

# KRAFT-, DEHNUNGS- UND DRUCKAUFNEHMER BASIEREND AUF FOLIEN-DMS UND DEM PIEZOELEKTRISCHEN PRINZIP FÜR DEN EINSATZ IN INDUSTRIELLEN ANWENDUNGEN

**André Schäfer**

Dr.-Ing.; Hottinger Baldwin Messtechnik, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt, Deutschland

**Zusammenfassung:** Die Sensorik in industriellen Prozessen erfordert verstärkt sowohl schnelle Datenverarbeitung als auch sehr genaue Messungen, weil Hersteller eine gleichbleibend zuverlässige Qualitätskontrolle in ihrer Produktion erwarten. Kraft-, Dehnungs- und Druckaufnehmer von HBM messen statische und dynamische Einwirkungen entsprechend den Erfordernissen der jeweiligen Messaufgabe unter Einsatz modernster Technologie.

**Schlüsselwörter:** Kraft-, Dehnungs- und Druckaufnehmer, Dehnungsmessstreifen, piezoelektrisches Prinzip

## EINLEITUNG

In industriellen Prozessen sind zwei scheinbar gegensätzliche Tendenzen zu beobachten. Eine Tendenz zeichnet sich schon seit einiger Zeit ab, nämlich die Forderung nach immer schnelleren Prozessen. Im Gegensatz dazu ist Qualität und somit die Messgenauigkeit während der Fertigung wichtiger denn je.

Die Gründe für diese Tendenzen liegen klar auf der Hand. Sowohl die Arbeitskosten als auch der Wert der Waren, vor allem der Rohstoffe, aus denen sie hergestellt werden, steigen. Dies wird sich auch in den nächsten Jahren fortsetzen, allerdings sind den Preissteigerungen der Fertigerzeugnisse Grenzen gesetzt. Marktsensitivität bedeutet, dass Hersteller den Preis ihrer Produkte nicht um die volle Kostenlast erhöhen können. Dadurch bleibt ihnen als einzige Option, die Produktionsleistung in den industriellen Prozessen zu steigern. Das bedeutet, dass Produktprüfungen erst nach Fertigstellung durchgeführt werden können, doch die Auswahl der Materialien muss in einem frühen Stadium der Produktion erfolgen, um Material- und Arbeitskosten auf möglichst niedrigem Niveau in Grenzen zu halten. Daraus ergibt sich ein Bedarf an schneller Datenverarbeitung und gleichzeitig sehr genauen Messungen.

## GRUNDLAGEN DER SIGNALERFASSUNG

Es lohnt sich, sich mit den grundlegenden Messprinzipien zu befassen, um sie miteinander vergleichen zu können.

HBM verfügt über mehr als 55 Jahre Erfahrung in der Messtechnik, und unser Erfolg beruht größtenteils auf dem Prinzip des Dehnungsmessstreifens (DMS). Die Anwendung jeder Messgröße – Kraft, Dehnung oder Druck – verursacht eine Verformung im Messkörper, die mit DMS bestimmt werden kann.

Im elastischen Verformungsbereich eines Materials beruhen die Methoden zur Berechnung der Materialspannungen aus den gemessenen Dehnungen auf dem Hookeschen Gesetz. In seiner einfachsten Form lautet das Hookesche Gesetz [1]:

$$s = e \cdot \epsilon \quad (1)$$

mit  $s$  = Materialspannung,  $e$  = Dehnung und  $\epsilon$  = Elastizitätsmodul des Materials

Diese Variante des Hookeschen Gesetzes gilt nur für den einachsigen Spannungszustand. Andere Spannungszustände erfordern erweiterte Varianten.

Diese Dehnung kann von den bekannten DMS erfasst werden, die in den Abbildungen [2], [3] dargestellt sind.

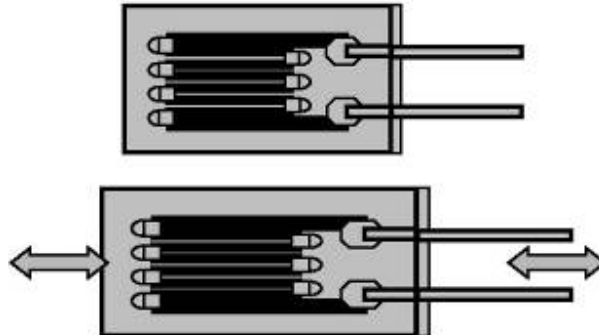


Abbildung 2. Schematische Skizze eines DMS a) Ursprüngliche Situation b) Durch die Krafteinwirkung veränderter Widerstand

Die Änderung seines Widerstands ist

$$\Delta R/R_0 = k \cdot \epsilon \quad (2)$$

mit  $\epsilon$  = Dehnung,  $k$  = k-Faktor,  $\Delta R$  = Widerstandsänderung und  $R_0$  = Grundwiderstand. Die andere Möglichkeit besteht darin, das piezoelektrische Prinzip zu nutzen. Die nachfolgende Abbildung zeigt, was mit dem Kristall geschieht, wenn auf ihn eine Druckkraft ausgeübt wird.

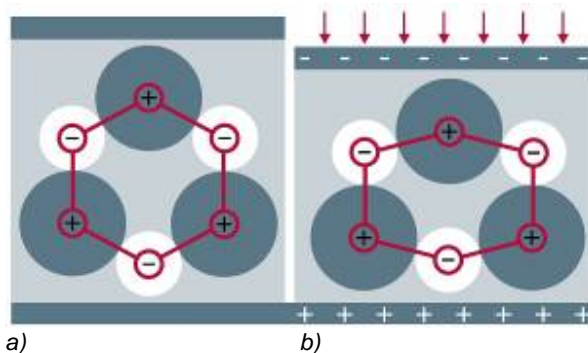


Abbildung 3. Schematische Skizze des piezoelektrischen Prinzips a) Ursprüngliche Situation b) Durch die Krafteinwirkung verursachte Ladungsverschiebung

Die Ladung wird erzeugt durch

$$Q = q_{11} \cdot F \quad (3)$$

$Q$  = Ladung,  $q_{11}$  = piezoelektrische Konstante,  $F$  = Kraft

Im Grunde genommen wandeln beide Messprinzipien die Kraft in ein elektrisches Signal um. Die Zuverlässigkeit ist ähnlich, wohingegen Kennwert und Linearität als Auswahlkriterien oft keine große Rolle mehr spielen (Abb. 4).

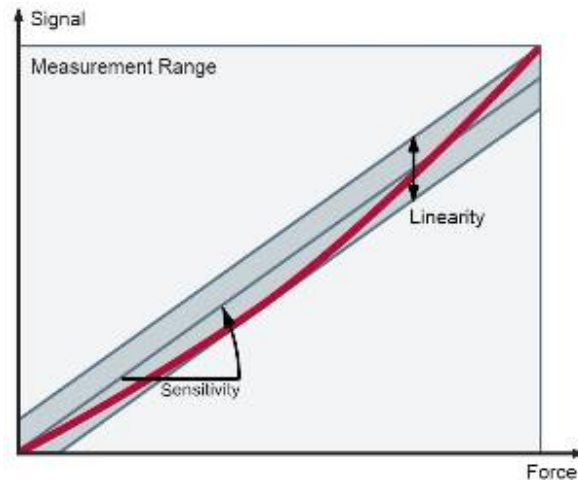


Abbildung 4. Beziehung zwischen Kraft und Signalausgang

## ULTRAHOCHDRUCKMESSUNG

Die Leistungsfähigkeit des DMS-Prinzips kann an Druckaufnehmern demonstriert werden. Anwendungen im Ultrahochdruckbereich nehmen in der Fertigung von Dieseleinspritzkomponenten zu, wo sie beispielsweise für Düsen und Kraftstoffleitungen oder sogar einfache Rohre von besonderem Interesse sind. Funktionstests können bei Betriebsdruck oder unter einem erhöhten Prüfdruck durchgeführt werden.

Anwendungen umfassen die Erhöhung der Lebensdauer von Dieselmotoren ebenso wie abrasives Wasserstrahlschneiden und Hochdruckreinigung. Hochdrucksterilisation als Konservierungsverfahren in der Nahrungsmittelindustrie gewinnt an Bedeutung, und die Verbesserung von Geräten und Anlagen erfordert ständig Aufnehmer mit höheren Nenndruckbereichen.

Abbildung 5 zeigt das Schaltbild eines Drucksensors mit einer Wheatstone-Brücke (WB) basierend auf dem DMS-Prinzip.

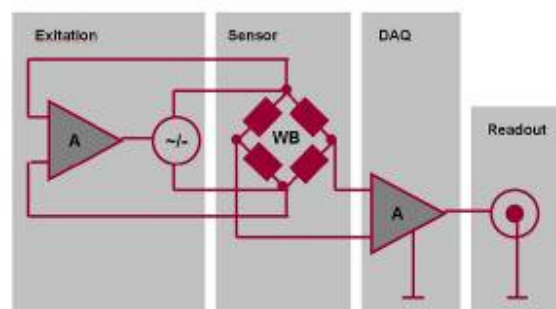


Abbildung 5. Prinzip des DMS-Verstärkers

Die DMS werden nach der Fertigstellung des Messkörpers angebracht, was den Vorteil hat, dass dies die Konstruktions- und Gestaltungsmöglichkeiten nicht einschränkt oder Arbeitsschritte in der Werkzeugmaschinentechnologie behindert. Das bedeutet, dass der Messkörper aus einem Stück gearbeitet werden kann (monolithisches Design), wodurch seine Lebensdauer deutlich höher ist als bei bislang erhältlichen Systemen [4].

Die patentierte Bauweise des Aufnehmers ganz ohne Schweißnähte führt selbst in den maximalen Druckbereichen zu hervorragende Eigenschaften [5]. Die neueste Entwicklung sind die Aufnehmer P3 „TOP Class Blue Line“ vom HBM. Die Serie Top Class bietet ein besseres Temperaturverhalten durch individuell dokumentierte Werte, eine verbesserte Genauigkeitsklasse und eine engere Kennwerttoleranz [6].

Für neue Hochdruckanwendungen ist die Rückführbarkeit mit höchstmöglicher Genauigkeit ebenfalls eine Standardanforderung an solche ultrahohen Drücke. Viele nationale Normungsinstitute überall auf der Welt verlassen sich auf diese herausragende Genauigkeit [7].

Tabelle 1 gibt die wichtigsten technischen Daten an, Abbildung 6 zeigt ein Foto eines Druckaufnehmers.

Nennbereich	5.000 bar	10.000 bar	15.000 bar
Nennkennwert	1 mV/V	1 mV/V	1 mV/V
Anfangsgenauigkeit	0,25%	0,4%	0,6%
Langzeitstabilität des Nullsignals und Spanne (Daten für den Zeitraum eines Jahres)	0,2%	0,2%	0,2%

Tabelle 1. Wesentliche technische Daten der Aufnehmer P3 „TOP Class Blue Line“



Abbildung 6. P3 Top Class Blue Line, Druckaufnehmer für Ultrahochdruck bis 15.000 bar

## SCHNELLE KRAFTMESSUNG MIT PIEZOELEKTRISCHEN MITTELN

Die Hauptvorteile der piezoelektrischen Lösung sind die sehr kompakte Form des Aufnehmers, die nahezu weglose Messung und die sehr dynamische Erfassung aller Signaländerungen.

Abbildung 7 zeigt das Schaltbild des piezoelektrischen Sensors.

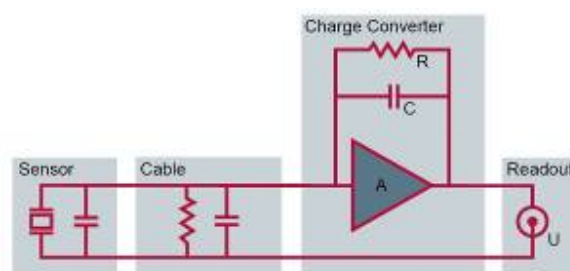


Abbildung 7. Prinzip des Ladungsverstärkers

Die piezoelektrische Kraftmesskette PACEline CMC, die aus dem piezoelektrischen Aufnehmerkern und einem galvanisch getrennten Ladungsverstärker besteht, ermöglicht eine verlustfreie Bestimmung der Bruchkraft direkt im Kraftfluss. Die Robustheit und Schnelligkeit der hier eingesetzten Piezotechnologie ist in Verbindung mit der hohen Steifigkeit der Piezosensoren in idealer Weise für industrielle Anwendungen unter harten Bedingungen geeignet.

Kraftaufnehmer und Analogverstärker werden als voreingestellte und kalibrierte Einheit geliefert. Dies ermöglicht auch die Implementierung der einzigartigen Zoom-Funktion, die insbesondere zur Überwachung überlastkritischer Prozesse mit höherer Auflösung (20 % des Nennmessbereichs) eingesetzt werden kann. Dadurch reicht dort, wo früher zwei Aufnehmer benötigt wurden, möglicherweise ein Aufnehmer aus.

PACEline bietet mehr als man bislang von piezoelektrischen Sensoren erwarten durfte. Die Kraftmesskette stellt intelligente Funktionen bereit, die die Prozessüberwachung zuverlässiger und komfortabler machen. Sie liefert die Technologie, die eine maximale Qualitätssicherung in der Produktion sicherstellt – sogar für praktisch weglose Messungen und sehr knappe Platzverhältnisse.

Abbildung 8 zeigt das Sortiment an PACEline-Aufnehmern



Abbildung 8. PACEline CMC - Piezoelektrische Kraftaufnehmer

Zu den typischen Anwendungsbereichen in der Industrie gehören Prüfstände, beispielsweise für Kraftmessungen zur Kontrolle der Materialqualität sowie die Automatisierungstechnologie, z. B. zur Qualitätsüberwachung bei Umform- und Fügeprozessen.

## SEITE AN SEITE UND ZWEI IN EINS

Das Angebot an Lösungen von HBM für Kraftmessungen basiert nach wie vor größtenteils auf Dehnungsmessstreifen. Hierfür gibt es einen einfachen Grund. Oft sind Nullpunktstabilität ebenso wie Langzeitstabilität wichtiger als Geschwindigkeit. Die meisten Kraftaufnehmer auf DMS-Basis eignen sich zum Messen von Zugkräften und Drücken. Sie messen statische und dynamische Kräfte mit höchster Genauigkeit [8].

Deshalb stellt HBM Aufnehmer bereit, die sowohl auf Folien-DMS als auch auf dem piezoelektrischen Prinzip beruhen und die in einem sehr breiten Spektrum industrieller Anwendungen eingesetzt werden können [9]. Alle Aufnehmer werden aus Edelstahl gefertigt und eignen sich für den Einsatz unter rauen Umgebungsbedingungen und strengen betrieblichen Anforderungen. Sie sind wartungsfrei und können an schwer zugänglichen Orten montiert werden. Ein bedeutendes zusätzliches Merkmal bei der piezoelektrischen Technik ist die Möglichkeit, durch die zusätzliche Genauigkeit dieselbe Leistung von zwei oder mehreren Aufnehmern mit unterschiedlichen Messbereichen in einem Aufnehmer bereitzustellen.

## **DEHNUNGSMESSUNG**

Die Dehnungsmessung ist anspruchsvoll, da es im Fertigungsprozess der Aufnehmer recht enge Toleranzen einzuhalten gilt. Die Montage kann problemlos auf vorhandenen Strukturen erfolgen. Der Druckaufnehmer SLB 700A auf DMS-Basis wird direkt mit einem Reibschluss und vier Schrauben auf einer ebenen Fläche befestigt. Diese Anordnung ermöglicht eine direkte Übertragung der Dehnung des Prüfgegenstandes auf den Dehnungsmesser, womit er ideal für Anlagen geeignet ist, in denen aus Platz- oder Montagegründen der Einsatz von Standard-Druckaufnehmern schwierig ist. Die bisherigen Anwendungen umfassen die Wägetechnik ebenso wie beispielsweise auch Windräder oder Anwendungen in Pressen, die beispielsweise in der Automobilindustrie eingesetzt werden.

## **TEDS-IDENTIFIKATION**

Ein äußerst innovatives Merkmal ist TEDS (für „Transducer Electronic Data Sheet“), das elektronische Datenblatt im Aufnehmer. HBM bietet die Aufnehmeridentifikation sowohl für Druckaufnehmer mit DMS als auch für piezoelektrische Kraftaufnehmer an. Das Prinzip ähnelt sich. Die Kenndaten eines Aufnehmers sind in Form eines elektronischen Datenblatts auf einem Chip im Innern des TEDS-Moduls gespeichert. Der Verstärker kann diese Daten einlesen und sie automatisch in die richtigen Einstellungen umsetzen. Das bedeutet, dass ohne weiteren Eingriff des Benutzers sofort mit den korrekten Einheiten gemessen werden kann. Der Benutzer profitiert von dieser „Plug and Measure“-Technologie, mit der Sie einfach „einstecken und loslegen“ können.

## **SCHLUSSBETRACHTUNG**

Der Dehnungsmessstreifen in der klassischen Form eines Folien-DMS ist hervorragend für die Messung von Kraft, Druck, Last oder Drehmoment geeignet. Wenn eine geeignete Messkörperform gewählt und ein guter Kompromiss zwischen Stabilität und Empfindlichkeit der Konstruktion gefunden werden kann, dann gibt es dafür keine bessere Lösung. Heutzutage sind Aufnehmer Umgebungsbedingungen ausgesetzt, die früher möglichst vermieden wurden, und damit steigen die an unsere Produkte gestellten Anforderungen. Dank neuer Kapselungstechnologien oder Fortschritten bei Träger und Messgitter des DMS kann der DMS mit derartigen Bedingungen problemlos fertig werden.

Oft muss ein Verstärker integriert werden. Am Anfang der Entwicklung standen Druckaufnehmer; ihre einfache Montage und Stand-Alone-Merkmale forcierten die Entwicklung von Druckgebern, so dass Druckaufnehmer mit eingebauten Verstärkern entwickelt wurden. Heutzutage verlangt der Kunde diese Lösung für nahezu alle Arten von Messgrößen. Sowohl DMS als auch das piezoelektrische Prinzip profitieren von dieser Lösung, da sie ein genau definiertes Ausgangssignal liefert.

Wenn man dies berücksichtigt, dann ist ein für den Betrieb des Piezokristalls benötigter Ladungsverstärker nicht wirklich ein zusätzlicher Aufwand. Moderne Ladungsverstärker sind leistungsfähig und ermöglichen ein ziemlich stabiles Signal über einen langen Zeitraum. Der Benutzer hat gewisse Vorteile aufgrund einer sehr kompakten Form des Aufnehmers mit nahezu wegloser Messung und selbstverständlich einem sehr guten dynamischen Verhalten.

Schließlich wird in staatlichen Instituten (wie in Deutschland die PTB) und akkreditierten Kalibrierlabors äußerste Genauigkeit für Kraft-, Last-, Drehmoment- und Druckmessungen verlangt. Dies wird auch künftig der Einsatzbereich von DMS bleiben. Dank jahrelanger vielfältiger Erfahrung erfüllen die Präzisionsaufnehmer von HBM für Kalibrierzwecke diese strengen Normen. HBM ist bereits seit 1977 das erste akkreditierte Labor des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD). Heute werden alle genannten Größen abgedeckt: Kraft, Druck, Drehmoment und Spannungsverhältnis mV/V, und das Labor von HBM ist eines der bekanntesten und leistungsfähigsten Kalibrierlabors dieser Art, das über eine Zulassung nach DIN EN ISO/IEC 17025 verfügt.

Das Produktprogramm industrieller Aufnehmer von HBM profitiert von dieser Stärke, und möglicherweise liegt die Zukunft in einer Kombination der beiden sehr unterschiedlichen Prinzipien in einem Universalaufnehmer, der gleichzeitig unbegrenzte Genauigkeit und Dynamik bietet. Dies könnte z.B. bei sicherheitsrelevanten Anwendungen attraktiv sein.

## QUELLENANGABEN

- 1 Soloman, S. „Sensors Handbook“, McGraw-Hill Education, 1996, S. 13
- 2 Window, A.L., Holister, G.S; „Strain Gauge Technology“, Applied Science Publishers, 1990, S. 18
- 3 Hoffmann K.; „An introduction to measurements using strain gauges“, Herausgeber Hottinger Baldwin Messtechnik, 1889
- 4 Schäfer A., „Opportunities for water jet cutting using modern pressure-measurement equipment“, White paper (Weißbuch), veröffentlicht 2007 auf hbm.com, ID-Nummer 793\_en
- 5 Schäfer, A., Viel, W., Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; Patent DE 10238163 „Ultra High Pressure Transducer“, Patent- und Markenamt, München, Deutschland, veröffentlicht am 26.02.2004
- 6 Schäfer, A., Viel, W. Rapp-Hickler, C., Mikulecki, K.; „A new type of transducer for accurate and dynamic pressure measurement up to 15000 bar using foil type strain gauges“ Proceedings of XVII. IMEKO World Congress, 22. – 27. Juni 2003, Dubrovnik, Kroatien
- 7 Schäfer, A.; „15000 Bar im Visier - Neuartiger Druckaufnehmer für weiten Anwendungsbereich“, Journal „Fluid“, Moderne Industrie, Landsberg, Deutschland, Ausgabe Nov./Dez. 2004, Seite 28 ff.
- 8 Gautschi, Gustav H., „Piezoelectric Sensorics Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers“, ISBN 978-3-54042259-4, Springer, Berlin, 2002
- 9 Hohmann, P.D., Schäfer, A.; „Combined Calibration of Torque and Force in a 3in 1 Calibration unit“, Proceedings of the „APMF 2000“, Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque, 2000, S. 204