

MESSTWERTAUFNEMER AUF DMS-BASIS UND IHR TEMPERATURVERHALTEN

Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Kaufmann -

1. Einführung

Messwertaufnehmer auf Dehnungsmessstreifen-(DMS)-Basis sind Messglieder, die mechanische Signale mittels DMS in elektrische Signale umsetzen. Messgrößen, wie Kraft, Druck, Weg Beschleunigung etc., wirken auf dabei auf einen speziell geformten Federkörper aus Stahl, Aluminium oder Kupfer-Beryllium, um die gebräuchlichsten Werkstoffe zu nennen und bewirken eine belastungsproportionale Dehnung, die über die bekannten Zusammenhänge ein vom DMS abgegebenes elektrisches Signal ergibt.

Im allgemeinen werden die DMS in Wheatstone'schen Brückenschaltungen betrieben, die mit konstanter Spannung versorgt werden. Das Ausgangssignal hat die Dimension Millivolt pro Volt (Einheitenzeichen: mV/V) mit der Bedeutung Millivolt Ausgangssignal pro Volt Brückenspeisespannung. Um derartige Messwertaufnehmer wiederholt einsetzbar zu machen, also hinsichtlich ihrer Eigenschaften reproduzierbar, dürfen die Federkörper *nur im elastischen Bereich* der jeweils angewandten Werkstoffe eingesetzt werden, auch unter Berücksichtigung der definierten Überlastsicherheit.

Gefordert wird, dass solche Messwertaufnehmer innerhalb definierter Toleranzen *nur auf die zu messende Größe* - Kraft, Druck etc. - reagieren und andere Parameter nicht oder nur unwesentlich zum Messsignal beitragen. Besonders die Umgebungstemperatur und deren Änderungen können zu erheblichen negativen Einflüssen führen, wenn keine besonderen Massnahmen zu ihrer Unterdrückung getroffen werden.

Einflüsse	Prüfarten
Nullpunktdrift durch Temperaturänderung	Prüfen ohne mechanische Belastung
Brücken-Widerstandsabgleich	Prüfen ohne mechanische Belastung
Messbereichsvariation durch Temperaturänderung	Prüfen unter mechanischer Belastung
Fertigungsbedingte Messbereichsschwankungen	Prüfen unter mechanischer Belastung

Tabelle 1: Gravierendste negative Einflüsse auf DMS-Anordnungen und zugehörige Prüfarten.

Es gibt *zahlreiche negative Einflüsse*, die auf Messwertaufnehmer derart einwirken, dass sie von ihrem Idealverhalten mehr oder weniger abweichen. Die vier gravierendsten negativen Einflüsse auf DMS-Anordnungen sind mit Hinweisen auf ihre zugehörigen Prüfarten in Tabelle 1 zusammengestellt; sie werden im folgenden diskutiert, wobei auch Massnahmen zu ihrer Ausschaltung aufgezeigt sind.

2. Nullpunktdrift durch Temperaturänderung

DMS reagieren auf die *Umgebungstemperatur und deren Änderungen*. So werden Widerstandsänderungen hervorgerufen aufgrund von Temperaturänderungen durch das Zusammenspiel der Widerstands-Temperaturkoeffizienten der DMS-Gitterlegierung sowie der Differenz zwischen Temperaturausdehnungskoeffizienten der DMS und des Federkörperwerkstoffs. Die daraus resultierende *Drift* wird in einer vollaktiven Halb- oder Vollbrückenschaltung (Wheatstone'sche Brückenschaltung) theoretisch zwar kompensiert, doch setzt dies voraus, dass die entsprechenden Brückenarme *exakt widerstandsgleich* sind, d.h. die Brückenschaltung tatsächlich abgeglichen - im Gleichgewicht - ist.

Dieses ist in der Praxis allerdings nicht der Fall, denn allein die Herstellung völlig *widerstandsgleicher DMS* ist, wenn überhaupt möglich, so doch *weitgehendst unwirtschaftlich*. Im vorliegenden Zusammenhang ist besonders unterschiedliche Reaktion der einzelnen DMS auf Temperatureinflüsse hervorzuheben. Auch können Prozeduren der DMS-Installationen einen wesentlichen Einfluss ausüben, und ebenso spielen die Oberflächengeometrien der Federkörper im Bereich der DMS-Installationen eine nicht unbedeutende Rolle.

Wird der Abgleichzustand einer Brückenschaltung durch Temperaturänderungen beeinflusst, kann dies durch Widerstände kompensiert werden, die in bestimmte Brückenarme einzufügen sind. Von diesen Widerständen wird gefordert, dass sie einen *ausgeprägten Temperaturkoeffizienten* aufweisen, d.h. ihr Widerstandswert auf Temperaturänderungen empfindlich reagiert. Schon Kupferwiderstände in verschiedenen Formen erfüllen diese Forderung.

Handelt es sich beispielsweise um die Herstellung einzelner Messwertaufnehmer, also nicht um Serienfertigung, werden Kupferdrähte geringen Querschnitts unter Berücksichtigung sowohl technischer als auch wirtschaftlicher Aspekte häufig eingesetzt. Abbildung 1 zeigt, wie die Kupferdrähte als zusätzlicher Widerstand in die Brückenschaltung eingefügt werden. Im allgemeinen ist es nicht schwierig, Nullpunktverschiebungen aufgrund von Temperaturdifferenzen auf Werte um etwa 5×10^{-6} entsprechend $2,5 \mu\text{V/V}$ je 50 K zu reduzieren. Abbildung 2 zeigt den typischen Verlauf temperaturbedingter Nullpunkt drift vor und nach Kompensationsmassnahmen.

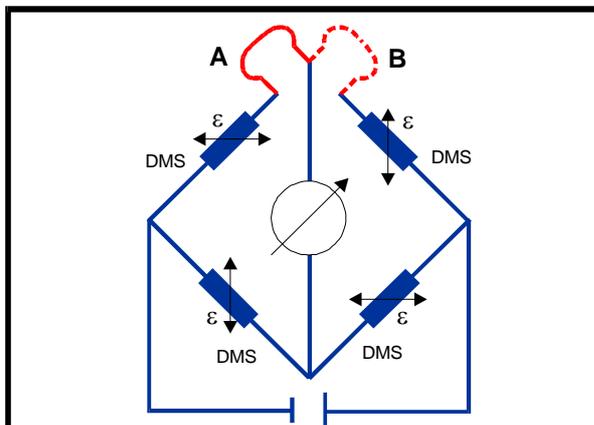


Abb.1: Einfügen von Kupferdrähten als Zusatzwiderstände A und B in eine DMS-Brückenschaltung.

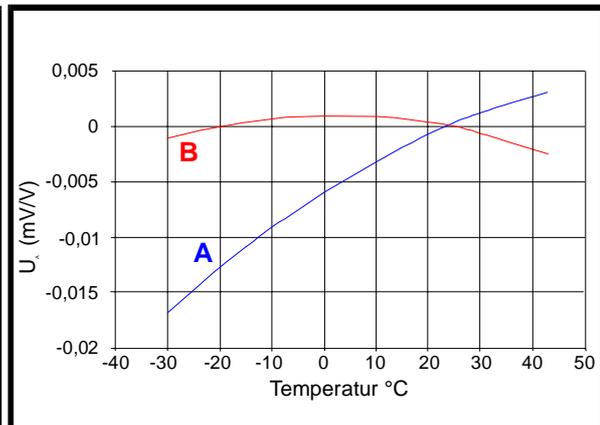


Abb.2: Beispiel temperaturbedingter Nullpunkt drift vor (A) und nach (B) Kompensationsmassnahmen.

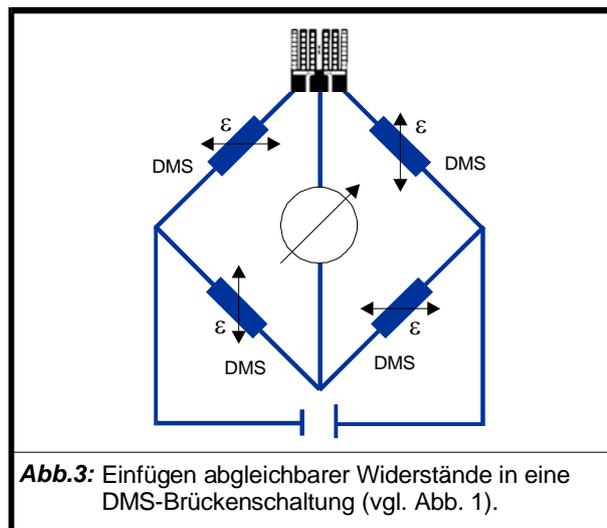


Abb.3: Einfügen abgleichbarer Widerstände in eine DMS-Brückenschaltung (vgl. Abb. 1).

Sollen indes grössere Serien gleichartiger Messwertaufnehmer hergestellt werden, ist die beschriebene Kupferdrahtmethode aus vielerlei Gründen nicht mehr praktikabel. Hier empfiehlt sich vielmehr die Verwendung *aufklebbarer Abgleichwiderstände*, die zusammen mit den DMS auf den

Federkörper aufgebracht werden. Diese abgleichbaren Widerstände, im physischen Aufbau wie DMS geartet, bestehen aus einem Widerstandslaminat (z.B. Kupfer), das sich auf einem Kunststoffträger befindet. Sie werden mit bestimmten Anfangswerte geliefert und können durch einfaches Durchritzen von Leiterbahnen auf den benötigten Wert getrimmt werden. Dieser Wert ist stets grösser als der Anfangswert. *Abb.3* zeigt, analog zu *Abb. 1*, wie derartige Abgleichwiderstände in die Brückenschaltung eingefügt werden. Es hat sich im übrigen als zweckmässig erwiesen, *Abgleichwiderstände in den Brückenecken anzubringen, die der Messdiagonale zugeordnet sind.*

Zur Messung der Nullpunktdrift infolge Temperaturänderungen geht man so vor:

- Das Ausgangssignal der Brückenschaltung (Initialnullabweichung) wird bei der Temperatur ϑ_1 (im allgemeinen Raumtemperatur) gemessen.
- Der Messwertaufnehmer wird auf die Temperatur ϑ_2 gebracht, wobei $\vartheta_1 > \vartheta_2$ oder $\vartheta_1 < \vartheta_2$ ist.
- Sodann wird die Differenz der Ausgangssignale bei ϑ_1 und ϑ_2 ermittelt.

Das Ausgangssignal kann entweder in elektrischer Spannung (Millivolt) oder in der Dimension der Dehnung $\mu\text{m}/\text{m}$ (relative Längenänderung) ausgedrückt werden. Aus formalen Gründen wird hier die auftretende (eigentlich scheinbare) Dehnung bevorzugt, das temperaturbedingte Brückenausgangssignal also in Dehnung ausgedrückt. Es ergibt sich dann die *Nullpunktdrift* aufgrund von Temperaturänderung zu

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\vartheta_2} - \varepsilon_{\vartheta_1}$$

Nachdem die Nullpunktdrift bekannt ist, kann die Widerstandsänderung ΔR , die durch die Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ hervorgerufen wird, folgendermassen berechnet werden; es ist

$$\Delta R_g = K \times \varepsilon \times \Delta\vartheta^{-1} \times R_B \quad \Omega/\text{K} \quad (1)$$

mit ΔR_g = Widerstandsänderung pro Grad Kelvin [Ω/K], $\Delta\vartheta$ = Temperaturänderungsdifferenz ($\vartheta_2 - \vartheta_1$), K = K-Faktor der DMS, ε = gemessenes Brückenausgangssignal (dimensionslos) und R_B = DMS-Widerstand (Ω).

Das Ergebnis aus Gleichung (1) wird zur Berechnung des zur Kompensation der Nullpunktdrift erforderlichen Widerstands (Kupferdraht oder aufklebbarer, abgleichbarer Widerstand) benötigt. Dies geschieht mittels der einfachen Beziehung

$$R_{Cu} = \Delta R_g \times \alpha_{Cu}^{-1} \quad \Omega \quad (2)$$

mit R_{Cu} = erforderlicher Kupfer-Kompensationswiderstand [Ω] und α_{Cu} = Temperatur-Widerstandskoeffizient von Kupfer [K^{-1}].

Soll die Kupferdrahtkompensation angewandt werden, ist es zweckmässig, einen solchen Draht zu wählen, dessen Widerstand pro Längeneinheit bekannt ist. Damit ermöglicht sich, die für einen bestimmten Widerstand erforderliche Drahtlänge zu berechnen; es ist

$$l_{Cu} = R_{Cu} / R_1 \times 10^3 \quad \text{mm} \quad (3)$$

Es sind: l_{Cu} = zur Temperaturkompensation benötigte Kupferdrahtlänge [mm] und R_1 = Widerstand des zur Temperaturkompensation gewählten Kupferdrahts je Meter [Ω/m].

Beispiel

Gegeben sind:

$$\Delta\vartheta = 55 \text{ K}; \quad \varepsilon = 35 \times 10^{-6}; \quad R_B = 350 \text{ } \Omega; \quad K = 2,0; \quad R_1 = 3,62 \text{ } \Omega/\text{m}; \quad \alpha_{Cu} = 0,0039 \text{ K}^{-1}$$

Gesucht ist l_{Cu} anhand von Gleichung (3). Hierzu wird zunächst mit Hilfe von Gleichung (1) ΔR_g berechnet:

$$\Delta R_g = K \times \varepsilon \times \Delta \mathcal{G}^{-1} \times R_B = 2 \times 35 \times 10^{-6} \times 55^{-1} \times 350 = 4,45 \times 10^{-4} \quad \Omega/K$$

Dann errechnet man mittels Gleichung (2) R_{Cu} :

$$R_{Cu} = \Delta R_g \times \alpha_{Cu}^{-1} = 0,0114 \quad \Omega$$

sowie mit Hilfe von Gleichung (3) schliesslich l_{Cu} :

$$l_{Cu} = R_{Cu} / R_1 \times 10^3 = 0,114 / 3,62 \times 10^3 = 31,5 \text{ mm}$$

Mithin müssen zur Kompensation von $\varepsilon = 35 \times 10^{-6}$ ($35 \mu\text{m/m}$), hervorgerufen durch $\Delta\mathcal{G} = 55 \text{ K}$, von dem gewählten Kupferdraht ($R_1 = 3,62 \Omega/\text{m}$) $31,5 \text{ mm}$ in den Brückenweig A der Schaltung gemäss *Abb. 1* eingefügt werden.

3. Widerstandsmässiger Brückenabgleich

Selbst wenn nach der Installation (Kleben und Verdrahten) der vier DMS einer Wheatstone'schen Brückenschaltung dieselbe sich als abgeglichen zeigen sollte - dieses wäre aber in der Praxis ein verblüffender Zufall -, wird sich aufgrund der oben beschriebenen Prozeduren, die zur Temperaturkompensation notwendig waren, d.h. durch das Einfügen der Kompensationswiderstände, eine *widerstandsmässige Brückenverstimmung* ergeben. Diese kann häufig bis zu einer Grössenordnung von $\varepsilon = 40 \times 10^{-6}$ ($40 \mu\text{m/m}$) bzw. $20 \mu\text{V/V}$ toleriert werden; die Entscheidung darüber hängt jedoch letzten Endes von der angestrebten Gesamtgenauigkeit des betreffenden Messwertaufnehmers ab.

Es sei angemerkt, dass das wiedergegebene Zahlenbeispiel schon einem Messwertaufnehmer mit höheren Genauigkeitsanforderungen entspricht. Folglich können für Messwertaufnehmer minderer Genauigkeit ohne weiteres höhere Brückenverstimmungen zugelassen werden. Wenn indes ein Brückenfeinabgleich notwendig wird, müssen wiederum Widerstände in entsprechende Brückenweige eingefügt werden.

Von den zum Feinabgleich verwendeten Widerständen wird nun zu fordern sein, dass sich ihr Widerstandswert mit der Temperatur *möglichst wenig* ändert bzw. ihr Widerstands/Temperatur-Verhalten so gut wie irgend möglich dem der DMS entspricht. Konsequenterweise erscheint es also sinnvoll, z.B. Widerstände aus Konstantandraht einzufügen, wenn die Wheatstone'sche Brückenschaltung aus DMS mit Konstantangittern besteht.

Der Abgleichzustand einer Wheatstone'schen Brückenschaltung wird bekanntlich von den gegenseitigen Widerstandsverhältnissen der Brückenweige zueinander bestimmt. Weisen unmittelbar benachbarte Brückenweige Widerstandsunterschiede auf, ist die Brückenschaltung keineswegs abgeglichen; sie befindet sich nicht im Gleichgewichtszustand, so dass sich in der so genannten Messdiagonale ein der Widerstandsdifferenz proportionales Potential ausbildet und bei Widerstandsbelastung ein entsprechender Strom fließen würde.

Diese Gegebenheiten gelten naturgemäss auch dann, wenn die Zweige einer Wheatstone'schen Brückenschaltung aus DMS (samt ihrem Verdrahtungsmaterial) gebildet sind. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die relevanten Parameter der vier DMS in der so genannten Vollbrücke einander gleich sind, wie beispielsweise der Widerstand, der K-Faktor und dergleichen. Allerdings ist die *absolute Identität aller Brückenweige nur theoretisch möglich*; in der Praxis werden allein schon infolge der Temperaturabgleichmassnahmen gewisse Brückenverstimmungen auftreten.

Die rein widerstandsmässig bedingte Brückenverstimmung ergibt sich aus der Beziehung

$$\varepsilon = \Delta R \times (R_B \times K)^{-1} \quad (4)$$

mit ε = Dehnung, ΔR = Widerstandsdifferenz [Ω], R_B = Initialwiderstand der DMS [Ω] und K = K-Faktor der DMS. Die Auflösung dieser Gleichung nach ΔR ergibt

$$\Delta R = K \times \varepsilon \times R_B \quad \Omega \quad (5)$$

Damit ist der zum widerstandsmässigen Brückenabgleich benötigte Zusatzwiderstand bestimmt.

Will man den anhand von Gleichung (5) berechneten Widerstand in Form eines Konstantandrahts in den entsprechenden Brückenweig einfügen (Abb.4), ergibt sich die Drahtlänge aus der Beziehung

$$l_{Ra} = \Delta R \times 10^3 / R_1' \quad (6)$$

Es sind: l_{Ra} = benötigte Drahtlänge für den Brückenabgleich [mm] und R_1' = Widerstand des gewählten Drahts [Ω/m]. Besteht das Messgitter der DMS aus Konstantan, wird auch ein Konstantandraht einzusetzen sein; anderenfalls werden die jeweils den Messgitterlegierungen entsprechenden Werkstoffe gewählt. Für einzelne Messwertaufnehmer empfiehlt sich in der Tat die Lösung mit einem Abgleichdraht gemäss Abb. 4, während sich für die Serienfertigung aufklebbare, abgleichbare Widerstände anbieten (Abb. 5).

Beispiel

Gegeben sind: $\varepsilon = 250 \times 10^{-6}$ (gemessen); $K = 2,0$; $R_B = 350 \Omega$; $R_1' = 40 \Omega/m$

Gesucht sind: ΔR und l_{Ra} .

Anhand von Gleichung (5) erhält man

$$\Delta R = K \times \varepsilon \times R_B = 2 \times 250 \times 10^{-6} \times 350 = \mathbf{0,175 \Omega}$$

sowie anhand von Gleichung (6)

$$l_{Ra} = \Delta R \times 10^3 \times (R_1')^{-1} = 0,175 \times 10^3 \times 40^{-1} = \mathbf{4,4 \text{ mm}}$$

Es müssen folglich 4,4 mm des gewählten Konstantandrahts mit $R_1' = 40 \Omega/m$ zum Brückenabgleich in die Schaltung eingefügt werden.

4. Messbereichsänderungen durch Temperatureinflüsse

Alle bisherigen Ausführungen beziehen sich auf das Verhalten von Messwertaufnehmern *in mechanisch unbelastetem Zustand*. Wird indes ein Messwertaufnehmer mit einer Grösse belastet, zu deren Messung er auch bestimmt ist, werden sich ausserdem *Umweltparameter* bemerkbar machen, deren Einflüsse zu eliminieren sind, will man innerhalb der für den Aufnehmer definierten Toleranzen bleiben.

Auch in diesem Zusammenhang spielen *Temperatureinflüsse* eine entscheidende Rolle. Im wesentlichen hat man es mit einem unerwünschten Temperatureinfluss auf den Messbereich zu tun, dessen Zustandekommen und Ausschaltung im folgenden beschrieben sind. Vorab sei angemerkt, dass es sich hierbei um den Temperatureinfluss auf den Elastizitätsmodul (E-Modul) des Federkörpers und auf den K-Faktor der DMS handelt.

4.1 Physikalische Grundlagen

Die Darstellung der physikalischen Grundlagen erstreckt sich auf den Aufnehmerkörper bzw. den Federkörper, die DMS und die Auswirkungen auf das Ausgangssignal.

4.1.1 Aufnehmerkörper (Federkörper)

Der Temperatureinfluss auf den Federkörper lässt sich im wesentlichen durch zwei bekannte physikalische Phänomene beschreiben:

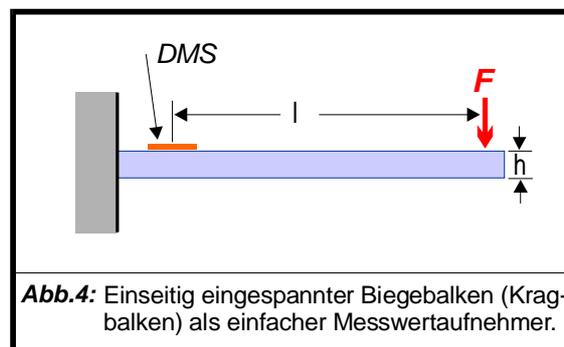
- Es wird sich eine Wärmedehnung entsprechend dem Temperatureausdehnungskoeffizienten des Federkörperwerkstoffs ergeben. Diesem Problem wird durch die richtige Auswahl temperaturselbstkompensierender DMS sowie einer entsprechenden Brückenschaltung begegnet. Dieses bereitet im vorliegenden Zusammenhang keine Schwierigkeiten.
- Es ändert sich der E-Modul des Federkörperwerkstoffs mit der Temperatur. Das bedeutet, dass bei gleichbleibender Belastung eine Dehnungsänderung stattfindet, d.h. eine Empfindlichkeitsänderung des Messwertaufnehmers mit der Temperatur. Der E-Modul des Federkörpermaterials sinkt z.B. mit steigender Temperatur, womit sich die Dehnung bei gleicher Last erhöht. Dies ist mithin ein absolut unerwünschtes Verhalten, gegen das geeignete Massnahmen ergriffen werden müssen, nämlich eine *E-Modul-Kompensation*.

4.1.2 Dehnungsmessstreifen

Die Temperatureinflüsse auf die DMS sind vielfältig. Im behandelten Zusammenhang interessiert jedoch vordergründig nur derjenige auf den K-Faktor der DMS. Bei konventionellen DMS mit Konstantan-Messgitter ändert sich der K-Faktor (also die Dehnungsempfindlichkeit der DMS) in der Größenordnung von 0,45 % je 50 K. Da er, wie gesagt, die "Dehnungsempfindlichkeit" der DMS definiert, wird sich natürlich beim Messwertaufnehmer eine entsprechende Empfindlichkeitsänderung ergeben. Beide bisher angesprochenen Empfindlichkeitsänderungen (E-Modul-abhängig und K-Faktor-abhängig) haben somit eine Messbereichsänderung zur Folge.

4.1.3 Auswirkungen auf das Ausgangssignal

Ein einseitig eingespannter Biegebalken verkörpert ein einfaches Beispiel eines Messwertaufnehmers.



Die Dehnung errechnet sich hier zu

$$\varepsilon = \frac{6 \times F \times l}{E \times b \times h^2} \quad (7)$$

mit F = Kraft [N], l = Länge des Hebelarms [mm], E = E-Modul des Federkörpers [N/mm^2], b = Breite des Federkörpers und h = Dicke des Federkörpers [mm]. Die Gleichung zeigt, dass die Dehnung ε bei konstanter Kraft und konstanten Abmessungen des Biegebalkens eine Funktion des E-Moduls ist.

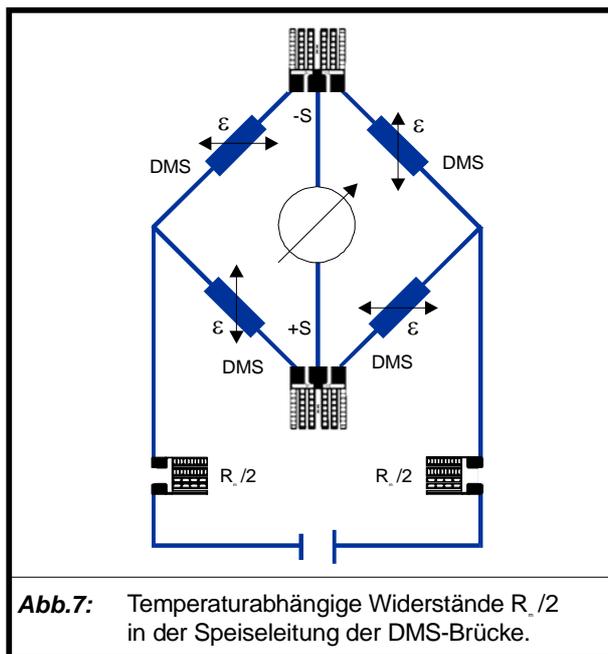
Betrachtet man die Änderung des K-Faktors der DMS mit der Temperatur unter dem Gesichtspunkt der Ausgangsspannung eines Messwertaufnehmers, ergibt sich auch hier eine Ausgangsspannungsänderung; es ist die Ausgangsspannung

$$U_a = \frac{1}{4} \times U_B \times N \times K \times \varepsilon \quad \text{mV} \quad (8)$$

mit U_B = Brückenspeisespannung [V], N = Brückenfaktor (1; 1,3; 2; 2,6; 4), K = K-Faktor der DMS (bei Raumtemperatur nominell 2) und ε = Dehnung.

Beispiel

Die typische Empfindlichkeit von Messwertaufnehmern, beispielsweise von Kraftmessdosen, liegt bei 2 mV/V. Der Federkörper sei aus hochlegiertem Stahl gefertigt, bei dem die Änderung des E-Moduls -1,5 %/50 K beträgt. Die Änderung des K-Faktors der eingesetzten DMS sei (siehe oben) 0,45 %/K. Anhand der Gegebenheiten stellt sich bei Erwärmung des angenommenen Kraftaufnehmers auf 72 °C (um 50 K über Raumtemperatur) eine neue Empfindlichkeit von 2,04 mV/V ein, was einer Messbereichserweiterung um 2 % entspricht. Bei einem Messwertaufnehmer der Klasse 1 ist dies bereits nicht mehr tolerierbar. Hieraus geht hervor, dass derartigen Temperatureinflüssen bereits bei der Herstellung durch geeignete Massnahmen *entgegengewirkt* werden muss.



4.2 Wege zur Problemlösung

Wege zur Problemlösung führen über die Änderung der Brückenspeisespannung; in diesem Zusammenhang wird auch auf die Berechnung des Widerstandswerts für Balco- oder Nickelwiderstände sowie auf die Widerstände selbst eingegangen.

4.2.1 Änderung der Brückenspeisespannung

Aus Gleichung (8) ist bereits ersichtlich, dass eigentlich nur über die *Änderung der Brückenspeisespannung* U_b die Ausgangsspannung U_a und damit der Messbereich beeinflusst werden kann. Werden beispielsweise K und ε infolge Temperaturanstiegs grösser, kann das Ausgangssignal U_a durch entsprechende Absenkung der Brückenspeisespannung U_b konstantgehalten werden.

Eine relativ einfache Lösung besteht darin, in die Zuleitungen der Speisespannung Balco- oder Nickelwiderstände einzufügen, deren Widerstandswert sich temperaturabhängig so ändert, dass sich der gewünschte Spannungsabfall, also eine massgerechte Erniedrigung der Speisespannung ergibt. Damit können Messbereichsänderungen innerhalb guter Toleranzen kompensiert werden. *Abb. 7* zeigt die Schaltung mit den in die Speisespannungsleitungen eingefügten Widerständen.

4.2.2 Berechnung des Widerstandswerts für Balco- oder Nickelwiderstände

Zwar könnten die in die Speisespannungsleitung(en) einzufügenden Widerstände von Fall zu Fall empirisch ermittelt werden, doch wäre ein solches Vorgehen nicht allein zeitaufwendig, sondern auch zugleich teuer und unpraktisch. Zielgerichtet führt die Berechnung über die Beziehung

$$|R_m| = \frac{(\Delta E - \Delta K) \times R_B}{\alpha_m + (\Delta E - \Delta K)} \quad \Omega \quad (9)$$

mit R_m = Widerstandswert des Balco- oder Nickelwiderstands [Ω], ΔE = temperaturabhängige E-Modul-Änderung des Federkörperwerkstoffs [%/K], ΔK = temperaturabhängige Änderung des K-Faktors der DMS [%/K], R_B = Initialwiderstand der DMS [Ω] und α_m = Widerstands-Temperaturkoeffizient von Balco bzw. Nickel [%/K].

Beispiel

Für einen Messwertaufnehmer aus hochqualitativem Stahl (z.B. 17-4 PH SS), der mit Konstantan-DMS ($R_B = 350 \Omega$) bestückt ist, ergibt sich für

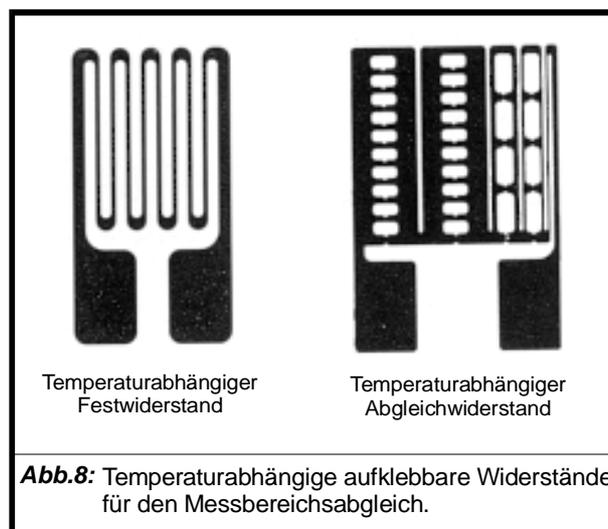
$$|R_m| = \frac{(\Delta E - \Delta K) \times R_B}{\alpha_m + (\Delta E - \Delta K)} = \frac{(-0,031 - 0,009) \times 350}{0,45 + (-0,031 - 0,009)} = 34,1 \Omega$$

Allerdings ist dieses Ergebnis nicht ganz exakt, da die Werte für ΔE , ΔK und α_m im allgemeinen nur näherungsweise bekannt sind (Tabelle 2).

4.2.3 Widerstände

Bei den verwendeten Widerständen handelt es sich um *aufklebbare Abgleichwiderstände*, die in ihrem Aufbau den Folien-DMS gleichen. Ebenso wie diese, werden sie auf den Aufnehmerkörper geklebt, wodurch gewährleistet ist, dass sie *denselben Temperaturbedingungen* ausgesetzt sind, welche die von ihnen zu kompensierenden Effekte hervorrufen.

Werden an einen Messwertaufnehmer geringe bis mittlere Genauigkeitsanforderungen gestellt, reicht es meist aus, einen Festwiderstand aus Balco oder Nickel (Abbildung 8) zu verwenden. Bei höheren



Anforderungen ist dagegen ein Feinabgleich erforderlich, der mit aufklebbaren Abgleichwiderständen bewerkstelligt werden kann (Abbildung 8). Mit dem Durchtrennen oder Durchritzen von Leiterbahnen erzielt man dabei Widerstandsänderungen im Milliohm-Bereich; man geht also zum Feinabgleich von äusserst einfachen Gegebenheiten aus.

4.3 E-Modul-kompensierende Dehnungsmessstreifen

Ein anderer Weg zur Kompensation von E-Modul-Änderungen des Federkörpermaterials ist der Einsatz von DMS, die ein anderes Temperaturverhalten des K-Faktors als konventionell Konstantan-DMS zeigen. Im Gegensatz zu letzteren, deren K-Faktor mit der Temperatur steigt, gibt es auch DMS mit *entgegengesetztem Verhalten*. Dies bedeutet, dass deren K-Faktor mit steigender Temperatur abnimmt.

Es handelt sich hierbei um DMS, deren Messgitter nicht aus Konstantan besteht, sondern aus einer als *Karma*-Legierung bezeichneten Chrom-Nickel-Legierung. Karma-DMS werden folglich mit steigender Temperatur dehnungsunempfindlicher. Erbringt der abnehmende E-Modul eines Aufnehmer-Federkörpers bei gleichbleibender Last, jedoch steigender Temperatur höhere Dehnungswerte, wird diese Steigerung der Dehnungsempfindlichkeit des Federkörpermaterials durch den sich mit steigender Temperatur verringernden K-Faktor der Karma-DMS kompensiert.

Die einzige Problematik liegt darin, dass die verschiedenen Federkörperwerkstoffe naturgemäß unterschiedliches Temperaturverhalten des E-Moduls aufweisen. Das bedeutet, dass das Temperaturverhalten des K-Faktors dem jeweiligen Temperaturverhalten der E-Moduln *so weit angepasst* werden muss, dass die resultierende Kompensation *tatsächlich befriedigt*. In der Praxis geschieht diese Anpassung beim DMS-Hersteller in Zusammenarbeit mit dem Messwertaufnehmer-Hersteller mehr oder weniger empirisch. Am schwierigsten ist die Kompensation der Bereichserweiterung, da die Temperaturänderung *unter Nennlast* erfolgen sollte.

Werte von $\Delta E / \Delta K$ und α_m	Werkstoffe
$\Delta E =$ -1,5 % je 50 K -1,8 % je 50 K -2,3 % je 50 K -2,7 % je 50 K	17-4 PH Stainless Steel Werkzeugstahl Kupfer-Beryllium Aluminium
$\Delta K =$ 0,45 % je 50 K -0,41 % je 50 K -0,52 % je 50 K -0,61 % je 50 K -0,75 % je 50 K	Konstantan-DMS Karma-DMS mit Temperaturselbstkompensation für $\alpha = 5,4 \times 10^{-6}/K$ Karma-DMS mit Temperaturselbstkompensation für $\alpha = 10,8 \times 10^{-6}/K$ Karma-DMS mit Temperaturselbstkompensation für $\alpha = 16,2 \times 10^{-6}/K$ Karma-DMS mit Temperaturselbstkompensation für $\alpha = 23,4 \times 10^{-6}/K$
$\alpha_m =$ 0,56 % je 1 K 0,45 % je 1 K	0,0056 $\Omega/\Omega/K = 0,0056/K$ für Nickel 0,0045 $\Omega/\Omega/K = 0,0045/K$ für Balco

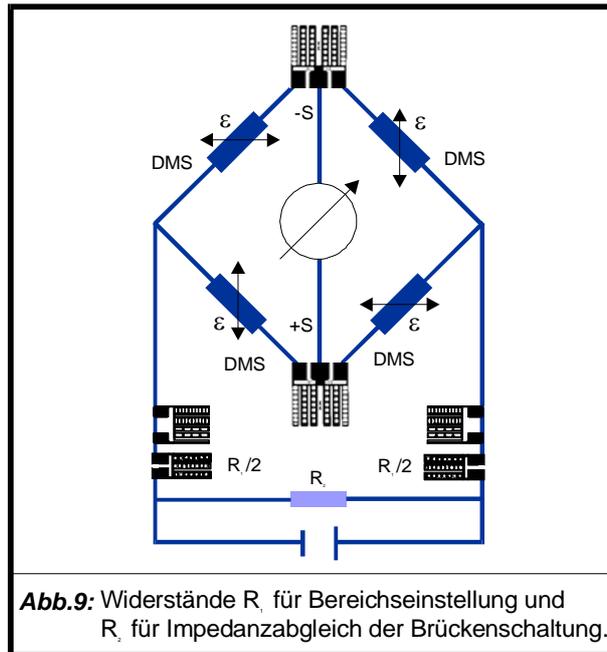
Tabelle 2: Werte von ΔE , ΔK und α_m

5. Einstellung des Ausgangssignals bei Nennlast

Wir ein Messwertaufnehmer mit seiner vollen Nennlast belastet, sollte er eine Ausgangsspannung abgeben, die möglichst - wenn auch nicht notwendigerweise - ganzzahlig und innerhalb einer Serie gleichartiger Aufnehmer auch bei allen Exemplaren gleich ist. Beim heutigen Stand der Technik beträgt diese Ausgangsspannung für weite Bereiche verschiedenster Messwertaufnehmer auf DMS-Basis 2 ... 3 mV/V, d.h. man erhält eine Ausgangsspannung von 2...3 mV je Volt Speisespannung.

Zieht man indes alle an einem Messwertaufnehmer vorgenommenen Brückenabgleicharbeiten in Betracht, ist es recht unwahrscheinlich, dass man wirklich zu einer ganzzahligen Ausgangsspannung bei Nennlast kommt. Dies kann man jedoch auf elegante Weise durch Beeinflussung der Speisespannung erreichen, indem man temperaturunempfindliche Widerstände in die Zuleitungen für die Brückenspeisespannung einfügt. Hierdurch ergibt sich ein weiterer definierter Abfall der Speisespannung, der letztlich den gewünschten Effekt bewirkt.

Je nach Anwendungsfall ist die Einfügung von Metallfilmwiderständen oder aufklebbaren Abgleichwiderständen zweckmässig (*Abbildung 9*), wobei die Forderung nach *minimaler Temperaturabhängigkeit* dieser Widerstände bestehen bleibt. Bei Verwendung aufklebbarer Abgleichwiderstände ist es vorteilhaft, solche Widerstandsmaterialien zu wählen, die mit denen der DMS identisch sind.



Der Widerstand zur Einstellung der für die Nennlast geforderten Ausgangsspannung (R_1 in Abbildung 9) kann anhand der Beziehung

$$R_1 = \frac{U_i}{U_s} \times R_B - R_B \quad \Omega \quad (10)$$

(wobei: $R_B = R_{DMS} + R_m$) berechnet werden. Es sind: R_B = Initialwiderstand der DMS, also der Brückenwiderstand (Ω), U_s = Soll-Ausgangsspannung bei Nennlast (mV/V) und U_i = Ist-Ausgangsspannung bei Nennlast (mV/V). Wird der Widerstand R_1 in die Speiseleitung(en) eingefügt, ist die gewünschte Ausgangsspannung erreicht. Zugleich hat sich allerdings der Eingangswiderstand bzw. die Impedanz der Brückenschaltung um den Betrag R_1 erhöht. Kann dies nicht akzeptiert werden, ist ein Parallelwiderstand (R_2 in Abbildung 9) einzuschalten, dessen Wert anhand der Beziehung

$$R_2 = \frac{R_{soll} \times R_x}{R_x - R_{soll}} \quad \Omega \quad (11)$$

errechnet werden kann. Es sind: R_{soll} = gewünschter Brückenwiderstand nach allen Abgleicharbeiten (z.B. 350 Ω), $R_x = R_B + R_1 + R_m$, die Größen R_B , R_1 und R_m sind nach dem Empfindlichkeitsabgleich und dem E-Modul-Abgleich bekannt bzw. können gemessen werden.

Beispiel

Gegeben sind

$$R_B = 350 \Omega + 34,1 \Omega; \quad U_s = 2 \text{ mV/V}; \quad U_i = 2,2 \text{ mV/V}.$$

Gesucht wird

R_1 und R_2 .

$$R_1 = \frac{2,2}{2} \times 384,1 - 384,1 = 38,41 \Omega$$

und mit $R_x = R_B + R_1$ ergibt sich

$$R_2 = \frac{350 \times 422,5}{422,5 - 350} = 2039,4 \Omega$$

Mit den beschriebenen Massnahmen wird beispielsweise der Austausch von Messwertaufnehmern gleichen Typs ohne Nachkalibrierung oder Änderung der Einstellung von Mess- oder Anzeigegeräten ermöglicht.

6. Zusammenfassung

Messwertaufnehmer auf DMS-Basis erfüllen heutzutage in der Mess- und Regelungstechnik wichtige Funktionen; sie haben vielfach mechanische oder hydraulische Vorrichtungen in weiten Bereichen abgelöst. Genauigkeitsklassen 0,5 oder gar 0,1 und besser sind durchaus Stand der Technik. Fast die gesamte moderne Wägetechnik beruht auf dem Einsatz von so genannten Wägezellen, wie Kraftaufnehmer auf DMS-Basis in diesem Technologiebereich genannt werden. Um die hier genannten und in der Wägetechnik geforderten, durch legale Eichung überwachte Genauigkeiten erreichen und halten zu können, muss bereits bei der Herstellung von Messwertaufnehmern dafür gesorgt werden, dass Einflussgrößen unterdrückt und eliminiert werden, die das Messsignal verfälschen können.

Temperaturen und Temperaturänderungen sind solche negativen Einflussgrößen, da sie den Messwertaufnehmerkörper wie auch die DMS in unerwünschter Weise beeinflussen. Durch geeignete Kompensationsmassnahmen können solche Temperatureffekte zumindest minimiert werden, sodass die erwähnten Genauigkeiten bei Messwertaufnehmern auf DMS-Basis sicher ermöglicht werden.

Über die in dieser Arbeit geschilderten Zusammenhänge hinaus bestehen bei der Fertigung von Messwertaufnehmern durchaus weitere Problemstellungen. Es seien hier stellvertretend nur die Zeitabhängigkeit des Ausgangssignals bei Nennlast (Kriechen) und Linearitätsfehler genannt, die trotz aller hier geschilderten Massnahmen notwendigerweise noch vorhanden sein werden. Probleme dieser Art erfordern nach Schwierigkeit und Umfang eine gesonderte Behandlung, die über den Rahmen der in dieser Arbeit abgehandelten Thematik hinaus gehen würden.