Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 7

Artikel: Digitales Kompensationsverfahren zur Verbesserung von Messfühlern

Autor: Erb, K. / Fischer, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903662

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Digitales Kompensationsverfahren zur Verbesserung von Messfühlern

K. Erb, P. Fischer

Konventionelle analoge Kompensationsverfahren nützen oft die inhärente Genauigkeit von Messfühlern nur in beschränktem Masse aus. Ausgehend von einer exakten Modellierung des Verhaltens von Sensoren werden schaltungstechnische und signalverarbeitende Massnahmen beschrieben, mit denen Messfehler bis an die Grenzen der Wiederholgenauigkeit (Reproduzierbarkeit) der Messfühler reduziert werden können.

Les procédés de compensation conventionnels analogiques n'utilisent souvent la précision inhérente des capteurs que dans une mesure restreinte. Les techniques de circuit et de traitement de signal décrites, avec lesquels l'erreur de mesure peut être réduite jusqu'à la limite de reproductibilité des capteurs, sont basées sur une modèlisation exacte du comportement de ces derniers.

Adresse der Autoren
Dr. *Karl Erb*, dipl. El.-Ing. ETH, *Philippe Fischer*, ing. dipl. microtech. EPFL, Mettler Instrumente AG, Industrielle Messtechnik, 8606 Greifensee.

Die Realisierbarkeit von genauen Messwertgebern für physikalische oder chemische Parameter wirft stets die Frage auf, ob Wandlerprinzipien verfügbar sind, welche die gesuchte Messgrösse in möglichst idealer Form in ein verarbeitbares – vorzugsweise elektrisches – Signal umformen. Bei der Wahl des Messverfahrens sowie der Realisierung des Wandlers sind immer technologische, herstellungstechnische und preisliche Randbedingungen einzuhalten, welche der Genauigkeit der Wiedergabe des gesuchten Parameters Grenzen setzen. Die Fehlereinflüsse lassen sich in drei Kategorien einteilen:

1. zufallsbedingte Prozesse (Rauschen),
2. zeitliche Änderung von Systemparametern (Drift, Alterung),
3. Einflüsse von parasitären Parametern (Temperatur, Feuchtigkeit usw.).

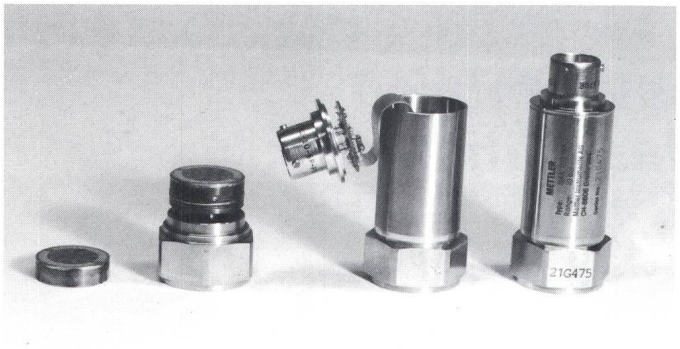
Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Beschreibung von Massnahmen zur Kompensation der Störeinflüsse von parasitären Parametern. Solche Fehler lassen sich durch elektronische und signalverarbeitende Mittel gezielt eliminieren. Fehler, die durch Rauschen, Drift oder Alterung verursacht werden, können nur mit Kompromissen reduziert werden (Bandbreitebeschränkung, Nachkalibration); zudem sind sie in vielen Fällen weniger dominant.

Am Beispiel eines Dünnfilm-Drucksensors werden Schaltungs- und Softwaremassnahmen beschrieben, die es ermöglichen, die Genauigkeit der Druckmessung unter dem Einfluss eines dominanten parasitären Parameters – der Umgebungs- oder der Medientemperatur – gegenüber klassischen analogen Kompensationsverfahren um mehr als eine Grössenordnung zu verbessern. Die Methode ist möglichst allgemein gehalten und lässt sich auf andere Messparameter und -prinzipen übertragen. Sie berücksichtigt zudem Nichtlinearitäten des Ausgangssignals, welche vom zu messenden und vom parasitären Parameter abhängen können.

Im folgenden Abschnitt wird vorerst kurz auf das klassische, analoge Kompensationsverfahren eingegangen, um dessen inhärente Grenzen aufzuzeigen und die Bedeutung eines verfeinerten Verfahrens hervorzuheben.

Analoges Kompensationsverfahren

Der Messwertaufnehmer, der im folgenden betrachtet wird, ist ein Drucksensor bestehend aus einer elastischen Metallmembran mit einer Widerstandsbrücke in Dünnschichttechnologie. Vier identische Widerstände aus einer Legierung mit kleinem Widerstands-Temperaturkoeffizienten sind so auf der Membran angeordnet, dass sie bei einer druckbedingten Membranverformung paarweise gedehnt bzw. gestaucht werden. Dadurch wird die Messbrücke verstimmt. Zusätzlich sind weitere Dünnfilmwiderstände mit ausgeprägtem Temperaturkoeffizienten auf dem Sensor angebracht. Durch Zuschalten eines abgestimmten Widerstandes mit positivem Temperaturkoeffizienten in die Speisespannungszuleitung zur Brücke wird die effektiv wirksame Brückenspannung bei höheren Temperaturen reduziert, womit das temperaturabhängige Elastizitätsmodul der Metallmembran (d.h. die zunehmende Weichheit bei höheren Temperaturen) ausgeglichen werden kann (Temperaturkompensation der Empfindlichkeit). Infolge fertigungsbedingter Parameterstreuungen kann der Gleichlauf der vier Brückenwiderstände nicht über grössere Temperaturbereiche eingehalten werden. Dieser Umstand verursacht eine temperaturab-



Figur 1 Dünnfilm-Drucksensor in verschiedenen Fertigungsstadien
Links aussen: Druckmembran mit Dünnfilm-Messbrücke

hängige Änderung des Ausgangssignals bei gleichbleibendem Druck. Durch gezieltes Einfügen eines abgeglichenen, temperaturabhängigen Widerstandes in einen Brückenzweig kann dieser Effekt vermindert werden (Temperaturkompensation des Nullpunktes). Die Figur 1 zeigt einen serienmässig hergestellten Drucksensor in verschiedenen Fertigungsstadien. Im vorletzten Stadium sind die Widerstände sichtbar, mit denen die temperaturabhängigen Dünnschichtwiderstände auf der Druckmembran abgeglichen werden.

Das beschriebene Verfahren zur Kompensation der Temperatureinflüsse beruht grundsätzlich auf der Addition von Temperatureffekten mit positivem und negativem Vorzeichen. Durch sorgfältige Gewichtung der Anteile gelingt es, den Summeneffekt über einen gewissen Temperaturbereich klein zu halten. Die Grenzen dieser Methode sind durch den Umstand bedingt, dass die Temperatureffekte nicht exakt linear verlaufen, wodurch der Abgleich stets auf einen Kompromiss hinausläuft, nämlich den maximalen Fehler über einen gewünschten Temperaturbereich minimal zu halten. Der verbleibende Fehler liegt bei einem kompensierten Temperaturbereich von 100 °C in der Grössenordnung von 1 bis 3% des Vollbereichswertes. Für die meisten Anwendungsfälle, bei denen solche Genauigkeiten ausreichend sind, bietet die analoge Kompensationsmethode eine bezüglich Aufwand kaum zu unterbietende Lösung.

Digitales Kompensationsverfahren

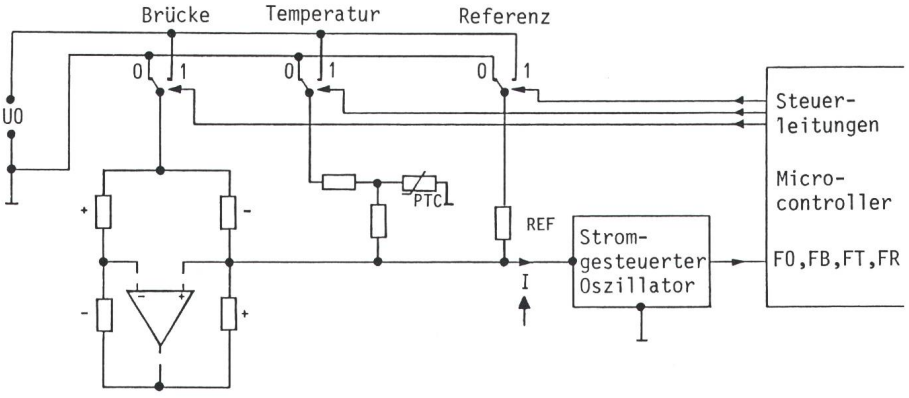
Die Tatsache, dass Messwertgeber vermehrt direkt an digitale Verarbeitungselemente angeschlossen werden, legt nahe, auch die Kompensationsfunktionen in den Bereich der digitalen, softwareunterstützten Signalverarbeitung zu verlegen. Konsequenterweise versucht man dabei, analoge Schaltungskomponenten auf ein Minimum zu beschränken und auf kürzestem Weg zu einer prozessorkompatiblen Schnittstelle zu gelangen. Die digitale Kompensation verlangt natürlich, dass dabei auch die parasitären Parameter separat erfasst werden können.

Konverter zur Digitalisierung von Messwertgeberausgängen

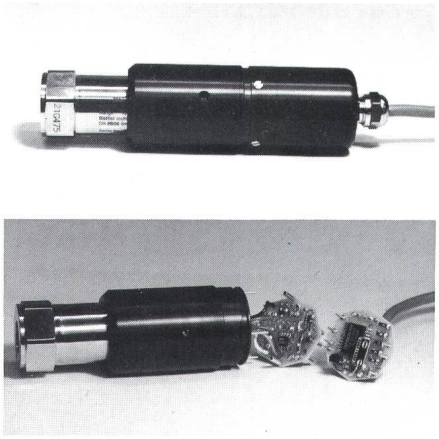
Als Beispiel eines Konverters für den erwähnten Dünnfilm-Drucksensor ist in Figur 2 eine Schaltung gezeigt, die gestattet, das Drucksignal (Brückenverstimmung) sowie die Temperatur der Druckmembran auf relativ einfache Weise mit einem Prozessor oder Mikrocontroller im Zeitmultiplexverfahren zu erfassen. Durch zeitlich gestaffeltes Aktivieren der elektronischen Umschalter (über die Steuerleitungen) kann die Verstimmung der Messbrücke sowie die Veränderung eines temperaturabhängigen Widerstandes in einen Strom I und über den stromgesteuerten Oszillator in eine signalabhängige Frequenz umgewandelt werden. Ein zusätzlich schaltbarer Pfad, bestehend aus einem temperaturstabilen Referenzwiderstand R_{ref} gestattet eine automatische Kalibration des stromgesteuerten Oszillators. Die Umwandlung der gesuchten Messgrössen in eine signalproportionale Frequenz hat verschiedene Vorteile:

1. Ein frequenzmoduliertes Signal lässt sich weitgehend störungsfrei übertragen.
2. Stromgesteuerte Oszillatoren mit guten Linearitätseigenschaften lassen sich mit geringem Schaltungsaufwand realisieren [1].
3. Frequenzen können ohne zusätzlichen Schaltungsaufwand von einem Prozessor oder Mikrocontroller mit hoher Auflösung erfasst werden.

Die Figur 3 zeigt die kompakte Realisierung einer solchen Konverterschaltung. Um die analogen Signalverbindungen kurz zu halten, wird sie direkt auf den Messwertgeber aufgesteckt. Die Verbindung zum Prozessor benötigt nebst der Speiseleitung nur digitale Signalleitungen. Über die digitalen Steuerleitungen werden programmgesteuert in zeitlicher Folge vier Frequenzen erfasst (Tab. I). Durch Bil-



Figur 2 Vereinfachte Schaltung der Konverter-Elektronik zur Digitalisierung eines Messbrücken- und Temperatursignals



Figur 3 Aufsteckbare Version des Drucksensor-Konverters

Messbrücke	Temperatur-widerstand	Referenz	Frequenz	Bezeichnung
0	0	0	FO	Nullsignal
1	0	0	FB	Brückensignal
0	1	0	FT	Temperatursignal
0	0	1	FR	Referenzsignal

Tabelle I Programmgesteuerte Signalerfassung

dung der Quotienten aus den Differenzen zum Nullsignal

$$BU = \frac{FB-F0}{FR-F0} \quad (1)$$

$$TU = \frac{FT-F0}{FR-F0} \quad (2)$$

erhält man normierte Zahlwerte für das (unkompensierte) Brückensignal *BU*, sowie für das (unkompensierte) Temperatursignal *TU*. Ein Abgleich der Schaltung ist nicht notwendig.

Die Software misst Frequenzen durch Zählen der Anzahl Perioden *n* der zu messenden Frequenz F_x bei gleichzeitiger Zählung der Anzahl Perioden *m* einer internen Bezugsfrequenz F_q (z.B. Prozessortakt) während eines vorgegebenen Zeitintervalles. Daraus kann

$$F_x = F_q \frac{n}{m \pm 1} \quad (3)$$

berechnet werden. Wird beispielsweise bei einer Bezugsfrequenz $F_q = 1$ MHz ein Messintervall von 100 ms gewählt, so beträgt der systematische relative Fehler $\pm 10^{-5}$, was etwa den Eigenschaften eines 16-Bit-D/A-Wandlers entspricht. Die Vorteile des einfachen Prinzips werden allerdings durch wesentlich längere Messzeiten erkauft.

Numerische Erfassung der wechselseitigen Parameterabhängigkeiten

Die eigentliche Kompensation des Temperatureinflusses auf das numerisch erfasste Drucksignal – die unkompensierte Brückenverstimmung *BU* (Gleichung 1) – kann nun numerisch mit Hilfe eines programmierten Algorithmus erfolgen. Im allgemeinsten Fall wird ebenfalls davon ausgegangen, dass das unkompensierte Temperatursignal *TU* (Gleichung 2) seinerseits vom Drucksignal abhängig ist. Mathematisch ausgedrückt, transformiert der Messwertgeber einschliesslich Konverter den effektiv angelegten Druck P_{eff}, sowie die Membrantemperatur T_{eff} in die Grössen

$$BU = f_{B1}(P_{eff}, T_{eff})$$
$$TU = f_{T1}(T_{eff}, P_{eff}) \quad (4)$$

Die Aufgabe des Kompensationsalgorithmus besteht darin, die Rückwärtstransformation zu finden, welche aus den unkompensierten Werten *BU* und *TU* die ursprünglichen Parameter P_{eff} und T_{eff} möglichst exakt approximiert:

$$P_{approx.} = f_{B2}(BU, TU)$$
$$T_{approx.} = f_{T2}(TU, BU) \quad (5)$$

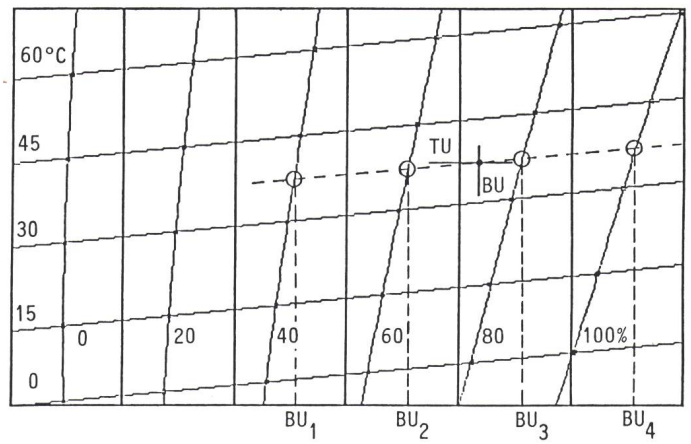
Die Figur 4 zeigt diese zweidimensionale Transformation in graphischer Form. Die *x*-Koordinate entspricht dem numerisch erfassten Wert der unkompensierten Brückenverstimmung *BU*, die y-Koordinate dem unkompensierten Temperaturwert *TU*. Die gezeichneten Kurvenscharen sind durch Regression bestimmte Funktionsverläufe von Messdaten und entsprechen den Kurven konstanten Druckes (0, 20, 40, ... 100% Nenndruck), bzw. den Kurven konstanter Temperatur (0, 15, 30, ... 60 °C). Die zunehmende Neigung der Kurven konstanten Druckes zeigt deutlich die Abnahme des Elastizitätsmoduls der Druckmembran bei höheren Temperaturen. Der Anstieg der Kurven konstanter Temperatur bedeutet, dass der numerisch erfasste Temperaturwert *TU* merklich vom Druck abhängt.

Die Erfassung dieser Kurvenscharen geschieht durch schrittweises Erhöhen der Temperatur (0, 15, 30, ... 60 °C) und mehrmaligem Durchfahren von Referenzdrücken (0, 20, 40 ... 100% Nenndruck). Diese Kalibrierungsprozedur erfolgt mit einer programmgesteuerten Messanordnung, bestehend aus einem steuerbaren Temperaturschrank und einem automatischen Gasdruckregler, basierend auf einer präzisen, elektronischen Druckwaage.

Bestimmung der Kalibrationswerte

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, wie der Messwertaufnehmer zusammen mit der Konverterschaltung durch Kurven graphisch modelliert werden kann. Die Anzahl aufzunehmender Kurven richtet sich nach dem Grad der Nichtlinearität des Verlaufs

$$BU = f_P(P_{eff})$$
bei T_{eff} = const. (6)



Figur 4 Darstellung der wechselseitigen Parameterabhängigkeiten

BU Unkompensiertes Brückensignal TU Unkompensiertes Temperatursignal

x-Achse BU = (FB–FO) / (FR–FO) y-Achse TU = (FT–FO) / (FR–FO)

Kurven konstanten Drucks 0, 20, 40, ... 100% Nenndruck

Kurven konstanter Temperatur 0, 15, 30, ... 60 °C

Um die Abhängigkeiten besser hervorzuheben, ist die Darstellung in x-Richtung stückweise komprimiert, d.h. die 6 vertikalen Bereiche müssten für eine unverzerrte Darstellung auseinandergerückt werden.

Je nichtlinearer diese Funktion verläuft, desto dichter muss die Schar der Kurven konstanten Druckes sein. Im Beispiel der Figur 4 sind 6 Referenzdrücke gewählt worden (0, 20, 40, ... 100% Nenndruck).

Die Approximation der Kurven konstanten Drucks

$$BU = f_B(TU) \quad \text{bei } P_{eff} = P_{1,2,3,\ldots} \tag{7}$$

muss im Hinblick auf die angestrebte Genauigkeit möglichst exakt erfolgen. Jede dieser Kurven wird individuell durch ein kubisches Polynom angenähert, um die deutlich sichtbaren Nichtlinearitäten zu erfassen. Dies bedingt, dass bei mindestens 4 Temperaturen gemessen werden muss. Im Beispiel der Figur 4 sind 5 Temperaturen gewählt worden (0, 15, 30, ... 60 °C). Da die Abweichungen nicht statistischer, sondern deterministischer Natur sind, wird die Regression der Messwerte auf ein Polynom dritten Grades iterativ durchgeführt, mit dem Ziel, einen minimalen absoluten Fehler zu erreichen (anstelle eines minimalen quadratischen Fehlers).

Für die Approximation der Kurven konstanter Temperatur

$$TU = f_T(BU) \quad \text{bei } T_{eff} = T_{1,2,3,\ldots} \tag{8}$$

genügt eine lineare Regression (Gerade), da keine ausgeprägten Nichtlinearitäten zu beobachten sind und ausserdem die Fehlereinflüsse der Temperaturmessung (parasitärer Parameter) von untergeordneter Bedeutung sind (ein einprozentiger Temperaturfehler würde beim Beispiel im schlechtesten Fall einen relativen Fehler der Druckmessung von etwa 3×10^{-4} erzeugen). Die Wahl von äquidistanten Druck- und Temperaturwerten für die Kalibration ist keine notwendige Bedingung, sie vereinfacht lediglich den numerischen Kompensationsalgorithmus.

Die numerische Erfassung der kubischen Polynome (Kurven konstanten Drucks) erfolgt durch je 4 Stützwerte. Zusammen mit Nullpunkt und Steilheit der linear approximierten Kurven konstanter Temperatur ergeben sich im Beispiel $(6 \times 4) + (5 \times 2) = 34$ Kalibrationswerte, welche die Grundlage für den Kompensationsalgorithmus bilden.

Im Vergleich zur klassischen analogen Kompensation mit 4 Kalibrationswerten (Nullpunkt, Steilheit, Temperaturkoeffizient von Nullpunkt und Steilheit) zeigt sich hier die wesentlich höhere Komplexität des digitalen Kompensationsverfahrens.

Kompensationsalgorithmus

Der messtechnische und rechnerische Aufwand zur Erfassung der Sensoreigenschaften, d.h. der wechselseitigen Parametereinflüsse, sowie der Nichtlinearitäten in Form von Kalibrierungswerten spielt eine untergeordnete Rolle, da er einmalig durchgeführt wird und gleichzeitig eine ohnehin notwendige Qualitätskontrolle darstellt. Im Gegensatz dazu muss der Kompensationsalgorithmus bezüglich Programmaufwand und Zeitbedarf sorgfältig optimiert werden, im Hinblick auf dessen Implementation in einfache Mikrocontroller.

Der Algorithmus basiert auf der kubischen Approximation der Kurven konstanten Drucks (7), der linearen Approximation der Kurven konstanter Temperatur (8) sowie auf einer stückweise kubischen Approximation der Hauptcharakteristik (6) bei konstanter Temperatur. Letzteres Verfahren wird häufig angewandt, um Kurvenverläufe numerisch zu erfassen, für die eine geschlossene, analytische Beschreibung nicht möglich ist [2]. Das Verfahren gliedert sich in folgende Schritte:

1. Erfassung des Wertepaars *BU, TU* gemäss Formeln (1) und (2).
2. Ermittlung der Kurve konstanter Temperatur (Gerade) durch den Messpunkt *BU, TU* mittels linearer Interpolation zwischen den nächstliegenden Kurven (in Fig. 4 gestrichelt angedeutet).
3. Approximative Bestimmung der Werte $TU_{1,2,3,4}$ bei den Schnittpunkten mit den 4 nächstliegenden Kurven konstanten Drucks (durch Kreise angedeutet).
4. Exakte Berechnung der Werte $BU_{1,2,3,4}$ an den Schnittpunkten unter Verwendung der vorhin bestimmten *TU*-Werte durch kubische Interpolation zwischen den Stützwerten der Kurven konstanten Drucks (viermalige Operation). Daraus resultieren 4 Stützwerte der Hauptcharakteristik (6) bei der aktuellen Messtemperatur ($BU_{1,2,3,4}$ sowie Referenzdruckwerte der verwendeten Kurven konstanten Drucks).
5. Aufgrund dieser Stützwerte kann wiederum durch kubische Interpolation der dem gemessenen *BU*-Wert entsprechende Druckwert ermittelt werden.

Der rechnerische Aufwand für die Kompensation eines Messwertes umfasst nebst der Lösung von linearen Gleichungen 5 kubische Interpolationen (Lagrange-Interpolationsformel [3]). Bei geschickter zeitlicher Staffelung der Frequenzmessung und paralleler numerischer Auswertung können mit einem handelsüblichen Mikrocontroller etwa 5 Messwerte pro Sekunde errechnet und ausgegeben werden.

Die zur Kalibration verwendete programmgesteuerte Messanordnung dient ebenfalls zur Genauigkeitskontrolle des digitalkompensierten Drucksensors. Im Beispiel der Figur 4 wird eine maximale Abweichung von 327 ppm bezüglich des Nenndrucks gemessen.

Schlussfolgerungen

Mit der beschriebenen Methode zur digitalen, softwareunterstützten Elimination von Störeinflüssen sowie zur Linearisierung der Kennlinien kann die Genauigkeit von Messwertaufnehmern wesentlich verbessert werden. Im Falle der untersuchten Drucksensoren kann der Gesamtfehler, verglichen mit analogen Kompensationsverfahren, um den Faktor 10 bis 50 reduziert werden. Die Restfehler liegen in der Grössenordnung der bekannten Wiederholgenauigkeit (Reproduzierbarkeit) der Sensorelemente. Eine weitere Verfeinerung der Kompensationsmethode wäre somit nicht sinnvoll.

Der zusätzliche Aufwand für das Verfahren liegt vor allem im Bereich der digitalen Verarbeitung. Die Kapazität eines Mikrocontrollers wird bei einer Messrate von etwa 5 Werten pro Sekunde durch die Datenaufbereitung ausgeschöpft. Schnelle Änderungen des Messsignals können demzufolge nicht erfasst werden, es sei denn, dass durch reine Softwaremassnahmen die Geschwindigkeit auf Kosten der Auflösung erhöht wird.

Literatur

[1] Linear application databook. AN-240. Santa Clara/California, National Semiconductor Corporation, 1986.

[2] *J.H. Ahlberg, E.N. Nilson* and *J.L. Walsh:* The theory of splines and their applications. - Mathematics in science and engineering, volume 38 - New York/London, Academic Press, 1967.

[3] *E. Stiefel:* Einführung in die numerische Mathematik. 3. Auflage. Stuttgart, B.G. Teubner Verlag, 1965.