Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–04–56

Ortsaufgelöste Kraftmessung in Stanzprozessen

Integration von PZT-Dickschichten zur minimalinvasiven Kraftmessung

L. Hamm, M. Riemer, M. Panesso, W. Zorn

ZUSAMMENFASSUNG Erfolgt die vollautomatisierte Fertigung umgeformter Blechbauteile mit Folgeverbundwerkzeugen, lassen sich die Einzeloperationen nur schwer überwachen, da der notwendige Bauraum für herkömmliche Sensorik fehlt. Dieser Beitrag stellt eine Sensorik vor, die Platz sparend integriert werden kann und gleichzeitig eine Kraftverteilung statt nur einer Kraftkomponente misst.

STICHWÖRTER

Qualitätssicherung, Produktionstechnik, Prozessüberwachung

Integration of PZT-thick-film sensor for a minimally invasive force measurement

ABTRACT If formed components are produced fully automated using progressive tools, monitoring individual operations becomes challenging due to a lack of necessary space for conventional sensors. This article introduces a sensor technology that can be integrated space-efficient and, at the same time, measures not only a single force component but also its distribution.

1 Ausgangssituation und Randbedingungen

Moderne Produktionsanlagen und -prozesse zeichnen sich durch einen hohen Automatisierungsgrad aus, der die wirtschaftliche Herstellung komplexer Bauteile in großen Stückzahlen ermöglicht. Kleinere Blechbauteile werden meist mit Folgeverbundwerkzeugen auf schnelllaufenden Stanzautomaten hergestellt. Die Gewinnmarge bezogen auf das Einzelteil ist dabei äußerst gering, sodass eine wirtschaftliche Herstellung nur bei hoher Produktqualität mit stabiler Ausbringungsleistung erfolgen kann [1]. Insbesondere hochbelastete Aktivteile innerhalb der Werkzeuge liegen deshalb im Fokus einer möglichen Überwachung, da diese die qualitätsbestimmenden Prozesse durchführen, gefährdet von Bruch und Verschleiß sind und Stillstand durch notwendige Wartung verursachen [2]. Einer Überwachung einzelner Aktivteile (zum Beispiel Schneidstempel, Ziehstempel und -matrizen) steht vor allem ein beschränkter Bauraum entgegen. In Folgeverbundwerkzeugen erfolgt eine Vielzahl von Umformoperationen. Die verwendeten Aktivteile befinden sich folglich auf engsten Bauraum, wodurch die Integration von Sensoren zur Überwachung einzelner Aktivteile erschwert ist.

Ein weiteres Hindernis bei der Integration von Sensoren besteht darin, eine geeignete informationstechnische Anbindung zu realisieren. Soll zusätzliche Sensorik im Werkzeug integriert werden, ist häufig eine direkte Anbindung sowie Vorverarbeitung der Messsignale auf der Steuerung der Produktionsanlage nicht erwünscht. Dies resultiert zum einen daraus, dass der Anlagenhersteller für den Integrationsprozess nicht aktiv eingebunden werden soll und zum anderen, dass die Werkzeuge teilweise auf verschiedenen Produktionsanlagen betrieben werden. Ein vielversprechender Ansatz ist es, den Sensor als IIoT-Device zu verstehen und direkt an eine übergeordnete Ebene (Cloud, Prozessleitebene) anzubinden. Hierdurch ergeben sich insbesondere skalierbare Lösungen, welche sich mit wenig Anpassungen auf andere Werkzeuge und Prozesse übertragen lassen [3]. Eine Voraussetzung dafür ist, dass der Sensorknoten selbst einige Vorverarbeitungsschritte übernimmt, da eine Übertragung von Rohdaten in Form von Zeitreihen meist nicht sinnvoll ist.

Der vorliegende Artikel präsentiert ein neuartiges Sensorelement auf Basis der Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) Dickschichtsensorik. Dieses kann auf Grund des geringen Bauraums auch in komplexen Folgeverbundwerkzeugen zur Überwachung einzelner Aktivteile eingesetzt werden. Weiterhin werden durch die Integration mehrerer Einzelsensoren örtlich verteilte Kraftkomponenten erfasst. Hierdurch kann eine größere Bandbreite von Einflüssen auf die Werkzeugaktivteile ermittelt und damit eine umfassenderes Prozessabbild erzeugt werden. Zusätzlich wird erläutert, wie ein solcher Sensor kostengünstig integriert und in eine adaptive Prozesskette eingebunden werden kann. Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes „AdaProQ – Adaptive Prozessketten zur Steigerung der Produktionsqualität und -effizienz“ erarbeitet, welches im Rahmen der Förderinitiative „Kopa-35-c“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wird.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-56, am 28.06.2024, 23:46:37
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

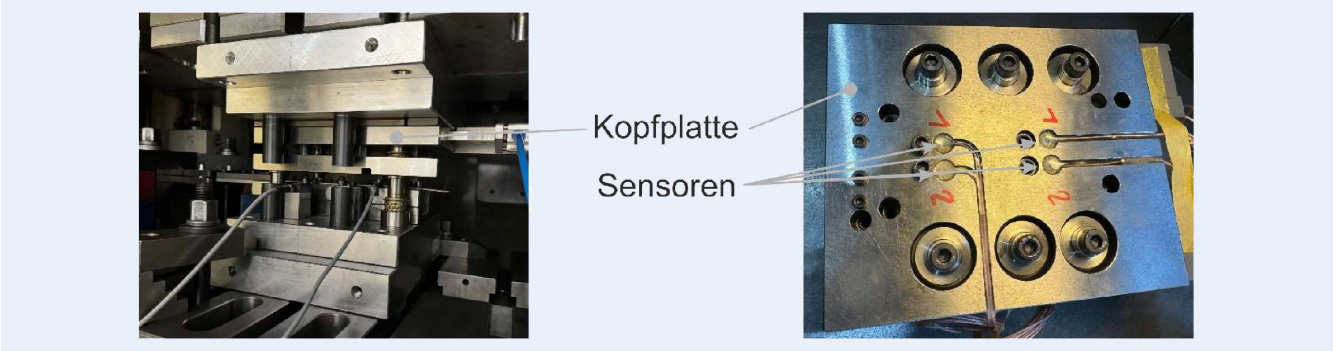

Bild 1. Werkzeug mit Kraftsensoren in der Kopfplatte. *Grafik: Fraunhofer IWU*

Bild 2. Schichtaufbau (links) und realer Sensor (rechts).
Grafik: Fraunhofer IWU

2 Stand der Technik

In der industriellen Fertigung von umformtechnisch hergestellten Blechbauteilen werden insbesondere Folgeverbundwerkzeuge eingesetzt. Damit sind viele Umformoperationen innerhalb eines Werkzeuges möglich, wodurch vergleichsweise geringe Werkzeugkosten entstehen. Wie jedes Werkzeug unterliegen auch diese Verschleiß und fortlaufend schwankenden Prozessbedingungen, wie variierende Blechdicke, Werkstoffeigenschaften, Schmierung und Temperatur. Infolgedessen variiert auch die produzierte Qualität des Produktes, welche besonders durch die Maßhaltigkeit beschrieben wird. Um die Einhaltung aller Produkttoleranzen garantieren zu können, werden in der industriellen Praxis Stichproben entnommen und vermessen. Sollten Toleranzen überschritten sein, muss je nach Bauteil entweder das gesamte Los nachgearbeitet werden oder eine vollständige Prüfung jedes Teils durchgeführt werden. In der Regel existieren keine Mechanismen, welche das Überschreiten einer Toleranz direkt anzeigen [4].

Soll vermieden werden, dass zwischen zwei Stichproben Ausschuss produziert wurde, muss ein Prozess permanent überwacht werden. Um im Prozess auf eine Bauteilgeometrie oder allgemein auf eine Qualitätsgröße schließen zu können, benötigt es dafür Prozessgrößen die Inline gemessen werden und frei von Fremdeinflüssen sind, sodass sich Merkmale mit guter Korrelation generieren lassen [5]. Hierfür eignet sich besonders die direkte Messung einer Kraft. Für Schneidoperationen kann durch die Messung von Stempelkräften neben dem Verschleiß auch ein Rückschluss auf die Rückfederung und Materialeigenschaften gezogen werden [6, 7]. Allein durch die Kenntnisse des Verschleißzustandes lässt sich ein ökonomischer Vorteil erreichen, wenn Standzeiten voll ausgenutzt werden. Derzeitige unnötige Instandhaltungsmaßnahmen [8] insbesondere im produzierende Gewerbe lassen sich so vermeiden. Auch in Ziehprozessen können durch die Messung von Stempelkräften beispielsweise Risse im Bauteil detektiert werden [9].

In der Praxis werden Folgeverbundwerkzeuge größtenteils mit Kraftmessungen in Grundplatten, wie in **Bild 2**, versehen. Mit kleinen Kraftmessdosen oder Messdübeln werden die Summenkräfte über mehrere Operationen hinweg erfasst [10]. Mit Hüllkurven werden Abweichungen detektiert, wobei kein direkter Zusammenhang zu einer Einzeloperation gezogen werden kann. Gravierende Fehler, wie große Vorschubfehler oder Bruch eines Schneidelementes lassen sich damit sehr gut automatisiert erfassen und die Anlage zum Stillstand bringen. Dass ein solcher Ansatz wirtschaftlich erfolgreich ist, zeigt sich auch an der großen Verbreitung industrieller Systeme beispielsweise von Brankamp, TRSystems, Marposs, Kistler und Schwer und Kopka. Bisherige Lösungen zur direkten Kraftmessung an einer Einzeloperation sind eher im akademischen Umfeld zu finden und beruhen auf kommerziell verfügbaren Kraftmessdosen, welche nur eine Einzelkraft erfassen. Damit lassen sich immerhin, der Verschleiß (über die gesamte Schneide) und, je nach Prozess, die gefertigte Qualität (des gesamten Einzelprozess) bewerten. Ein minimaler einseitiger Verschleiß an Schneidkanten oder kleine Ausrichtungsfehler im Werkzeug oder in Voroperationen lassen sich damit kaum feststellen.

3 PZT-Schichtsensorik

Für schnell laufende Prozesse eignen sich piezoelektrische Sensoren, da Ladungsverluste bei richtiger Abstimmung eines Ladungsverstärkers irrelevant sind. Um die Gestaltungsfreiheit zu erhöhen und so den begrenzten Bauraum optimal zu nutzen, können gedruckte Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) Sensoren verwendet werden. Auf einen metallischen Grundkörper wird, wie in Bild 2, zunächst eine Isolationsschicht aus Al2O3 mittels Chemical Vapour Deposition (CVD) aufgebracht. Anschließend werden Grundelektrode, PZT-Schicht und Deckelektrode sequenziell gedruckt und gesintert. Zum Schutz vor Umwelteinflüssen erfolgt zuletzt eine Beschichtung mit einem Polymer [11]. Diese Schichtsystem, „IKTS-PZ5100“, wurde durch das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS entwickelt.

Idealerweise wird versucht den d33-Effekt zu nutzen, da damit die größtmöglichen Ladungen erzeugt werden können. Die Belastungsrichtung und die Polarisation des piezoelektrischen Materials liegen dabei in der gleichen Raumrichtung. Das Schichtsystem darf allerdings nur bis zu einer Flächenpressung von 50 MPa belastet werden, da es sonst zu Depolarisation kommt und der piezoelektrische Effekt verloren geht [12]. Für

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-56, am 28.06.2024, 23:46:37
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

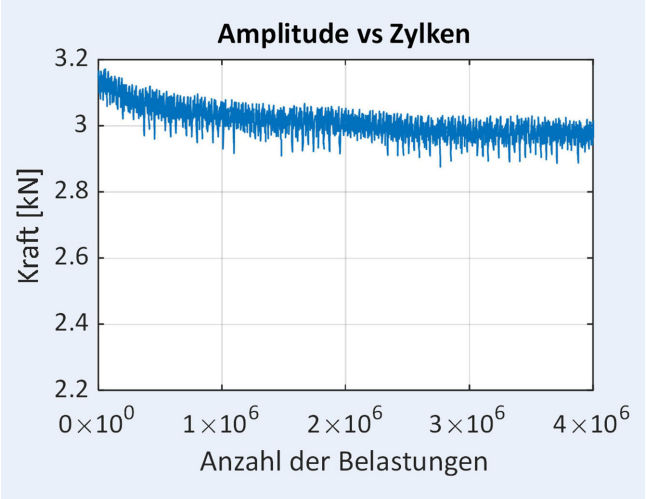

Bild 3. Degradation nach 4x106 Belastungen. *Grafik: Fraunhofer IWU*

den Einsatz in Umformwerkzeugen, unter Schneid- und anderen Formelementen reicht dies meistens nicht aus, sodass der d31-Effekt genutzt werden muss. Das Sensorelement wird dabei quer belastet und die Polarisationsrichtung der Piezokristalle verläuft normal zur Beschichtungsebene. Vor einer Sensorentwicklung muss zunächst überprüft werden, inwieweit eine Querdehnung von 0,1 % bei dauerhafter zyklischer Belastung zu einer Depolarisation führt. Dazu wurden beschichtete Prüfkörper mit einer Kantenlänge von 10 mm und einer Dicke von 3 mm im Dauerschwingversuch unter Druckschwellbelastung mit einer Frequenz von 20 Hz getestet. Die Zeitkonstante des Messverstärkers betrug 10 s, um auszuschließen, dass ein pyroelektrischer Effekt durch eine Änderung der Umgebungstemperatur erfasst wird. **Bild 3** zeigt die Amplitude des Kraftsignal des Sensors. Nach vier Millionen Lastspielen ist eine Degradation vor allem in den ersten Zyklen zu erkennen. Die Empfindlichkeit des Sensors liegt bei rund 1 pC/N. Für eine Auslegung eines Sensorsystems kann es sinnvoll sein, eine universelle Auslegungskonstante zu nutzen, welche proportional zur Sensorfläche (tatsächliche Schichtfläche) und der aufgebrachten Dehnung ist. Für den verwendeten Sensor beträgt diese 318 pC/(% mm²). Das Signal stabilisiert sich nach einem anfänglichen Signalabfall, sodass diese Dehnung für Daueranwendungen verwendet werden kann.

4 Integrationsansätze

Ein technischer Fortschritt wäre eine Sensorik, die minimalinvasiv integrierbar ist, eine Einzeloperation betrachtet und gleichzeitige eine detailliertere Aussage über den Verschleiß- und Prozesszustand erlaubt. Zwei solcher Ansätze sollen im Folgenden vorgestellt werden. Ein erster Ansatz eignet sich dabei allgemein zur Verwendung hinter Aktivteilen in Folgeverbundwerkzeugen. Der zweite Ansatz zeigt eine mögliche Abwandlung für einen spezielleren Anwendungsfall.

Einen Sensor, der sich allgemein in Folgeverbundwerkzeugen einsetzen lässt, zeigt **Bild 4**. Es werden drei Sensorelemente um je 120° versetzt in einem Grundkörper gehalten. Die Sensorelemente sind jeweils an der Innenseite mit einem PZT-Dickschichtsensor versehen, sodass dieser Aufbau drei Kraftgrößen über den Umfang erfasst. Die örtliche Auflösung soll so eine genauere Aussage über den Verschleiß und den Prozess selbst ermöglichen. Beispielsweise sollen sich einseitige kleine Schneideausbrüche erkennen lassen. Bei ungünstiger Ausrichtung von Stempel zur Matrize oder der Voroperation zur überwachten Folgeoperation ist eine ungleiche Kraftverteilung über den Umfang erwartbar. Der Prozesszustand lässt sich dementsprechend genauer beschreiben.

Die einfache Integration hinter einer Einzelkomponente ermöglicht der kleine Aufbau des Sensors. Die drei Sensorelemente werden dafür in einem Grundkörper durch einen Keil leicht vorgespannt. Die separate Vorspannung im Grundkörper sorgt für einen Ausgleich geometrischer Toleranzen und verhindert Nichtlinearitäten im Sensorsignal durch etwaige offene Fugen. Ein Grundloch von 21 mm Tiefe und einem Durchmesser von 18 mm reicht aus, um eine solchen Sensor im Werkzeug zu verbauen. Durch eine M20 Mutter wird der Sensor im Grundloch verspannt. Ein möglicher Aufbau ist in **Bild 5** zusehen und wird zukünftig bei der Eichsfelder Schraubenwerk GmbH für ein Kragenzieh- und Schneidprozess erprobt. Generell ist auch der Einsatz hinter Ziehstempel, Biegeelementen oder Prägewerkzeugen denkbar. Der Sensor wird dabei ähnlich zu bisherigen kommerziellen Lösungen nicht direkt gegen das Aktivelement verspannt, sondern liegt mit 8 mm Abstand in einer Druckplatte. Grund hierfür ist, dass ein Werkzeugaustausch immer noch möglich sein muss, ohne den Sensor erneut vorzuspannen und kalibrieren zu müssen.

Kraftaufnehmer, welche in steifen Umgebungen integriert werden und damit in einem Kraftnebenschluss messen, müssen

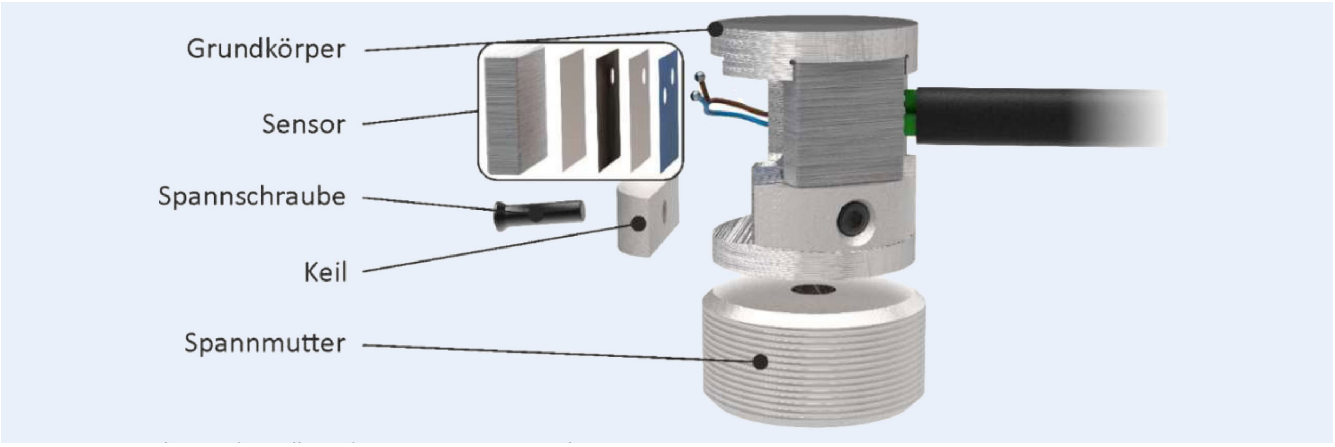

Bild 4. Explosionsdarstellung des Sensors mit 3 Einzelsensoren. *Grafik: Fraunhofer IWU*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-56, am 28.06.2024, 23:46:37
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

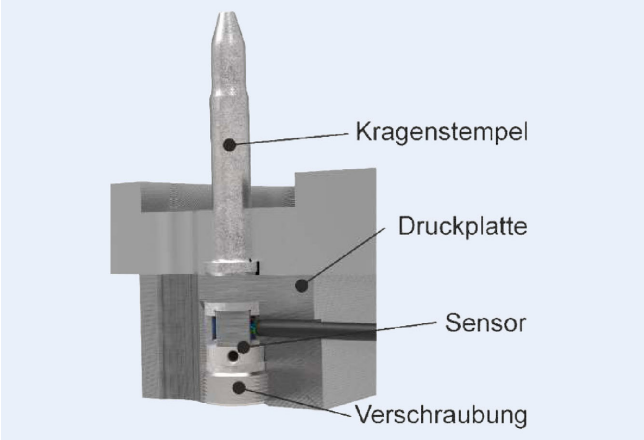

Bild 5. Integration hinter einem Kragenziehstempel. *Grafik: Fraunhofer IWU*

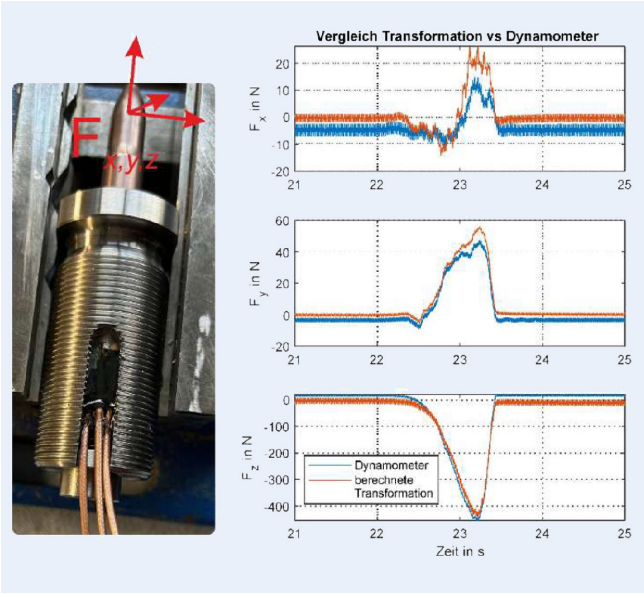

Bild 6. Kalibrierung auf orthogonale Kräfte. *Grafik: Fraunhofer IWU*

immer dann kalibriert werden, wenn genaue Absolutkräfte bestimmt werden sollen. Zur einfacheren Interpretation der drei Kräfte kann eine Kalibrierung auf drei orthogonale Kräfte erfolgen. Wie in **Bild 6** dargestellt, wird eine Kraft normal zur Werkzeugbewegung ausgegeben, welche wie die bisherigen Messungen der Einzelkraft interpretiert werden kann. Ein Anstieg der maximalen Kraft bedeutet beispielsweise einer höhere notwendigere Umformkraft infolge einer größere Blechdicke. Die Kräfte und geben wiederum Aufschluss über die Verteilung der Umformkraft. Wird beispielsweise eine hohe seitliche Kraft gemessen, kann dies auf einen ungleichmäßigen Schneidspalt hindeuten. Bild 6 zeigt auch das Ergebnis einer solchen Kalibrierung. Der montierte Sensor wurde hierfür auf einem Dynamometer verbaut und aus unterschiedlichen Richtungen belastet. In vergleichbaren Anwendungen, in denen ein PZT-Dickschichtsensor quer zur Polarisationsrichtung belastet wird, können Genauigkeiten von 7 % bezogen auf den Endwert erreicht werden [11]. Die wesentlichen Abweichungen entstehen durch eine Hysterese des Sensors selbst und sind daher auch im vorgestellten Aufbau vorhanden.

Auch in anderen Werkzeugkonstruktionen kann es dazu kommen, dass mehrere eng platzierte Umformoperationen ausgeführt werden und nur ein begrenzter Bauraum für einen Sensor vorhanden ist. Bei einem Anwender werden mehrere Kerben durch einen Stempel in ein längliches Werkstück eingebracht. Hinter dem Stempel sitzt dort, wo in **Bild 7** der Sensor eingezeichnet ist, ein kleines Druckstück, welche lediglich 25 x 25 x 100 mm groß ist. Innerhalb des Antriebs des Werkzeuges kann eine globale Kraftkomponente erfasst werden, welche jedoch die Überlagerung aller Kerben zusätzlich zu den Einflüssen von Werkzeugführungen und Anschlägen darstellt. Eine Einzelkerbe kann so nur sehr eingeschränkt überwacht werden.

Der Sensor sitzt nach Bild 7 direkt über dem Stempel, welcher die Kerben ausformt. Um eine detaillierte Aussage über den Prozesszustand treffen zu können, erfolgt ebenfalls eine örtliche Aufteilung in fünf Einzelsensoren, welche hier linienförmig aneinandergereiht werden. Abweichung in der Kerbkraft einer Einzelkerbe wirken sich damit unterschiedlich stark auf die Einzelsensoren aus. Ein Ausbruch der Aktivfläche einer Kerbelements würde damit zu einem deutlicheren Kraftabfall an der jeweiligen Messstelle führen.

Die einfache Integration wird gewährleistet, indem der Sensor mit einem ohnehin vorhandenen Druckstück ausgetauscht wird. Diese Werkzeugsystem kommt beim Anwender mehrfach vor und wird mit unterschiedlichsten Kerbstempeln betrieben. Indem das Werkzeug unangetastet bleibt, kann durch dieses Konzept eine besonders gut skalierbare Sensorik für diesen Anwendungsfall geschaffen werden. Durch die Integration und Anwendung eines Ladungsverstärkers und Zusatzelektronik direkt im Werkzeug

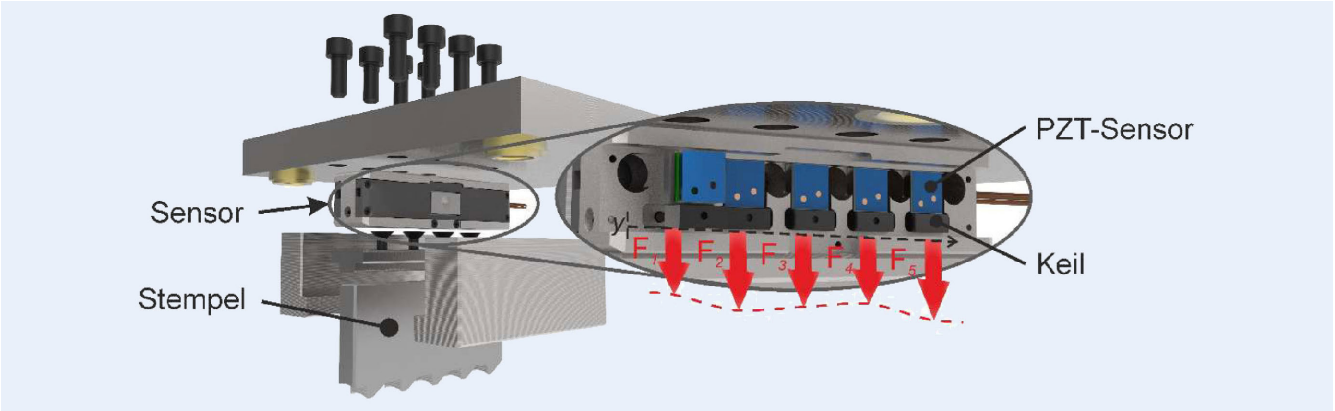

Bild 7. Linienkraftmessung an einem Kerbwerkzeug. *Grafik: Fraunhofer IWU*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-56, am 28.06.2024, 23:46:37
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb

kann der Anwender die Messsignale in Form von standardisierten Spannungs- und/oder Stromsignalen weiterverarbeiten. Je nach konkreter Stempelgeometrie kann analog zur Transformation in Raumrichtungen eine Kalibrierung auf Kräfte an den Kerben erfolgen. Die konkrete Stempelgeometrie bestimmt darüber, ob und wie sehr sich benachbarte Kerbkräfte voneinander unterscheiden lassen. Ein kurzer Stempel mit weit auseinanderliegenden Kerben begünstig eine bessere Trennung der Einzelkräfte.

Die Realisierung eines vollständigen Überwachungssystems erfordert in beiden Integrationsansätzen die informationstechnische Einbindung und anschließende Analyse der erfassten Messdaten. Die Ladungsverstärkung erfolgt innerhalb einer werkzeugintegrierten Elektronik mit auf den Anwendungsfall abgestimmtem Verstärker. Die Daten können entweder innerhalb dieser Elektronik oder mithilfe eines zusätzlichen Clients vorverarbeitet werden, wobei die Ergebnisse mittels Kommunikationsprotokollen wie beispielsweise OPC UA oder MQTT bereitgestellt werden können. Auf diese Weise erfüllt ein derartiges Sensorsystem die Charakteristika eines IIoT-Gerätes.

5 Fazit

Integrierte Sensortechnik in hoch-produktiven Fertigungsprozessen für Blechbauteile ermöglichen eine schnellere und direktere Fehlererkennung und erlauben eine direkte Erfassung des Verschleißes von verschiedenen Werkzeugkomponenten. Damit können starre Wartungsintervalle aufgelöst und verschleißangepasst durchgeführt werden. Komplexe und einsatzoptimierte Werkzeugkonzepte erschweren die Integration von Standard-Sensorik, da oftmals der erforderliche Bauraum nicht ausreicht oder die hohen Anforderungen bezüglich Werkzeugsteifigkeit die Anwendung konventioneller Wandlerprinzipien nicht erlauben. Durch eine aufwendige Integration und zu geringe Sensitivität bisheriger Lösungen haben sich keine Lösungen verbreitet, welche Einzeloperationen direkt überwachen.

Innerhalb des vom BMWK geförderten Projektes AdaProQ konnte gezeigt werden, dass PZT-Dickschicht-Sensoren geeignet sind, diesen Hindernissen zu begegnen. Die Gestaltungsspielräume, die sich bei der Auslegung und Integration derartiger hochsensitiver Sensoren nutzen lassen, ermöglichen auch die Anwendung in komplexen Werkzeugen und die Realisierung von örtlich verteilten Messstellen. Künftige Arbeiten werden sich damit auseinandersetzen, welche konkreten Qualitäts- und Verschleißgrößen überwacht werden können.

FÖRDERHINWEIS

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes AdaProQ (FKZ: 13IK006F) erarbeitet, welches vom BMWK gefördert wird.

Literatur

[1] Hellwig, W.; Kolbe, M.: Spanlose Fertigung Stanzen. Integrierte Fertigung komplexer Präzisions-Stanzteile. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012

[2] Molitor, D. A.; Kubik, C.; Hetfleisch, R. H. et al.: Was Bauteile über den Verschleiß genutzter Stanzwerkzeuge verraten. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 12, S. 903–907

[3] Behrendt, A.; de Boer, E.; Kasah, T.; Mohr, N.; Richter, G.: Industrielles IoT und führende Technologien als Treiber der digitalen Transformation in der Produktion. Wie es gelingt, Geschäftsbereiche, Organisation und Technologie zur Skalierung der Wertschöpfung aufeinander abzustimmen, McKinsey and Company, 2021

[4] Yinan Miao, Y.; Jun Young Jeon; Gyuhae Park: An image processing-based crack detection technique for pressed panel products. Journal of Manufacturing Systems 57 (2020), S. 287–297

[5] Hoppe, F.; Hohmann, J.; Knoll, M. et al.: Feature-based Supervision of Shear Cutting Processes on the Basis of Force Measurements: Evaluation of Feature Engineering and Feature Extraction. Procedia Manufacturing 34 (2019), S. 847–856

[6] Kubik, C.; Knauer, S. M.; Groche, P.: Smart sheet metal forming: importance of data acquisition, preprocessing and transformation on the performance of a multiclass support vector machine for predicting wear states during blanking. Journal of Intelligent Manufacturing 33 (2022) 1, S. 259–282

[7] Niessner, S.; Liewald, M.: Identification of methods for the in-situ measurement of cutting forces in a tool-bound punching machine. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 967 (2020) 1, S. 12025

[8] Schuh, G.; Kelzenberg, C.; Lange, J. de et al.: Predictive Maintenance. Entwicklung vorausschauender Wartungssysteme für Werkzeugbaubetriebe und Serienproduzenten : WerkPriMa. Aachen: RWTH Aachen University 2020

[9] Barthau, M.; Liewald, M.: New approach on controlling strain distribution manufactured in sheet metal components during deep drawing process. Procedia Engineering 207 (2017), S. 66–71

[10] Farioli, D.; Kaya, E.; Fumagalli, A. et al.: A Data-Based Tool Failure Prevention Approach in Progressive Die Stamping. Journal of Manufacturing and Materials Processing 7 (2023) 3, S. 92

[11] Drossel, W.-G.; Gebhardt, S.; Bucht, A. et al.: Performance of a new piezoceramic thick film sensor for measurement and control of cutting forces during milling. CIRP Annals 67 (2018) 1, S. 45–48

[12] Zhou, D.; Kamlah, M.; Munz, D.: Effects of uniaxial prestress on the ferroelectric hysteretic response of soft PZT. Journal of the European Ceramic Society 25 (2005) 4, S. 425–432

Lucas Hamm, M.Sc.
lucas.hamm@iwu.fraunhofer.de
Foto: Fraunhofer IWU

Dipl.-Ing. Matthias Riemer

Miguel Panesso, M.Sc.

Dr.-Ing. Wolfgang Zorn

Fraunhofer-Institut
für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Nöthnitzer Str. 44, 01187 Dresden
www.iwu.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-56, am 28.06.2024, 23:46:37
Open Access – (cc) BY – https://elibrary.vdi-verlag.de/agb