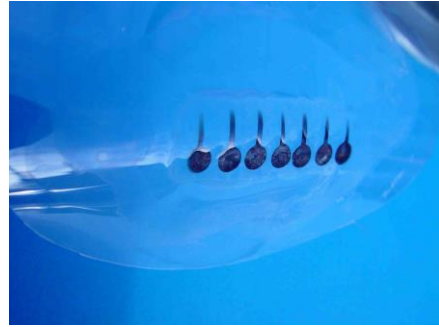


Sensoren und Aktuatoren aus PVDF- Folien und polarisiertem PVDF-Kopolymer-Lack

Piezoelektrische Folien aus PVDF sind sehr dünne und flexible aktive elektromechanische Wandler, die ca. 12% mechanischer Energie in elektrische Energie, und umgekehrt, umwandeln können. Damit sind sie sowohl als Sensor als auch als Aktuator verwendbar. Die hohe Festigkeit und Empfindlichkeit des Materials erlauben den Einsatz in einem enormen Dynamik- und Frequenzbereich, in Dickenrichtung z. B. von 10^{-8} - 10^5 N/cm², bei Frequenzen von 0,001 Hz bis zu mehreren GHz. Mit entsprechend der Messaufgabe angepassten Miniaturverstärkern lassen sich Multi-Sensorsysteme erstellen, die vielfach Messprobleme lösen können, für die andere Sensoren ungeeignet sind. Die Gestaltung der aktiven Sensorelektroden sowie ihre Anordnung untereinander kann beliebig vorgenommen werden.



Zum Entwurf der Sensoren wurden Auslegungs- und Simulationsprogramme entwickelt, welche die Optimierung der Messaufbauten ermöglichen. Neben der signaltechnischen Auslegung der Sensoren wird ihre Größe und Anordnung am Rechner entworfen und in einem computergesteuerten Prozess aus dem Rohmaterial herausgearbeitet.



Um die Piezofolie auch auf 3D-gekrümmte Oberflächen aufbringen zu können, wurden spezielle Behandlungs- und Klebeverfahren entwickelt. Neuere Entwicklungen setzen hier auf den Einsatz von flüssigem PVDF-Kopolymer-Lack, welcher extrem dünn vergossen oder gespritzt, und somit beliebig komplexen Oberflächen angepasst werden kann. Die obere Abb. zeigt eine mit bedampften Elektroden versehene Kopolymer-Schicht auf einer dünnen Trägerfolie. Die Arbeiten an den Kopolymer-Sensoren wurden gefördert durch das BMBF unter dem Förderkennzeichen 50 TK 0008.

Der Einsatz der sich rasant weiter entwickelnden SMD-Technologie auf festen und flexiblen Leiterplatten ermöglicht eine immer stärkere Miniaturisierung und optimale Anpassung der Verstärker an engste Einbauverhältnisse. Multikanalmessverstärker und Sensoren für Applikationen in unterschiedlichsten Fachgebieten wurden realisiert. So wurde z. B. eine flexible achtfach Sensorfolie entwickelt, die als dünne Einlegesohle für die Bewegungsanalyse beim Laufen eingesetzt wurde. Sie erlaubt die zeitgleiche Erfassung von acht Druckkräften sowie acht Biege-Radien unter dem Fuß. Auch wurde zur Analyse von Kaukräften eine original zerklüftete Zahnkaufäche mit oberflächenbündigen PVDF-Kopolymerensensoren (s. Abb. rechts) beschichtet.



Innovative Aspekte

Insbesondere die PVDF-Kopolymer-Technik erlaubt die Gestaltung von Sensoren und Aktuatoren, die an beliebigen 3D-gekrümmten Oberflächen aufgebaut werden können und beispielsweise dort die Normalkräfte registrieren.

Durch Variation in der Bauteilbestückung kann sowohl das Frequenzverhalten als auch die Empfindlichkeit des Messaufnehmers für extrem unterschiedliche Einsatzzwecke optimiert werden.

Mechanisch eng gekoppelte PVDF-Sensor- und Aktuator-Bereiche können in vielfältigster Weise zu Miniatur-Eigenfrequenzschwingern kombiniert werden, die auf eine Laständerung mit einer Frequenzverschiebung reagieren und somit auch statische Lasten erfassen können.

Anwendungsbereiche

Die PVDF-Folien- und Kopolymer-Sensorik eignet sich hervorragend für Anwendungen im Bereich hochdynamischer Kraft-, Druck-, Dehnungs-, Beschleunigungs-, Schwingungs- und Körperschallmessungen. Ein standardisiertes Layout und Fertigungsverfahren kann für viele Einsatzbereiche zu günstigen Kosten im Prototypenbau sowie in der Kleinserie beitragen.

Mit Hilfe numerischer Signal-Korrekturverfahren wurden weiterführende Problemlösungen realisiert, die auch quasi-statische Vorgänge erfassen und damit wesentlich breitere Anwendungsbereiche abdecken können.

Übersicht

Piezoelektrische Folien stellen aktive elektro-mechanische Wandler dar, die sich sowohl zu Sensoren als auch zu Aktuatoren über einem enormen Frequenz- (Hz-GHz) und Dynamikbereich (280dB) verarbeiten lassen.

Der Beitrag beschreibt Weiterentwicklungen, welche die Anwendungsvielfalt der Piezofolienteknik demonstrieren sollen.

Die Verarbeitungsverfahren wurden durch die Einführung von rechnergesteuerten Arbeitsschritten verbessert, neue Strecktechniken ermöglichen das Aufbringen der Folien auch auf leicht 3D-gekrümmten Oberflächen.

Durch die Verwendung modernster Verstärkerelektronik und den Einsatz digitaler Signalanalysemethoden konnte der Einsatzbereich der Piezofolienteknik sowohl im Frequenz- als auch im Dynamikumfang erheblich erweitert werden.

Neben Beispielen für den Einsatz in verschiedenen Applikationen zur Messung von Kraftverteilung und Strukturdehnung wird der Einsatz als hochempfindliches Relativ- Temperaturmessverfahren gezeigt. Weiterhin wird auf den Einsatz von Piezofolien im Aktuatorbetrieb eingegangen.

Einleitung

Piezoelektrische Folien aus PVDF sind sehr dünne aktive elektromechanische Wandler, die ca. 12 % einer mechanischen Energie in elektrische Energie, oder umgekehrt, umwandeln können. Damit sind sie sowohl als Sensor als auch als Aktuator verwendbar. Die hohe Festigkeit und Empfindlichkeit des Materials erlauben den Einsatz in einem enormen Dynamik- und Frequenzbereich, in Dickenrichtung z.B. von 10^{-8} - 10^5 N/cm², bei Frequenzen von 0,001 Hz bis GHz. Diese können, je nach Auslegung der Elektronik, bereichsweise genutzt werden. Neben den mechanischen Kräften und Verformungen registrieren PVDF-Sensorelemente auch elektrische Ladungsänderungen, die durch Temperaturänderungen hervorgerufen sein können. Ausgangspunkt der Arbeiten waren Strömungsuntersuchungen mit Multi-Sensor-Arrays. Hierauf aufbauend wurden für verschiedene Kunden Problemstellungen aus der Strömungsmesstechnik, Medizintechnik, der Fertigungs- und Automobiltechnik sowie vielen anderen Gebieten bearbeitet.

Je nach den spezifischen Anforderungen wurden mit Hilfe numerischer Signal- Korrekturen weiterführende Problemlösungen realisiert, die in ihrer Summe wiederum neue Anwendungsgebiete für die Piezofolienmesstechnik erschließen.

Die Ergebnisse fasst der vorliegende Bericht zusammen.

Messprinzip

Die Piezofolie als Messwandler ist eine elektrische Kapazität, deren Ladungszustand sich mit einer mechanischen oder thermischen Belastung verändert.

Piezofolien sind prinzipbedingt, wie auch alle anderen piezokapazitiven Messwertaufnehmer, nicht zur Erfassung statischer Lasten geeignet, weil durch unvermeidliche Fehlerströme und -spannungen im Messverstärker ein Wegdriften der Nullpunktlage verursacht wird, welches letztendlich zur Übersteuerung des Messverstärkers und damit zur Signalverfälschung führt.

Aus diesem Grunde werden Ladungsverstärker mittels eines Entlade-Widerstandes stabilisiert, welcher das Ausgangssignal stets mit einer definierten Zeitkonstante ($T = R \cdot C$) zum Null-Niveau zurückführt. Eine Übersteuerung kann somit vermieden werden, die Drift tritt nur noch als stabiler Offsetfehler in Erscheinung. Durch die R/C-Kombination werden alle Vorgänge in der Nähe und unterhalb der Grenzfrequenz, $f_{gu} = 1/(2 \cdot \pi \cdot R \cdot C)$, frequenzabhängig in ihrer Amplitude gedämpft und der statische Anteil wird bei Beginn der Messung auf Null gesetzt. Innerhalb der zulässigen Lastgrenzen für das verwendete Sensormaterial kann jede beliebige Vorlast als Null-Niveau definiert werden. Soll die Vorlast selbst bestimmt werden, so lässt sich dies oftmals mit

einer absichtlich herbeigeführten Dynamisierung durch kurzzeitiges wegnehmen und wiederaufbringen der Last erreichen.

Mit modernen digitalen Datenerfassungskarten und Signalverarbeitungsverfahren lassen sich die Grenzen einer analogen Sensor- Verstärkerlösung erheblich ausweiten. Langsame Ereignisse unterhalb der Verstärkergrenzfrequenz können im vollen Dynamikumfang der PVDF-Folien mit ca. 280dB aufgelöst werden.

Korrekturverfahren

Zur Durchführung erfolgreicher Messsignalkorrekturen müssen alle Störfaktoren minimiert und von der gewünschten Messgröße sorgfältig isoliert werden. Dies wird insbesondere für sehr niederfrequente, quasi-statische Prozesse zunehmend wichtig.

Bei der Signalaufnahme ist es unerlässlich, das Übersteuerungen der Verstärker, wie in Bild 1 gezeigt, vermieden werden.

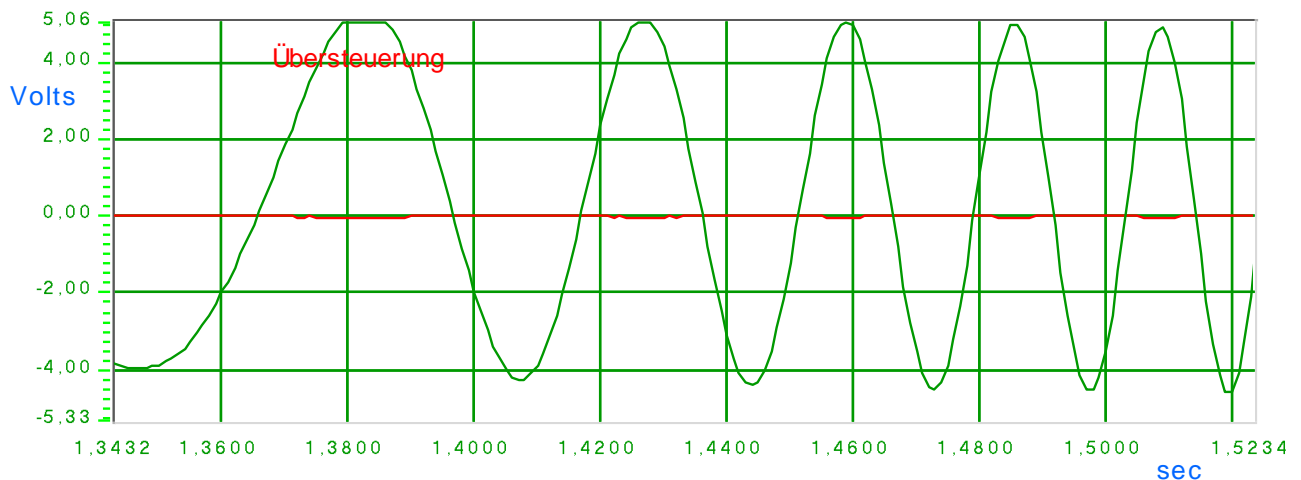


Bild 1: Beispiel für eine Signalübersteuerung

Mit der numerischen Nachbearbeitung von korrekt digitalisierten Sensorsignalen ergeben sich folgende Erweiterungsmöglichkeiten:

- Bestimmung und Korrektur des Verstärker- Offsetfehlers zu einem frei definierbaren Zeitpunkt und Ruhezustand.
- Optimierung der elektrischen Aussteuergrenzen durch günstige Dimensionierung der Bauteile.
- Korrektur der unteren Grenzfrequenz bis auf 0 Hz (quasistatisch), und damit ein Dynamikgewinn für langsame Signalanteile bis an die Sensor- Lastgrenzen des PVDF- Materials (280 dB).

Nicht korrigierbare Fehler

Das Korrekturverfahren ist durch die Summe aller Störeinflüsse zeitlich mehr oder weniger eingeschränkt verwendbar. Bei einer Kraft- oder Dehnungsmessung wird die Temperaturdrift am Sensor in der Regel der limitierende Faktor sein, umgekehrt wird eine Temperaturmessung durch einen Kräfteinfluss gestört. Allgemein wachsen die Fehler proportional zur Dauer der Messung. Insbesondere bei der offenen Montage des Sensors an einer Oberfläche können Temperaturänderungen ähnlich schnell ablaufen und sind dann von den Kraft- oder Dehnungsänderungen nicht mehr unterscheidbar. In diesem Falle muss die gesamte Messumgebung auf ein sehr stabiles, einheitliches Temperaturniveau gebracht werden.

Das Verhältnis der Pyro- zur Piezo-Konstanten (p/d_{33}), sowie die verwendete Sensorfläche bestimmen das Gleichgewicht. Bei 1 cm^2 Sensorfläche erzeugt eine Temperaturänderung von $1/10 \text{ }^\circ\text{K}$ eine ähnlich große Ladungsmenge, wie sie durch 1 N Kraftänderung hervorgerufen wird. Im Bild 2 ist der Einfluss eines zunächst nicht korrigierten Offsetfehlers überlagert von langsamen Temperaturschwankungen über einen Zeitraum von 60 Sekunden während mehrerer Kraftmessungen dargestellt. Die Kraftänderungen lassen sich in den steilen Flanken erkennen.

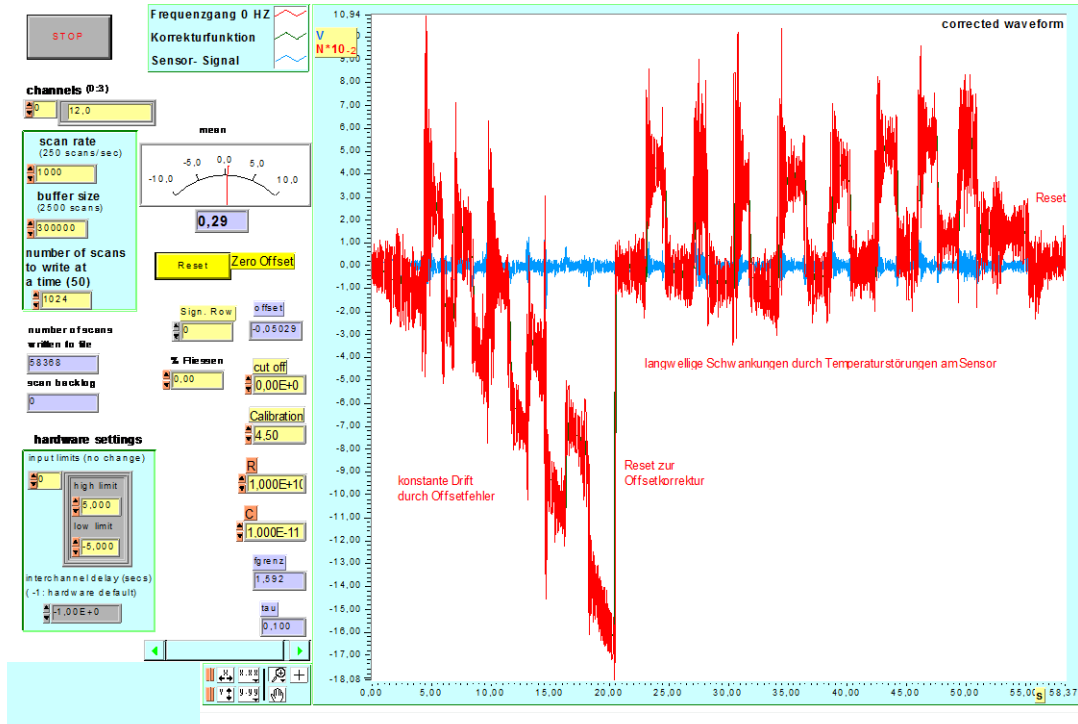


Bild 2: Dreizehn Wiegevorgänge mit einem Papierblatt unter Störeinflüssen.

Der Kraftverlauf nach dem Reset kann in der Ausschnittdarstellung in Bild 3 für eine kurze Zeitspanne direkt an der Skala abgelesen werden.

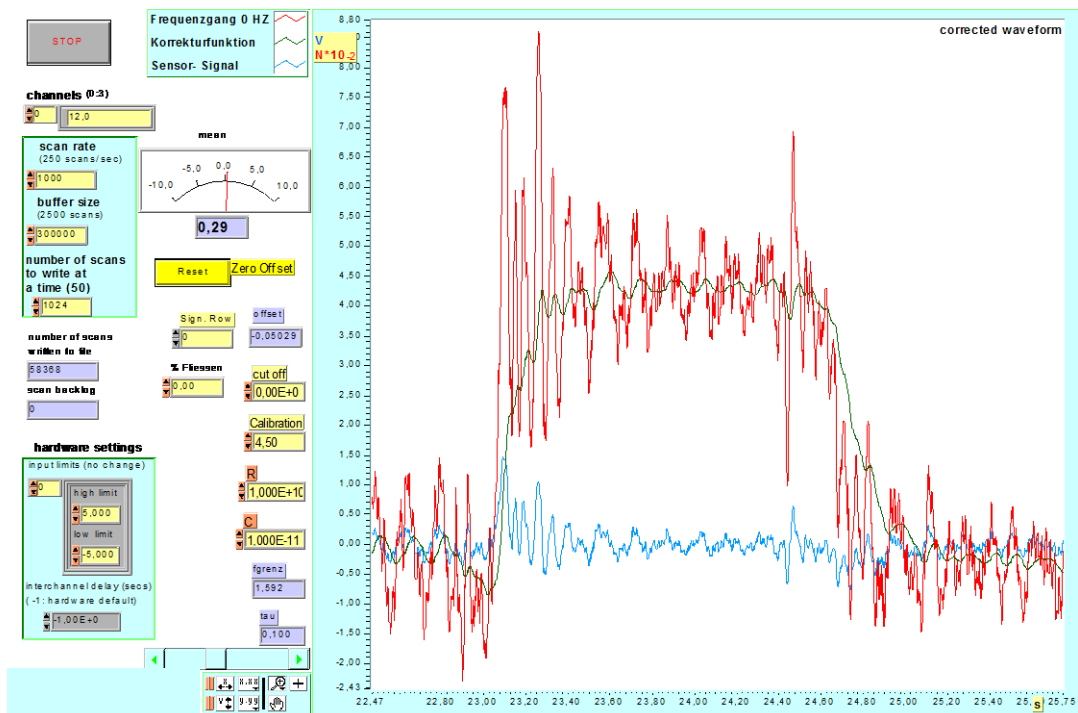


Bild 3: Sensorsignal und korrigierter Kraftverlauf bei auflegen eines Papierblattes

Bild 3 zeigt (untere Linie) ein PVDF- Sensorsignal bei einer Kraftbelastung mit ca. 0,045 N durch auflegen eines Papierblattes. Der Sensor ist hierbei durch eine Gewichtskraft von 10 N statisch vorbelastet. Der Verstärker ist auf eine Grenzfrequenz von 1,6 Hz ausgelegt, die Empfindlichkeit beträgt 6,6 V/N.

Bedingt durch die hohe Empfindlichkeit sind im Sensorsignal auch abklingende Störschwingungen des Messaufbaus zu erkennen.

In der oberen Kurve ist das Sensorsignal numerisch auf 0 Hz Grenzfrequenz korrekturgerechnet und ein Kalibrationsfaktor zur Darstellung in $\text{N} \cdot 10^{-2}$ hinzugefügt. Die Kurve zeigt einen mittleren Kraftverlauf entsprechend dem Gewicht des Papierstücks von 0,045 N.

Temperaturmessungen

Bild 4 zeigt mehrere Phasen der Erwärmung und Abkühlung mit Hilfe eines Peltier- Elementes, die über einen Zeitraum von 10 Minuten mit einer Amplitude von max. $0,14^\circ\text{C}$ erzeugt wurden. Zur Aufzeichnung wurde ein Cu-Ni Folien- Thermoelement verwendet. Die Rauschamplitude (Messunsicherheit) beträgt dabei trotz vielfacher Mittlung der Messwerte noch ca. $4/100^\circ\text{C}$.

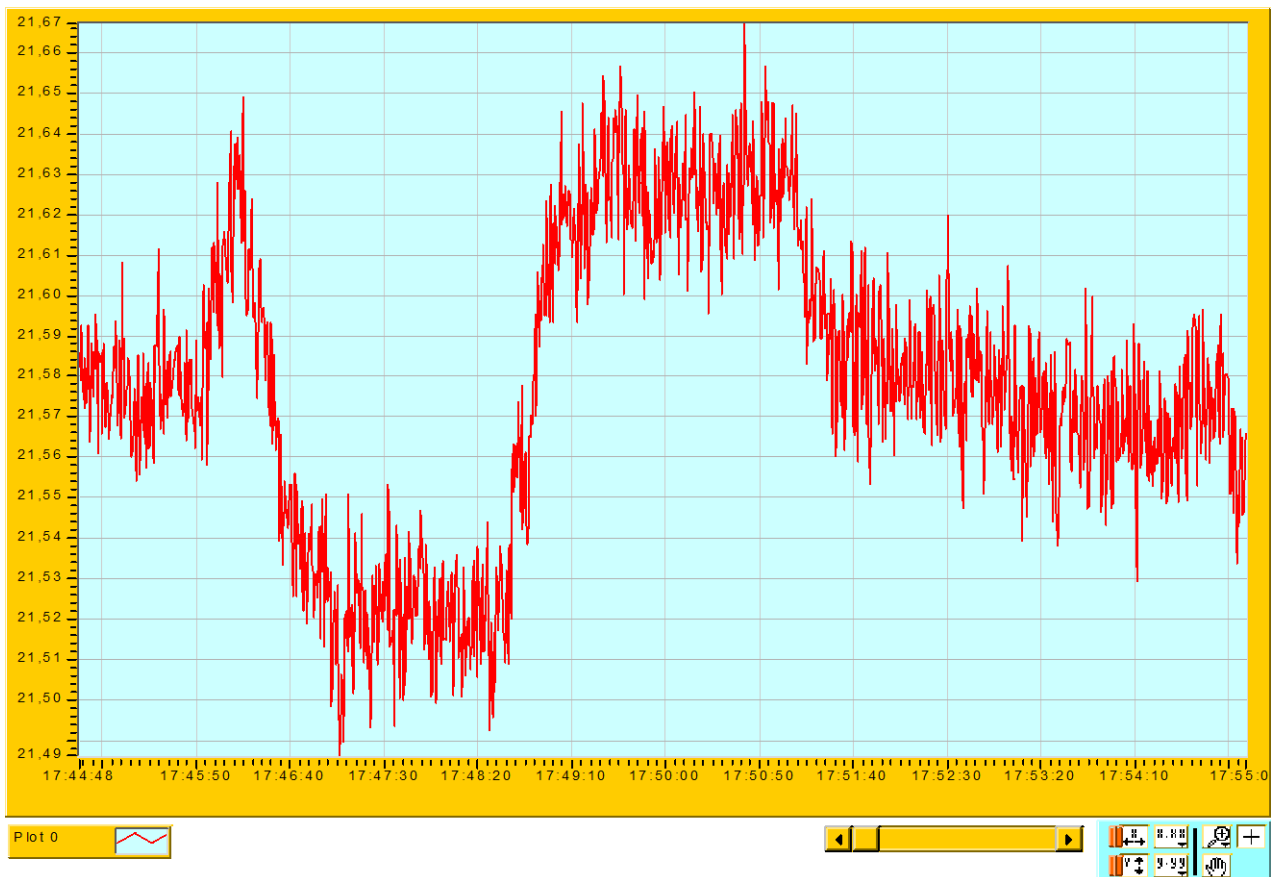


Bild 4: Temperaturverlauf am Thermoelementsensoren, max. Auflösung ca. $4/100^\circ\text{C}$

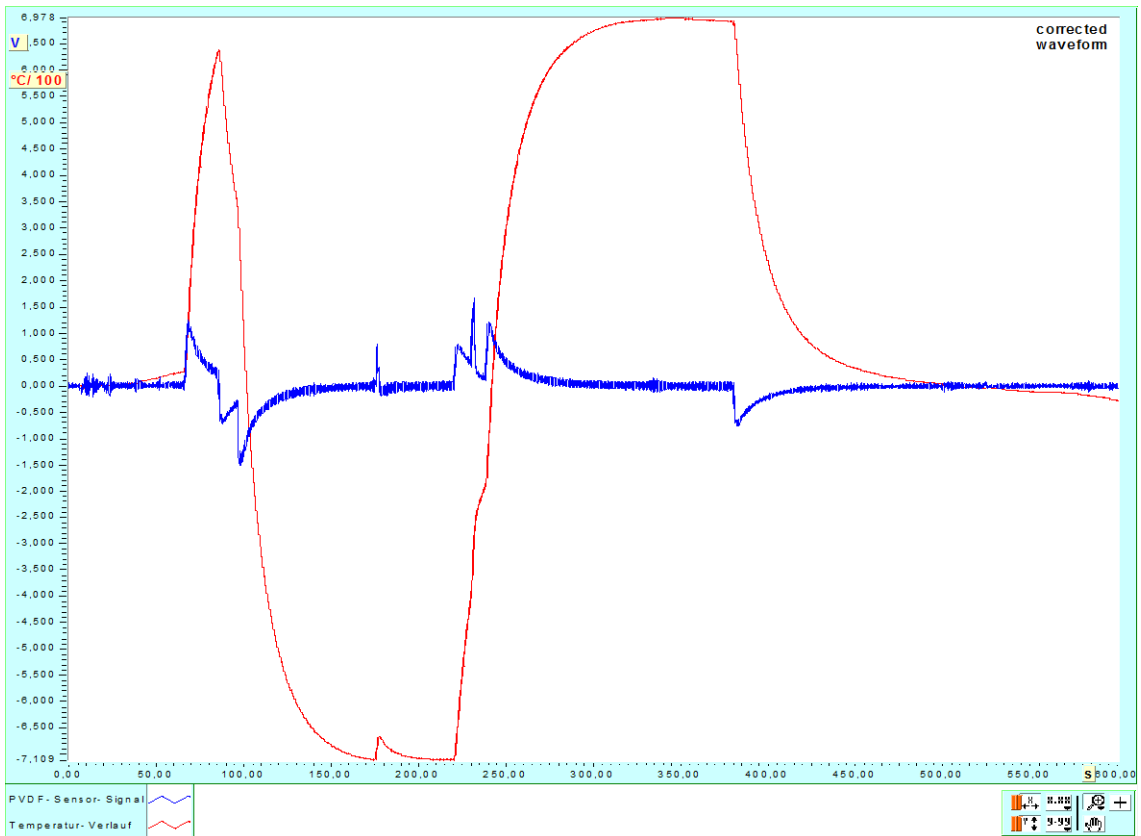


Bild 5: PVDF-Sensorsignal und korrekturgerechnete Temperaturverlaufskurve.

Das enorme, ca. 1000fach feinere Auflösungsvermögen eines zeitgleich aufgezeichneten und korrekturgerechneten PVDF- Temperatur Sensors in Bild 5 ist nochmals verdeutlicht im Ausschnitt in Bild 6 dargestellt. Hier zeigt sich eine Rauschamplitude von insgesamt ca. $4/100000^\circ\text{C}$, wobei die wesentlichen Störungen durch Netzbrummspannungen verursacht sind, deren Abschirmung weiter verbessert werden könnte.

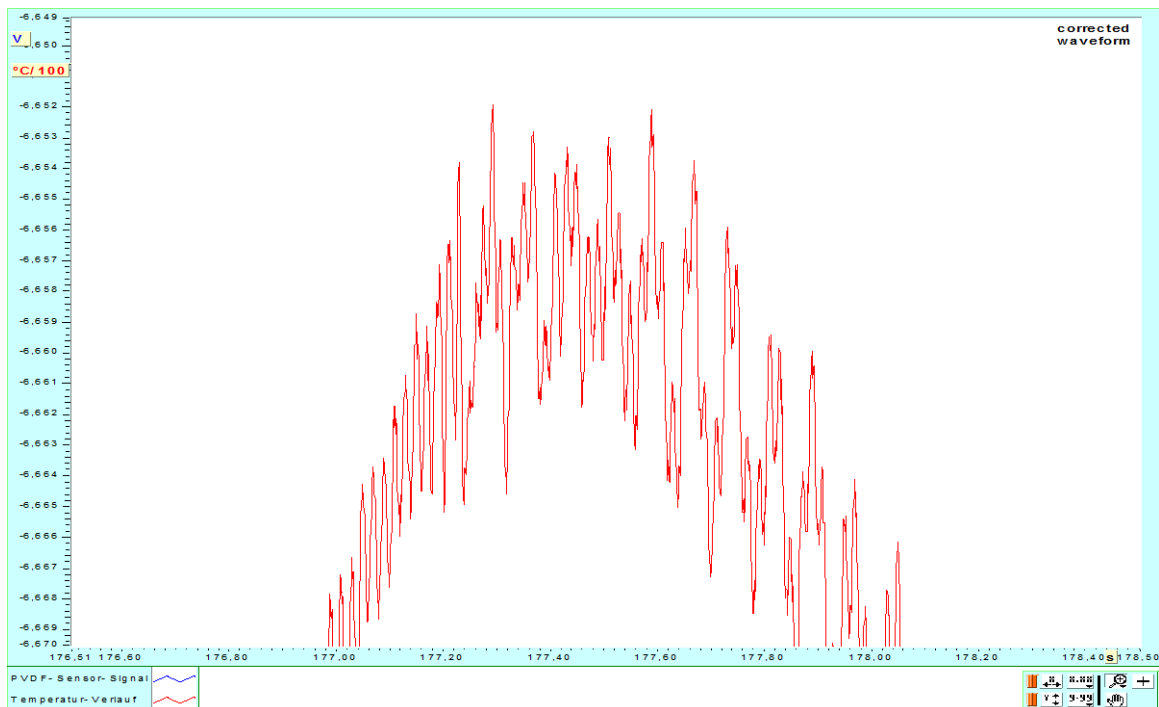


Bild 6: Ausschnitt aus dem korrekturgerechneten PVDF- Temperaturverlauf mit einer Auflösung von ca. $4/100000^\circ\text{C}$

Weiterentwicklungen zur Sensorfolienverarbeitung

Zur Steigerung der Fertigungsrate und Qualität ergab sich die Notwendigkeit, die Herstellung komplexer Sensor-Strukturen rechnergesteuert zu fertigen.

Zum Entwurf der Sensoren wurden Auslegungs- und Simulationsprogramme entwickelt, welche die Optimierung des Messaufbaus unterstützen. Neben der signaltechnischen Auslegung der Sensoren wird ihre Größe und Anordnung am Rechner entworfen und in einem computergesteuerten Prozess aus dem Rohmaterial herausgearbeitet. Bild 7 und 8 zeigen Beispiele für Multi-Sensorarrays, welches mit dieser Technik gefertigt wurden.

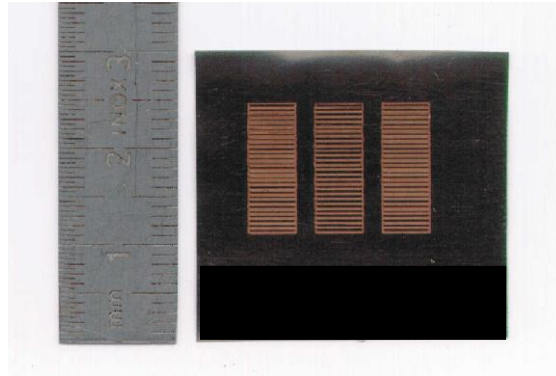


Bild 7: Hochauflösendes Sensorarray mit 3x27 aktiven Bereichen.

Um Piezofoliensensoren auch auf gekrümmte 3D Oberflächen aufbringen zu können, wurden spezielle Behandlungs- und Klebeverfahren entwickelt. Bild 8 zeigt eine Anwendung am Beispiel einer künstlichen Meniskusscheibe, welche die Druckkraftverteilung zwischen dem Oberschenkel-Gelenkkopf und der Meniskusscheibe messen soll.



Bild 8: Künstlicher Meniskusknorpel mit 14 Sensoren auf der 3D gekrümmten Gleitfläche.

Messverstärkersysteme

Die Verstärker für Piezofolienmesssysteme sollten so nah wie möglich am Sensor sitzen, um elektrische Störungen zu minimieren. Der Einsatz der sich rasant weiterentwickelnden SMD-Bauweise auf festen und flexiblen Leiterplatten ermöglicht eine immer stärkere Minaturisierung und optimale Anpassung der Verstärker an engste Einbauverhältnisse. Verschiedenste Ein- und Mehrkanalmessverstärker wurden realisiert. Bild 9 zeigt einen 24 Kanal- Ladungsverstärker mit einer Fernsteuerung der Empfindlichkeit, der speziell für den Einsatz in einen aerodynamischen Testkörper unter Tieftemperaturbedingungen bis -140°C entwickelt wurde.

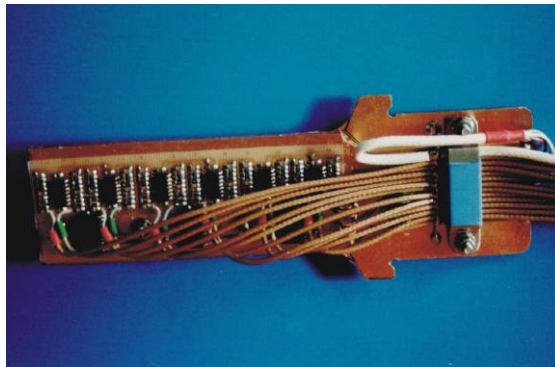


Bild 9: 24-Kanal- Sonden- Messverstärker, für Temperaturen bis -140°C .

Für die Darstellung, Bearbeitung und Speicherung der Messwerte werden überwiegend PC-basierte Hardware (Einsteckkarten) in Kombination mit objektorientierter Software (virtuelle Instrumente) eingesetzt. Durch die stete Verbesserung der Rechnerleistungen und der Aufnahmekarten werden immer umfangreichere und präzisere Bearbeitungen der digitalisierten Daten möglich (online- Filterung, FFT, ...).

Integrierte Sensor- Verstärkersysteme

Für Anwendungen zur Messung von Schwingungen und Dehnungen an Bauwerken, Fahrzeugen und Maschinen sowie zum Einsatz in Sicherheitssystemen wurde ein Standard- Messwertaufnehmer entwickelt.

Der integrierte Miniaturaufnehmer in Bild 10 beinhaltet einen Piezofoliensensor sowie einen Vorverstärker und stellt, oberhalb der Grenzfrequenz, ein dehnungsproportionales Ausgangssignal zur Weiterverarbeitung bereit. Die flexible Konstruktion erlaubt eine Montage an gekrümmten Oberflächen und ist aufgrund seiner geringen Masse auch an schnell rotierenden Systemen einsetzbar.

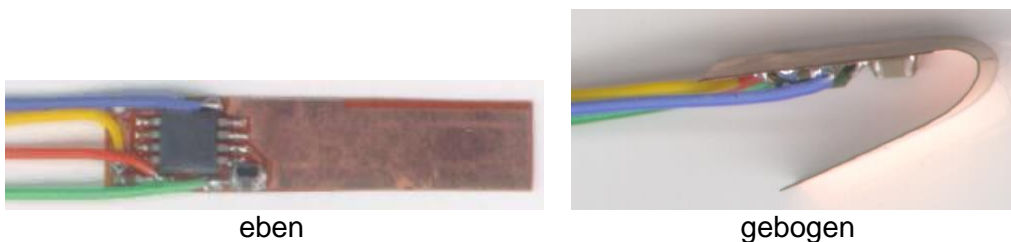


Bild 10: Miniatur Messaufnehmer.

Durch variieren der Bauteilbestückung kann sowohl das Frequenzverhalten als auch die Empfindlichkeit des Messwertaufnehmers für extrem unterschiedliche Aufgabenstellungen optimiert werden.

Aktuatoren

Durch anlegen einer elektrischen Spannung bewegt sich die Folie sowohl in Längs- als auch in Dickenrichtung, was für eine Vielzahl von Aktuatoren verwendet werden kann. Die erreichbaren Kräfte sind zwar im Vergleich zu keramischen Piezoaktuatoren kleiner, die Auslenkungen jedoch deutlich höher; eine Materialermüdung konnte dabei bisher nicht beobachtet werden.

Ein Vorteil besteht darin, dass die Piezofolien in beliebiger Form und Orientierung auch auf gekrümmte und flexible Oberflächen angepasst und ineinander verschachtelt werden können. Damit lassen sich beispielsweise auch komplizierte Dreh- Längs- und Biegeschwingungen in einem Bauteil kombinieren.

Bild 12 zeigt das Aktuatorprinzip und Beispiele, wie Aktuatoren für verschiedene Bewegungen aufgebaut sein können.

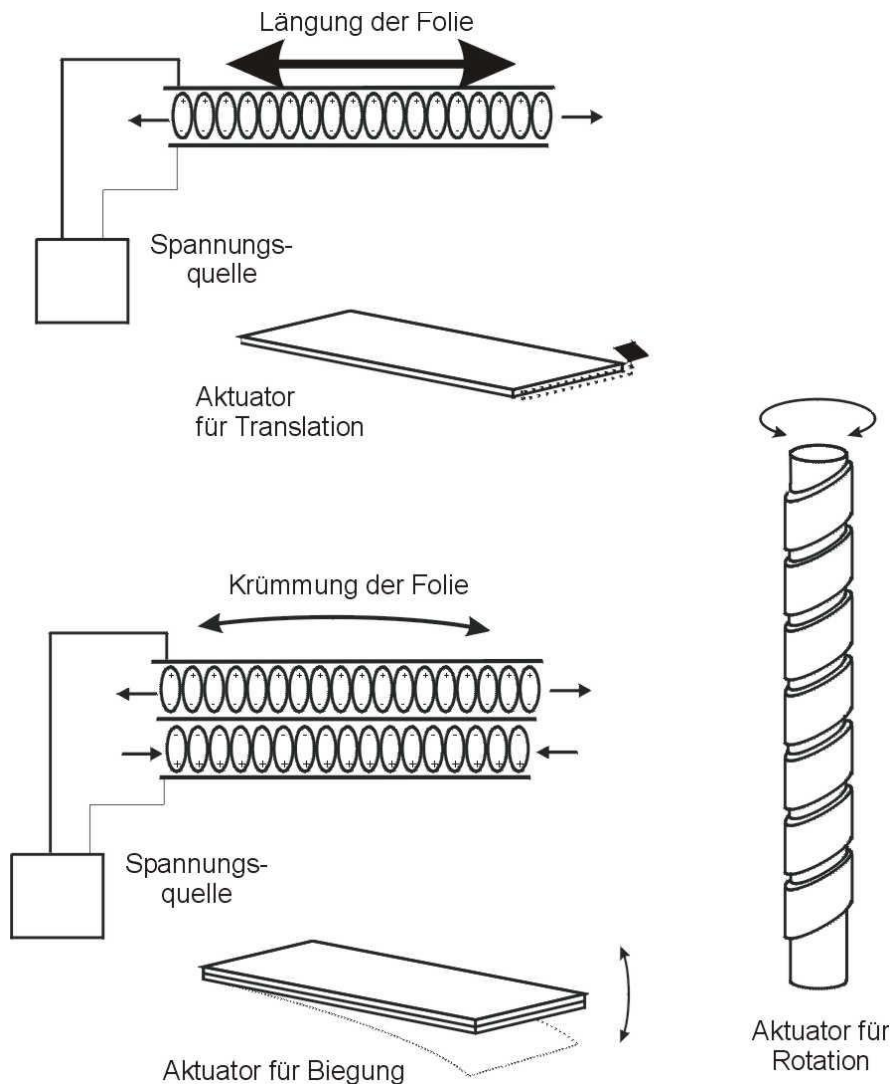


Bild 12: Aktuatorprinzip und Bauformen.

Zwei Demonstratoren sind in Bild 13 gezeigt, beim linken, aufrechten Stab ist eine PVDF-Folie zur Erzeugung von Torsionsschwingungen spiralförmig aufgewickelt (Drehschwingung des diagonalen Stabes), der rechte Aktuatorstab wird durch zwei Längsfolien zu Biegeschwingungen angeregt.

In Bild 14 ist eine Aktuator-Manschette um einen Kunststoffbecher montiert. Der Aktuator besteht aus insgesamt sechs elektrisch getrennten Biegeelementen, die mit Hilfe einer Dreiphasen Ansteuerspannung eine oval umlaufende Verformung des Bechers bewirken und hierdurch das rotierende Wellenmuster erzeugen.

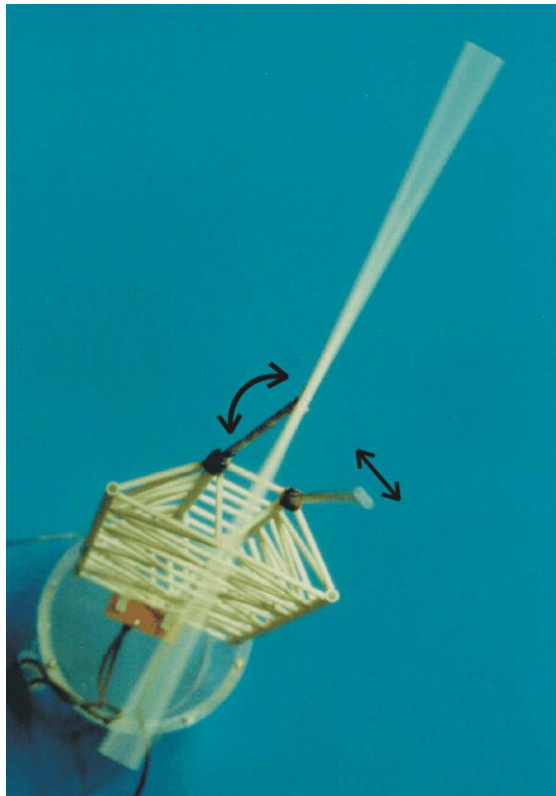


Bild 13: Aktuatoren für Torsions- (links) und Biegeschwingung (rechts).

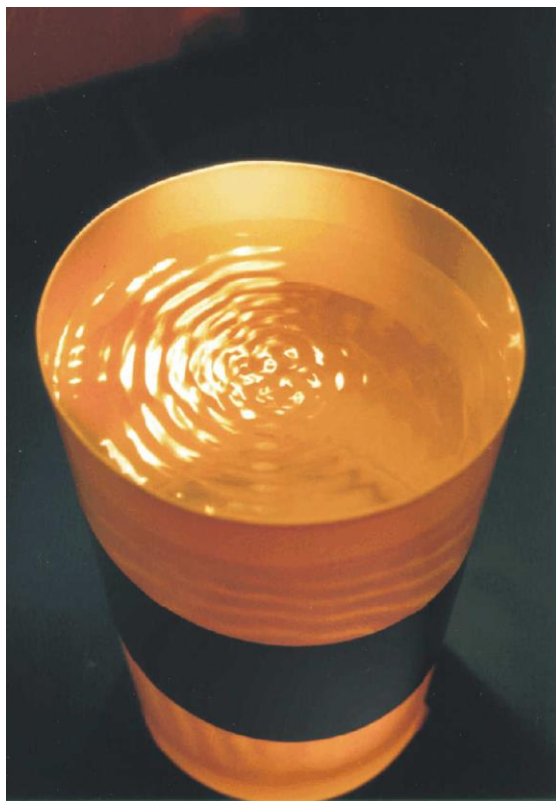


Bild 14: Biegewellen- Aktuator- Manschette erzeugt umlaufende Wellenmuster.

Zusammenfassung

Piezofolien Sensorsysteme können mit sehr hoher Empfindlichkeit ausgelegt werden. Unter Zuhilfenahme einer numerischen Korrektur der Verstärker- Grenzfrequenz kann die Dynamik des Messsystems für relativ langsame Signalanteile enorm gesteigert werden, so dass auch sehr kleine, quasi- statische Kräfte, Dehnungen- oder Temperaturvariationen darstellbar werden.

Es konnte gezeigt werden, dass über Messzyklen im Minutenbereich Auflösungen von bis zu einem Hunderttausendstel Grad oder wenigen mN erreichbar sind.

Die enorme Auflösung ermöglicht einerseits Anwendungen im Infrarot Strahlungsbereich, oder bei Freisetzung kleinster Wärmemengen z. B. in Strömungswirbeln oder bei chemischen Reaktionen, Erwärmung von Low-Power Elektronik Komponenten, Dämpfungswärme in Kunststoffen etc.. Andererseits können preiswert hochempfindliche Kraft- oder Dehnungs- sowie Beschleunigungs- und Schwingungsmesssysteme realisiert werden.

Auch beim Einsatz als Aktuatoren lassen sich Piezofolien durch ihre Flexibilität und monoaxiale Orientierung zu einer unendlichen Vielfalt von Lösungen kombinieren. Vorteilhafte Anwendungsgebiete liegen bei optischen Verstell- und Anzeigeeinrichtungen, in der Anregung oder Dämpfung leichter Strukturen, berührungslosen Vibrations- Transportsystemen oder Flüssigkeitsmischern.

Nachwort

Die hier vorgestellten Prinzipien und Anwendungsbeispiele können nur einen bescheidenen Eindruck vom gigantischen Einsatzspektrum der PVDF-Folien vermitteln, es sollte zur Anregung der Phantasie des Lesers dienen.

Bei der Bewältigung Ihrer Mess- und Aktuator-Probleme stehen wir Ihnen gern mit unseren vielfältigen Erfahrungen aus zahlreichen Kundenprojekten zur Entwicklung neuer Ideen, sowie zur Projektierung, Fertigung und zum Test neuer Lösungen zur Verfügung.

Anwendungsbeispiele mit piezoelektrischen Kopolymerensensoren

Einleitung

Der piezoelektrische Effekt in Kunststoffen ist seit vielen Jahren bekannt, vor allem durch den Einsatz von PVDF- Folienmaterial. Ähnlich, gute Sensor Eigenschaften lassen sich in gegossenen oder gespritzten Kopolymerschichten durch ein geeignetes Polarisations- und Fixierungsverfahren herstellen. In Kooperation mit dem IAP der Fraunhofergesellschaft wurden im Rahmen des BMBF- Förderprojektes 50TK0008 Piezoelektrische Sensoren und Aktuatoren auf Basis von PVDF- Kopolymeren hergestellt und praktischen Signaltests unterzogen.

Als herausragende Eigenschaft ist das Kopolymer als einziges Sensormaterial sehr gut an dreidimensional gekrümmte Oberflächen applizierbar, ferner besitzt es eine sehr hohe Flexibilität, die auch Anwendungen in nachgiebigen Strukturen ermöglichen. Die hier vorgestellten Sensortypen und Technologien sollen einen kleinen Eindruck von den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten vermitteln, welche die Mirow Systemtechnik GmbH gern in Ihre kundenspezifischen Sensorlösungen einbringen kann.

Die Untersuchungen haben gezeigt, das flüssig gespritzte oder vergossene, piezoelektrisch aktivierte PVDF- Kopolymer- Schichten für sehr unterschiedliche Sensor- und Aktuator- Anwendungen verwendet werden können. Insbesondere auf stark mehrdimensional gekrümmten Oberflächen können mit PVDF- Kopolymeren Sensor- und Aktuator- Felder mit einer perfekten Konturanpassung aufgebaut werden. Dies soll hier am Beispiel eines Sensorfeldes in der Zahn Kaufläche für ein künstliches Gebiss gezeigt werden.

Präparierte Sensoren, Testergebnisse

1. Fünf Druckkraftsensoren in einer Zahnkaufäche zur Prüfung der Putzeigenschaften von Zahnbürsten.

Ein Backenzahnmodell wurde mit an die Kontur angepassten Anschluss- Elektroden präpariert und mit einer Kopolymerschicht „lackiert“ und polarisiert. Die Elektrodenbereiche bilden nach der Anbringung einer äußeren Metall- Beschichtung die einzelnen piezoelektrischen Messpunkte.



Bild 1: Präparierte Sensorbereiche in einer Zahn- Kaufäche mit Negativabdruck.

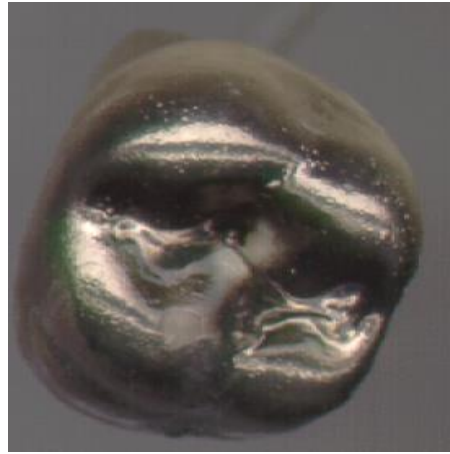


Bild 2: Kopolymer Sensoren mit Metallbedampfung in der Kaufläche eines Zahnmodells.

Bild 3 zeigt die Veränderungen der lokalen Druckkräfte an den einzelnen Messpunkten in der Zahnkaufäche, bei langsamer Bewegung einer rotierenden und schlagenden Zahnbürste.

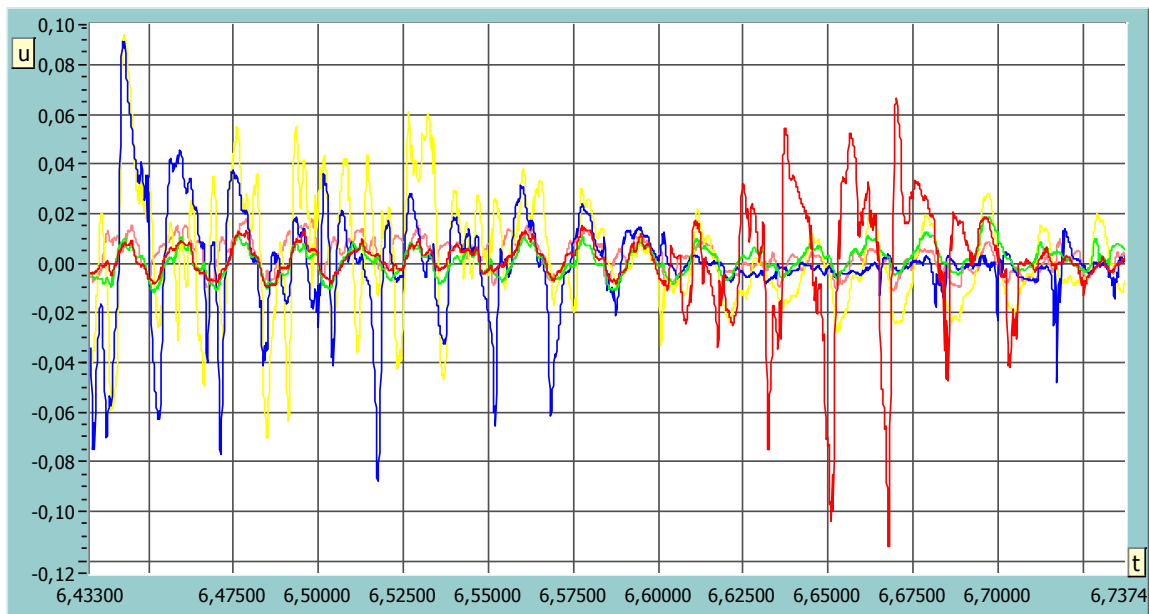


Bild 3: Zahnputz- Drucksignale einer elektrischen 3D- Zahnbürste.

2. Schuheinlegesohle mit einem flexiblen achtfachen Doppelsensorsystem zur Erfassung der Druckkräfte und Durchbiegungen in der Schuhsohle.



Bild 4: Rohbau des flexiblen Fußsohlensensors mit acht Doppel- Sensor- Bereichen.

Je ein Doppelsensor auf Ober- und Unterseite des Flex-Trägermaterials kann durch digitale Signalverarbeitung zu einem Druck- sowie einem Biegesignal verarbeitet werden. Dies kann nach Bild 6 zu einer Bewegungsanalyse verwendet werden, da nicht nur die Druckkräfte unter dem Fuß, sondern zeitgleich dazu der Bewegungsablauf in der Schuhsohle erfasst wird.



Bild 5: Fußsohlensensor mit integriertem Verstärkersystem als Einlegesohle präpariert.

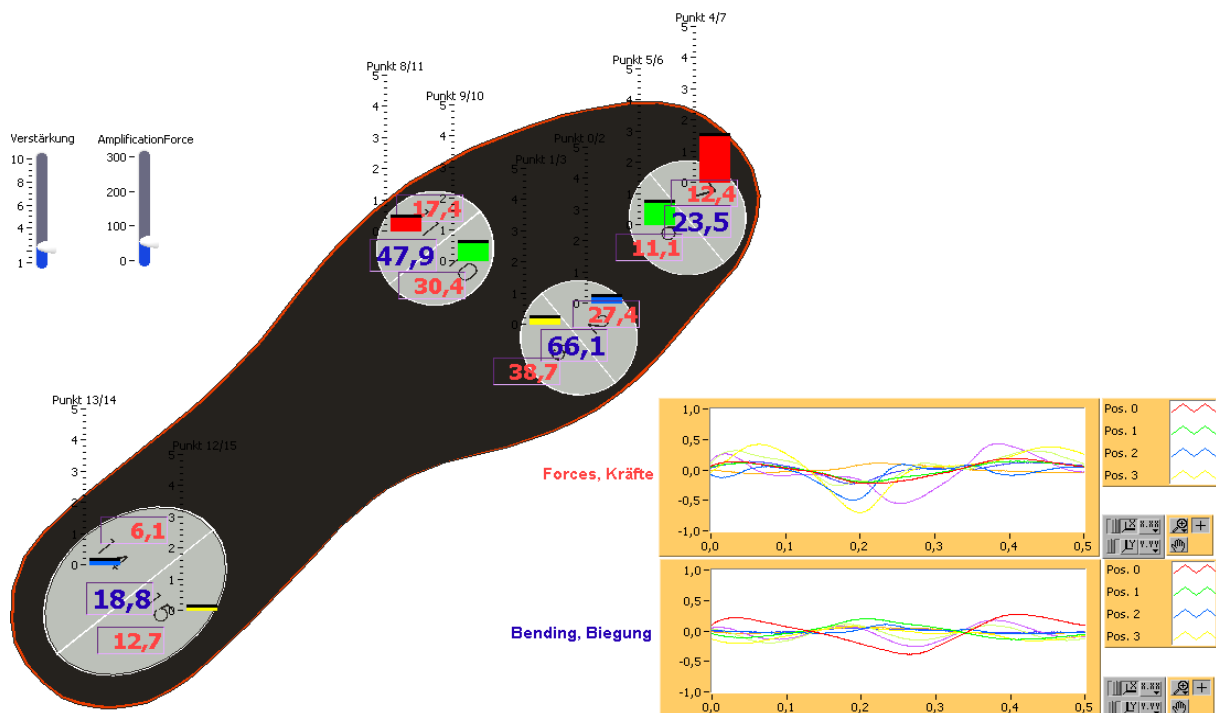


Bild 6: Darstellung der dynamischen Druckkräfte und Durchbiegungen im Schuh.

3. Multisensorsystem zur Erfassung der radialen oder axialen Walzenanpresskräfte. Flexible Sensoren sind ebenfalls erforderlich zur Bestimmung von Walzenpresskräften an gummierten Walzen. Das hier vorgestellte Sensorsystem besteht aus einem 16 Kanal Array, welches entsprechend Bild 8 die dynamischen radialen Druckkraft Änderungen beim Durchlauf durch die Presszone als elektrische Spannungen anzeigt. Bei Vor- und Rücklauf liegen, aufgrund der wankenden Gummistruktur leicht veränderte Kraftverhältnisse vor.



Bild 7: Flexibler Walzendruck Sensor mit 16 abgewinkelten Messflächen.

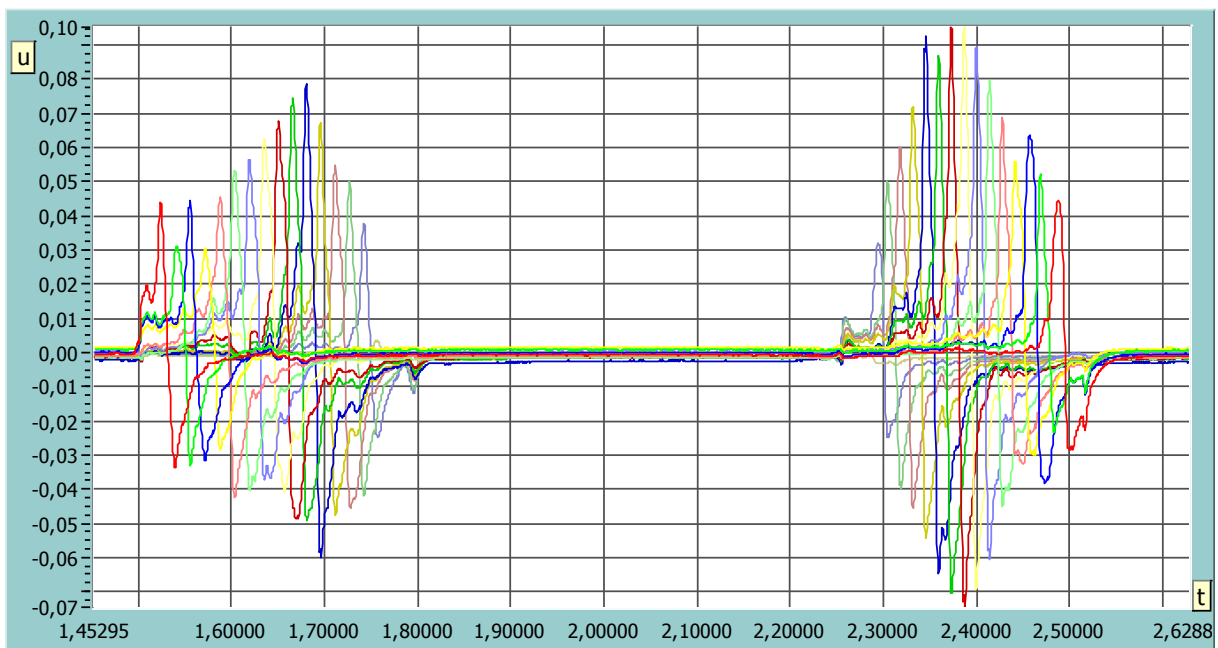


Bild 8: Vorwärts/rückwärts Erfassung der radialen Druckkräfte zwischen zwei Gummiwalzen.

Zusammenfassung

Bei den Funktionstests mit den Piezo-Kopolymer-Sensoren konnte für alle 3D- sowie flexiblen Sensorstrukturen eine auswertbare Sensorreaktion nachgewiesen werden. Meist wurden Druckempfindlichkeitswerte um 30 pC/N erreicht, die denen von PVDF- Folien ähneln. Eine hohe Temperaturfestigkeit des Sensorträgers von ca. 160°C ist eine wichtige Vorbedingung für eine hohe Sensitivität.

Ein wesentlicher Unterschied zur PVDF-Folie liegt in der stets homogen orientierten Dehnungsempfindlichkeit der Kopolymerschicht. Monoaxiale Dehnungseigenschaften wie bei verstreckten PVDF- Folien können nicht erreicht werden. Die realisierbaren Sensorschichtdicken liegen derzeit bei ca. 10 µm. An dünneren Schichten wird gearbeitet.

Insgesamt konnten mit den untersuchten Verfahren sehr erfolgreich Multisensorsysteme realisiert werden. Der Aufbau konnte dabei so gestaltet werden, dass eine hohe Störstrahlsicherheit auch bei Feldstärken über 40 V/m erreicht wurde. Somit sollten Anwendungen auch unter schwierigen Bedingungen beispielsweise in Fahrzeugen oder in der Nähe elektrischer Geräte möglich sein. Zukünftige Entwicklungen im Strömungssensorbereich lassen eine erfolgreiche Verwendung der Technologie für feinere Auflösungen bis zu „bildgebenden“ Monitoring Systemen erwarten.

Gern erwarten wir Ihre Kontaktaufnahme, um für Ihre Anwendungsidee ein kundenspezifisches Lösungskonzept mit Ihnen zu diskutieren.

Kontakt:



MIROW Systemtechnik GmbH

Kaiserin-Augusta-Allee 10
10553 Berlin

Tel: +49 (0) 30 34 79 45 16
Fax: +49 (0) 30 34 79 45 29

sensorik(at)mirow.de
<http://www.mirow.de/>