Rauheit ($R_a < 0,02\ \mu\text{m}$; $R_q < 0,03\ \mu\text{m}$) durch einen kombinierten chemisch-mechanischen Läpp- und Polierprozess eingestellt. Die vereinzelt Fasern besitzen dann Nenn-Abmessungen von $0,26 \times 0,27 \times 10\ \text{mm}^3$.

2.4 Montage und Fügen des Piezo-Metall-Moduls

Die Piezostäbe werden wie in *Abb. 5* gezeigt, in die Kavitäten eingelegt. Aufgrund der gegenüber den Kavitäten geringeren Breite der Stäbe ergibt sich auf beiden Seiten der Kavität ein Fügespalt von ca. $20\ \mu\text{m}$. Dieser Fügespalt muss durch das umformtechnische Fügen vollständig geschlossen werden. Das dafür notwendige Material ergibt sich aus den gegenüber den Piezofasern $30\ \mu\text{m}$ höheren Stegen.

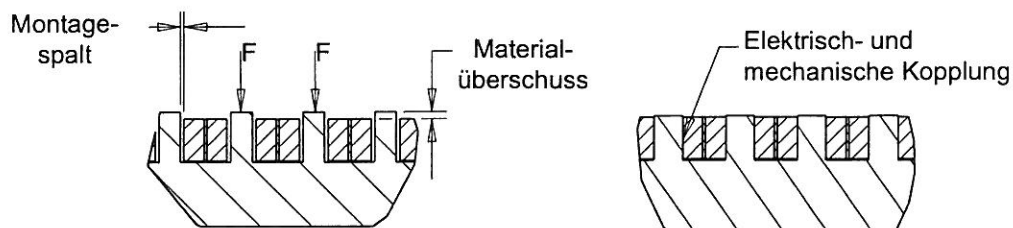


Abb. 5: Montage der Piezostäbe mit anschließendem umformtechnischem Fügen zur funktionalen Integration

Für den Fügeprozess wird ein flaches Werkzeug benutzt, das auf die Oberfläche der Stege presst. Das Material fließt durch den Druck nach unten und seitwärts, was eine Füllung des Montage bzw. Fügespalts bewirkt. Die Piezofasern werden kraftschlüssig geklemmt und formschlüssig im Aluminium eingebettet. Die Fasern werden damit sowohl elektrisch, als auch mechanisch an das Aluminiumblech gekoppelt. Der Vorgang des umformtechnischen Fügens ist in *Abb. 5* veranschaulicht. Die für den Fügeprozess benötigte Umformkraft betrug hierbei $12\ \text{kN}$ was einer Pressung von $600\ \text{MPa}$ entspricht.

Abb. 6 zeigt rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen eines gefügten Piezo-Metall-Moduls. Im rechten Bild (siehe Markierung) wird ersichtlich, dass durch den hohen Druck während des Umformens kleine Risse in den Piezofasern entstehen können. Diese Risse schreiten aber aufgrund der Einbettung der Fasern zwischen den Metallstegen und die elastischen Mittelelektroden aus Lot nicht weiter fort, sodass kein Funktionsausfall des gesamten Moduls aufgrund von Rissen zu befürchten ist. Die erkennbare teilweise außermittige Elektrodenanordnung liegt in den Ungenauigkeiten bei der manuellen Herstellung des Prototyps begründet.

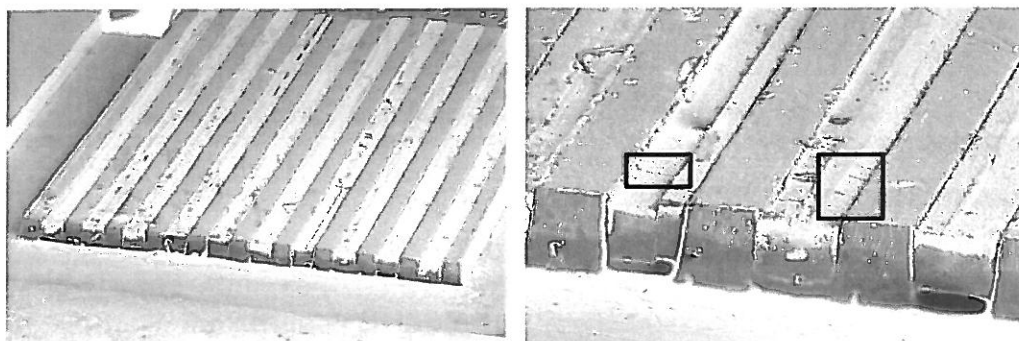


Abb. 6: Gefügte Piezokeramikstäbe in einem mikrostrukturierten Aluminiumblech

3 Experimenteller Funktionsnachweis

Der experimentelle Versuchsaufbau ist in *Abb. 7* dargestellt. Ein Piezo-Metall-Modul ist mittig in einem $50 \times 50 \times 1,5 \text{ mm}^3$ großen Blech angeordnet. Das Blech wird auf einer Seite fest eingespannt, während von der anderen Seite eine dynamische Erregerkraft angreift. Die Kräfteinleitung erfolgt in der Randlinie des Blechs sodass eine reine Biegebelastung auftritt. Die durch die Auslenkung bzw. Biegung des Blechs hervorgerufenen mechanischen Spannungen im Piezo-Metall-Modul führen aufgrund des direkten piezoelektrischen Effektes zu Ladungen, die bei erfolgreicher elektrischer und mechanischer Ankopplung der Piezofasern an das Metall nachgewiesen werden können.

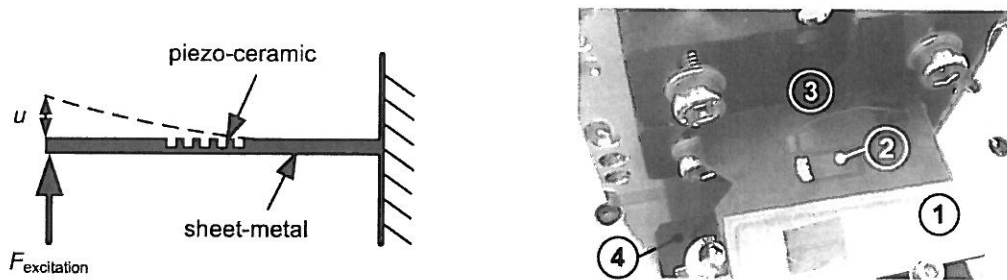


Abb. 7: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus (links) und experimenteller Aufbau zur Charakterisierung (rechts)

Der genaue Aufbau des Versuches ist in der rechten Fotografie in *Abb. 7* dargestellt, wobei das Aluminiumblech (1) und die Piezostäbe (2) mit einem Ladungsverstärker verbunden sind. Das Piezo-Metall-Modul wird auf der einen Seite durch eine Halterung (3) fest eingespannt und mit der gegenüberliegenden Seite auf einem Piezoshaker (PI P-611:3S Nano Cube) befestigt. Die Auslenkung erfolgt über den Piezoshaker, der sinusförmig erregt wird.

Abb. 8 zeigt die Messwerte des Auslenkungsversuches des Metall-Moduls. Durch die hervorgerufenen Spannungen erfahren die Piezostäbe eine Belastung in der d33 Richtung. Die generierte und durch einen Ladungsverstärker verstärkte Ladung Q ist im Diagramm der, mittels eines Lasertriangulationssensors bestimmten Auslenkung des Piezoshakers und des Blechs gegenübergestellt.

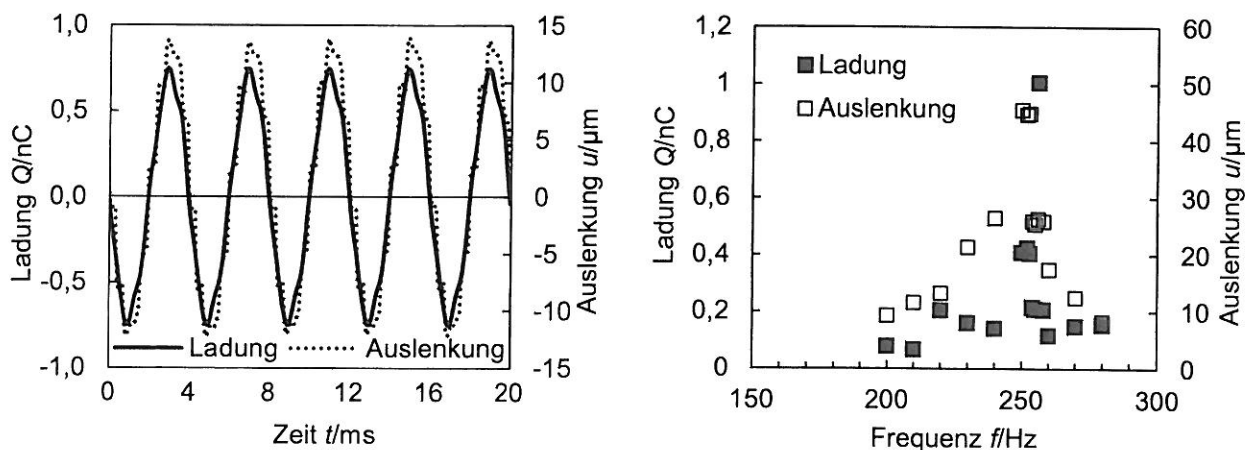


Abb. 8: Auslenkung u (Biegung) des Blechs bei einer Anregung mit 250 Hz und die dazugehörige generierte Ladung im Piezo-Metall-Modul

Wie am Graph zu sehen ist, verhält sich das Sensorsignal (generierte Ladung) proportional zur Auslenkung des Moduls, was die effektive Ankopplung der Piezofasern an den metallischen Trägerwerkstoff nachweist.

Weiterhin wurde gezeigt werden, dass die generierte Ladung als Messgröße für die Auslenkung genutzt werden kann. Hierfür wurde in einem zweiten Versuch die Frequenz der mechanischen Anregung des Blechs in einem Bereich von 0 bis 300 Hz verändert und die gemessene Ladung am Piezo-Metall-Modul aufgetragen. Den größten Hub weist der Piezo Cube bei seiner Resonanzfrequenz von 256 MHz auf. Wie in Abb. 8 ersichtlich ist, wurden um die Resonanzfrequenz des Shakers die größten Ladungen gemessen. Das zeigt, dass das Piezo-Metall Sensor Modul in der Lage ist, eine mechanische Auslenkung quantitativ als Messgröße zu erfassen.

4 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt die Machbarkeit der Integration von Piezokeramiken in mikrostrukturierte Bleche. Es wurde nachgewiesen, dass die Konfiguration aus Piezokeramik-Fasern mit Mittelelektrode und dem Aluminiumblech als Gegenelektrode in der Lage ist, als Sensormodul genutzt zu werden. Durch die Möglichkeit der quantitativen Messung von mechanischen Auslenkungen ist der Einsatz des Piezo-Metall Sensor Moduls im Structure Health Monitoring möglich.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 39 PT-PIESA im Teilprojekt A2 unterstützt.

Literatur

- [1]Schubert, A.; Jahn, S. F.; Müller, B.: Umformende Mikrostrukturierung von Blechwerkstoffen für die Herstellung von Piezo-Metall-Modulen, In: Proceedings of the 4th International Conference on Accuracy in Forming Technology (ICAFT), 2012, S. 411-424
- [2]Neugebauer, R.; et al.: Process chain and tolerance management for precision manufacturing of piezo-metal-modules. In: Proc. ISEM 2011, Stellenbosch, 54-1 – 54-12.
- [3]Peter, S.; Günther, D.; Hauschild, D.; Richter, F.: Low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition of thin films combining mechanical stiffness, electrical insulation, and homogeneity in microcavities, In: Journal of Applied Physics (108), 2010