

Digitale Kraftmessdosen: Der Schritt von passiven Messgrößenaufnehmern zur intelligenten Sensorik

T. Kleckers, Hottinger Bruel und Kljaer, Darmstadt (Germany)

Zusammenfassung

Kraftaufnehmer sind aus dem modernen Produktionsumfeld von großer Bedeutung. Die Signale der Sensoren dienen als Eingangsgröße für Steuerungen, der Qualitätssicherung oder der Prozessüberwachung. Der klassische Aufbau der Kraftmessketten besteht aus dem Sensor selbst, dem Kabel und einem Verstärkermodul. Mit der Miniaturisierung und der Steigerung der Performance der elektronischen Komponenten ist es möglich, alle Komponenten in einer Einheit zu verschmelzen, um den Kraftaufnehmer ohne zusätzliche Komponenten mit der Feldebene digital zu verbinden.

Keywords: Kraftaufnehmer, Digitale Sensorik, IO-Link, Kraftmessdose, Dehnungsmessstreifen.

Stand der Technik

Kraftmessungen im industriellen Umfeld werden mit Dehnungsmessstreifen (DMS) basierten Sensoren oder piezoelektrischen Kraftsensoren durchgeführt.

Sensoren, die mit DMS arbeiten bieten dabei wirtschaftliche Vorteile und zeigen keine Drift, wie es für piezoelektrische Kraftmessketten typisch ist. Deshalb findet diese Technologie eine sehr hohe Verbreitung.

In jedem Fall besteht ein DMS basierter Sensor aus einem so genannten Federkörper. Wird eine Kraft in dieses Konstruktionselement eingeleitet, so entsteht eine mechanische Spannung, als Folge können an der Oberfläche des Federkörpers Dehnungen gemessen werden. Nach dem Hookschen Gesetz sind die auftretende Dehnung linear mit den mechanischen Spannungen verknüpft, diese nun wieder mit der eingeleiteten Kraft.

Dehnungsmessstreifen wandeln eine Dehnung in einer Änderung ihres elektrischen Widerstandes. Der Proportionalitätsfaktor zwischen der Dehnung ε und der relativen Widerstandsänderung $\Delta R/R$ ist der so genannte k-Faktor. [1] Es gilt:

$$\Delta R/R = k \cdot \varepsilon \quad (1)$$

R ist dabei der Grundwiderstand des DMS, ΔR ist die absolute Widerstandsänderung.

Durch Verschaltung in einer Wheatstone'schen Brückenschaltung lassen sich die Widerstandsänderungen in eine messbare Spannung wandeln. Wird die Brücke mit einer Spannung U_b , so kann man am Ausgang eine Spannung U_A messen, die abhängig ist von der Widerstandsänderung der Messstreifen 1-4.:

$$U_A = \frac{U_b}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2)$$

In der Praxis legt man Federkörper so aus, dass Belastung des Sensors mit einer Kraft, die dem Messbereichsende entspricht, eine Dehnung von $1000 \cdot 10E-6$, anliegt, was einer relativen Widerstandsänderung von $2000 \cdot 10E-6$ entspricht, da der k-Faktor der DMS mit 2 angenommen werden kann.

Nehmen wir die Versorgungsspannung U_b mit 1 V an, so ergibt sich ein Messsignal von 2 mV bei Belastung mit der so genannten Nennkraft, also der Kraft, die dem Messbereichsende entspricht.

U_b kann größer gewählt werden, um das Ausgangssignal zu erhöhen, typisch sind 5 V, seltener auch 10 V. Höhere Spannungen überlasten die DMS elektrisch und können deshalb nicht verwendet werden. Bei 5 V stehen 10 mV zur Verfügung, wenn Nennkraft gemessen wird.

Zwei Dinge sind ersichtlich: Das Ausgangssignal ist mit etwa 10 mV klein, so dass eine Verstärkung unbedingt notwendig ist, da es praktische Forderung ist, dieses Signal in mehrere Tausend Ziffernschritte aufzulösen. Weiterhin hängt die Größe des Ausgangssignals von der Versorgungsspannung ab. Schwankungen in der Versorgungsspannung führen zu veränderten Ausgangssignalen.

Solche Schwankungen müssen durch eine hochstabile Spannungsversorgung der Messbrücke unterbunden werden. Insbesondere Schwankungen des elektrischen Widerstandes der Kabel, die Sensor und Verstärker verbinden, wirken sich nachteilig

auf die Messgenauigkeit aus, da dies letztlich zu Veränderungen der Spannung an der Messbrücke führt. Technisch wird dies gelöst, in dem man zwei zusätzliche Leitungen zur DMS-Brücke führt, die zur Messung der Spannung an der Brücke dient- somit dem Messverstärker das notwendige präzise Eingangssignal zur Steuerung der Speisespannung zur Verfügung steht.

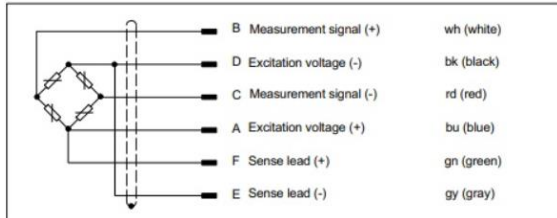


Abb. 1: Prinzip der 6 – Leiterschaltung: Zwei zusätzliche Leitungen messen die Versorgungsspannung direkt an der Messbrücke, um eine präzise Regelung zu ermöglichen

Das kleine Messsignal erfordert entsprechend geschirmte Messkabel, um den Einfluss elektromagnetischer Wechselfelder auszuschließen.

Diese Schirmung ist sowohl mit dem Gehäuse des Messverstärkers als auch mit dem Gehäuse des Sensors verbunden, so dass die gesamte Messeinrichtung einen Faraday'schen Käfig darstellt. Um Ausgleichsströme über den Kabelschirm zu verhindern, müssen beide Komponenten auf gleichem elektrischem Potential gebracht werden. Dies erfolgt über niederohmige Verbindungen zu einem gemeinsamen Potential.

Die Messverstärker verstärken das Signal, digitalisieren es und es erfolgt eine Skalierung in der gewünschten Einheit. Hierzu muss die Messkette justiert werden, d.h. das elektrische Ausgangssignal ist einer Kraft zuzuordnen. Üblich ist die Zweipunktskalierung, d.h. man gibt das elektrische Ausgangssignal und die Nennkraft ein, bei Belastung mit der Kraft Null wird das Ausgangssignal ebenfalls zu Null gesetzt.

Final wird das Signal über analoge Ausgänge (4-20 mA, 0 – 10 V) oder digitalen seriellen Schnittstellen ausgegeben. Auch die Ausgabe an gängige Feldbusse ist ebenfalls üblich.

Digitale Kraftmessdosen

Digitale Kraftmessdosen vereinigen alle Elemente der Messketten in einer Einheit. Der prinzipielle Signalpfad für einen digitalen Sensor mit einer IO -Link Schnittstelle [2] ist in Abb. 2 dargestellt

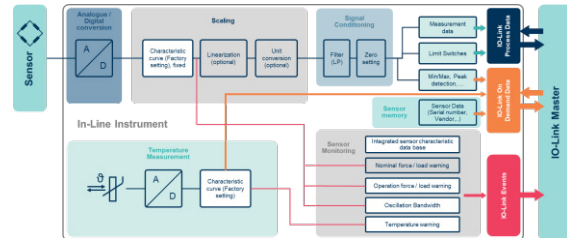


Abb. 2: Prinzip eines digitalen Kraftsensors (Signalpfad am Beispiel einer U9c mit IO -Link Schnittstelle von HBK)

Wie bei den traditionellen Messketten werden die analogen mV - Messwerte zunächst digitalisiert. Die Skalierung, also die Zuordnung der der Ziffernschritten zu einem physikalischen Wert, bei Kraftaufnehmern Newton, erfolgt während des Herstellungsprozesses. Diese Zuordnung kann durch eine Linearisierung verbessert werden, wenn ein Kalibrierschein zur Verfügung steht, jedoch bleibt die ursprüngliche Kennlinie immer erhalten. Es folgen Filter, digitale Grenzwertschalter und Signalverarbeitung (Spitzenwert, Spanne, Durchschnittskraft) dann erfolgt die Ausgabe an eine digitale Schnittstelle, in diesem Beispiel an die serielle IO – Link Schnittstelle. Für das Konzept von digitalen Sensoren ist die Schnittstelle letztlich ohne von untergeordneter Bedeutung.

Kabeleinflüsse bei digitalen Sensoren

Da der Messverstärker fest mit dem Sensor verbunden ist, lassen sich zum einen Kabeleffekte- z.B. durch den Widerstand der stromführenden Leitungen'- beim Abgleich des Sensors berücksichtigen. Beide Elemente bilden eine Einheit, deshalb sind die Verbindungskabel zwischen Messbrücke und Verstärkereinheit sehr kurz und in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Damit besteht ein gemeinsamer Faraday'scher Käfig, und die kurzen Leitungslängen bürgen für sehr kleine Kabeleffekte.

Der Signalausgang ist digital und damit robust, so dass keine speziellen Messkabel erforderlich sind. Bei geschickter Wahl der Schnittstelle ist nur ein Kabel für den Signalausgang und die Spannungsversorgung notwendig, im Falle der IO – Link Schnittstelle

ist dieses Kabel ungeschirmt. Es ergibt sich ein wesentlicher mechanischer Vorteil: Das wesentlich weichere Kabel übt einen geringeren mechanischen Einfluss auf den Sensor aus, z.B. in Form von kleineren Biegemomenten.

Justage digitaler Sensoren

Jeder Kraftaufnehmer durchläuft bei seiner Produktion einen Kalibrierprozess, bei dem das Ausgangssignal in Abhängigkeit von der eingeleiteten Kraft festgestellt wird. Mitgelieferte Prüfprotokolle oder Kalibrierscheine dokumentieren diesen Zusammenhang und dienen als Grundlage der Messverstärkerjustage am Einsatzort. Auch die Speicherung der Kenndaten mittels eines Chips im passiven Sensor ist ein verfügbares Verfahren. [2]

Die feste Verbindung zwischen Verstärker und Sensoren der digitalen Kraftaufnehmer erlaubt es, die Empfindlichkeit des Kraftaufnehmers im Speicher der des Verstärkermoduls fest zu hinterlegen, so dass es nicht notwendig ist, den Verstärker einzustellen, bevor man mit der Messung beginnen kann. Weiterhin ist es vorteilhaft, dass weitere Sensordaten hinterlegt werden können, z.B. Grenzlasten, dynamische Grenzen oder Temperatureigenschaften oder Serialnummern. Digitale Kraftmessdosen geben richtige Messwerte in Newton im Rahmen ihrer Messunsicherheit aus, wenn sie in Betrieb genommen werden.

Zustandsüberwachung

Die Abtastung der Messwerte von der Brückenschaltung erfolgt sehr schnell, mit 40 000 Messwerten pro Sekunde. Ein zweiter, vom eigentlichen Pfad der Messwerte unabhängiger Signalpfad (In Abb. 2 durch rote Linien gekennzeichnet) vergleicht die Kraftmesswerte ständig mit den mechanischen Grenzen, die ebenfalls im Sensor gespeichert sind. Überschreitet der Kraftverlauf die mechanischen Grenzen des Messgrößenaufnehmers, so wird eine Meldung erzeugt, die den Bediener warnt. Neben den Grenzen für die maximale Gebrauchskraft ist die Überwachung der Spitze – Spitze – Kraftwerte besonders interessant. Je nach Spitze – Spitze der Amplitude wird eine Kennzahl gespeichert, die auf Grund der Wöhlerlinie des Federkörperwerkstoffes ermittelt wurde. Diese Kennzahlen werden im Speicher des Gerätes addiert. Somit lässt sich eine Vorhersage des dynamischen Versagens

erstellen, die letztendlich in einer stufenweisen Warnung des Nutzer mündet: Der Sensor kann getauscht werden, bevor ein Versagen des Messgrößenaufnehmers eintritt. Wichtig ist hierbei die hohe Abtastrate von 40 kHz, da so auch sehr schnelle Kraftstöße in die Bewertung aufgenommen werden.

Identische Überwachungen für die Temperaturen sind ebenfalls integriert. Die Sensoren verfügen über eine Temperaturmessung, die Voraussetzung hierfür ist.

Linearisierung

Kraftaufnehmer werden in der Regel nach internationalen Standards kalibriert. Wesentlich sind hier die ISO376 und die DKD R3-3. Die Ergebnisse dieser Kalibrierungen können im Speicher des digitalen Sensors abgelegt werden und zur Verbesserung der Linearität genutzt werden. Bei Kraftaufnehmern, die für Zug- und Druckkräfte geeignet sind, lassen sich zwei Kalibrierungen hinterlegen. Die Verbesserung ist in Abbildung 3 am Beispiel einer Kraftmessdose U2b/5kN von HBK dokumentiert.

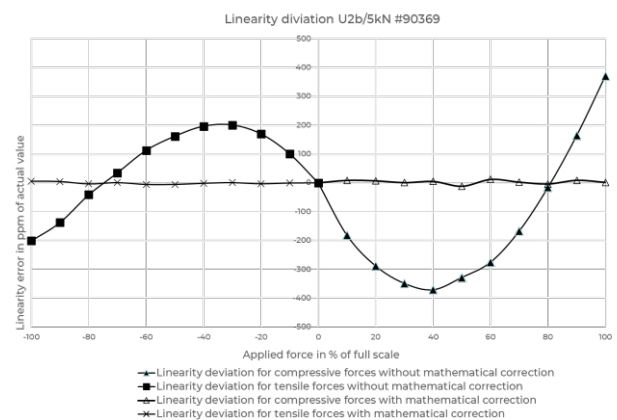


Abb. 3: Wirkung der Linearisierung eines digitalen Kraftsensors am Beispiel des Kraftaufnehmers U2b mit Nennkraft 5 kN

Auswertungen und Berechnungen

Bekanntes Standardmathematik, wie z.B. digitale Filter, Spitzenwertanalyse oder Grenzwertschalter lassen sich in gleicher Weise implementieren, wie es bei externen Brückenverstärkern heute bereits geschieht. Insbesondere die Erfassung der Spitzenwerte erfordert eine hohe interne Abtastrate. Die Datenrate am Ausgang ist für die Präzision des

Spitzenwertes nicht von Bedeutung, wichtig ist hier die interne Abtastrate.

Zukunftsaussichten

Es konnte gezeigt werden, dass digitale Sensoren von der festen Verbindung des Verstärkermoduls mit der Sensoreinheit stark profitieren. Durch den Wegfall von Kabeleffekten, durch die Möglichkeit den Zug- und den Druckkraftbereich getrennt zu linearisieren, ergibt sich eine höhere Messgenauigkeit.

Da alle metrologischen Eigenschaften fest eingegeben sind entfällt der manuelle Justageprozess. Dies und die im Vergleich mit Messkabeln deutlich günstigeren elektrischen Verbindungen zur Übertragung der digitalen Messergebnisse führt zu deutlichen Kostensenkungen. Ebenfalls kann der Platz für den Messverstärker im Schaltschrank eingespart werden.

Gleichzeitig werden weitere technische Eigenschaften in den Sensor geschrieben, so dass eine Zustandsüberwachung hinsichtlich thermischer oder mechanischer Grenzwerte möglich ist, was der Betriebssicherheit zugutekommt.

Da die interne Messrate sehr hoch gewählt werden kann und unabhängig vom der Messrate am Ausgang des Sensors ist, ergibt sich die Möglichkeit, die Messdaten im Sensor vorzuverarbeiten und statt Messdaten Ergebnisse an die nächste Stufe der Signalkette weiterzugeben. Dies kommt dem Trend der Datensparsamkeit sehr entgegen, und entlastet auch die Feldbussysteme erheblich.

Heute wird nur die Temperatur als weitere Messgröße erfasst, aber natürlich lassen sich weitere physikalisch Größen aufnehmen- die Beschleunigungsmessung im Kraftsensor würde eine Kompensation von dynamischen Massenkräften wie sie zum Beispiel bei Schwingversuchen auftreten im Sensor zulassen.

Literaturnachweis

- [1] Karl Hoffmann, "An introduction to Measurement using strain gauges", Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
- [2] Thomas Kleckers, Kostenersparnis, kurze Rüstzeiten und Sicherheit in der Anwendung durch Nutzung des elektronischen Datenblattes „TEDS“ <https://www.hbm.com/de/6258/artikel-teds-fuer-kostenersparnis-kurze-ruestzeiten-und-sicherheit-in-der-anwendung/>