

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

1.0 Einführung

Bei DMS-Messungen mit multiplen Viertelbrückeninstallationen unter statischen oder kombiniert statisch/dynamischen Bedingungen ist es übliche und bevorzugte Praxis, für jeden DMS eine separate 3-Leiter-schaltung einzusetzen. Wird aber eine Anzahl solcher DMS an ein Vielkanal-Messgerät angeschlossen, bei dem eine Gruppe von Kanälen oder alle aus einer gemeinsamen Speisespannungsquelle versorgt werden, sind die angeschlossenen Brückenschaltungen (jede einen aktiven DMS und einen Brückenergänzungs-DMS enthaltend) im Ergebnis parallel geschaltet. Diese Anordnung für sich muss noch keine Probleme bewirken, vorausgesetzt, das Versorgungsnetzteil bietet genug Leistung, um unter variierenden Anforderungen zur Brückenspeisung immer eine gleich bleibende konstante Spannung bereitzustellen. Wenn die beiden individuellen Speisespannungsleitungen P+ und P- in jeder Schaltung den gleichen Widerstand aufweisen und der gleichen Temperatur ausgesetzt sind, wird ihr einziger Beitrag zu Messfehlern die übliche Desensibilisierung des K-Faktors sein. Dieser Fehler kann mit der Nebenschlusskalibrierung leicht beseitigt werden.

Der Messtechniker könnte jedoch unter gewissen Umständen motiviert sein, eine Strom führende Zuleitung einzusetzen, die sich - wie in Abb. 1 gezeigt - alle aktiven DMS teilen oder, anders gesagt, die ihnen gemeinsam ist. Mit einer solchen Anordnung können bei großen Abständen zwischen DMS und Instrument Kabel- und Verdrahtungskosten eingespart werden. Bei einer größeren Anzahl von aktiven DMS spielen dann natürlich auch die beträchtlichen Einsparungen bei der Zeit für die Verdrahtungsarbeiten eine Rolle. Zieht man jedoch die potenziellen Probleme in Betracht, die sich durch die Anwendung eines gemeinsamen Leiters ergeben, kann die einzige stichhaltige Motivation dafür nur in physischen und mechanischen Einschränkungen liegen. Solche Einschränkungen wären z. B. eine unpraktische Anzahl von benötigten Schleifringen bei Messungen an rotierenden Bauteilen, ein technisch schwierig zu bewältigendes Problem beim Durchgang durch Druckkesselwände mit dem Messkabelbündel und die Anwendung von Mehrgitter-DMS (Rosetten) oder bestimmten Arten von DMS-Ketten mit gemeinsamem Abgriff.

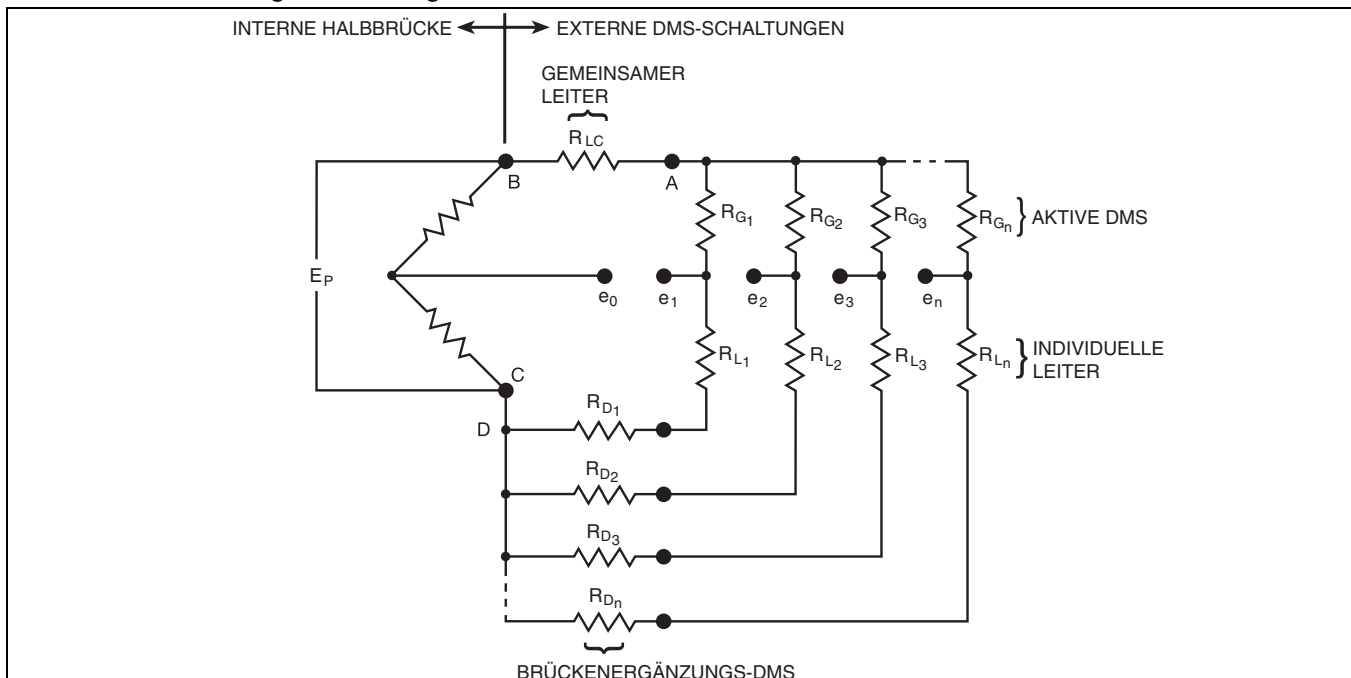


Abb. 1 - Blockschaltbild von parallelen Wheatstone-Brückenschaltungen mit gemeinsamem Speisespannungsleiter

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

Ein fundamentales Problem bei Schaltungen mit einem gemeinsamen Speisespannungsleiter liegt darin, dass die Messdaten schwer geschädigt werden oder sogar ganz verloren gehen können, wenn auch nur ein DMS (oder ein Messgitter) nicht gut funktioniert. Eine solche Fehlfunktion kann alles mögliche sein: Ein Kurzschluss innerhalb einer einzelnen DMS-Installation, ein schlechter DMS-Isolationswiderstand, eine unterbrochene Brückenschaltung und dergl. mehr. Obwohl also die Gefahr des Datenverlusts ein Hauptgrund dafür ist, von Schaltungen mit einem gemeinsamen Speisespannungsleiter Abstand zu nehmen, hat das für die weitere Diskussion keine direkte Bedeutung und soll deshalb nicht weiter behandelt werden.

Die gefährlicheren Aspekte der Anwendung eines gemeinsamen Speiseleiters ergeben sich von oftmals subtileren Effekten, die auftreten, wenn die DMS richtig arbeiten. Zu den Problemen, die so auftreten können, zählen mögliche große initiale Verstimmungen der Wheatstone-Brückenschaltungen, ungenaue Nebenschlusskalibrierung, Übersprechen zwischen den DMS-Schaltungen während der Messung und Verlust der Kompensation von Temperatureinflüssen auf die Messkabel. Diese bilden die Hauptgegenstände der folgenden Diskussion.

2.0 Die "unabgegliche" Wheatstone-Brückenschaltung

Das elektrische Ausgangssignal $e_0 - e_1$ aus den in Abb. 1 dargestellten aktiven DMS-Schaltungen hängt ab von Versorgungsspeisung E_p und dem Widerstand des gemeinsamen Leiters R_{LC} , von den aktiven DMS R_{Gi} , den individuellen Rückleitern R_L und den Brückenergänzungs-DMS R_{Di} . Die Widerstände der Signalleiter sind relativ unwichtig, weil kein nennenswerter Strom in ihnen fließt, wenn zur Messung der Signalspannung ein modernes Gerät mit hoher Eingangsimpedanz benutzt wird.

Der Widerstand der n parallelen Schaltungen zwischen den Punkten A und C kann, unter der Voraussetzung, dass der Widerstand zwischen den aktiven DMS (R_{Gi} und R_{Gi+1}) vernachlässigbar ist, ausgedrückt werden als:

$$R_{A-C} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{Gi} + R_{Li} + R_{Di}} \right)} \quad (1)$$

Da der gemeinsame Leiter R_{LC} einen endlichen Widerstand aufweist, wirkt er wie ein Spannungsteiler zur Reduzierung der Speisespannung für die aktiven und die Brückenergänzungs-DMS. Und weil er die Summe aller Ströme aus allen parallelen Schaltungen führt, ist der Spannungsabfall im gemeinsamen Leiter n -mal so groß wie in individuellen Rückleitern mit gleichem Widerstand (vorausgesetzt, alle aktiven und alle Brückenergänzungs-DMS sind nominell widerstandsgleich). Der Anteil H der Speisespannung E_p , der den parallelen Schaltungen zwischen den Punkten A

und C für alle Widerstandskombinationen in diesen Schaltungen zur Verfügung steht, ist:

$$H = \frac{E_{A-C}}{E_p} = \frac{R_{A-C}}{(R_{A-C} + R_{LC})} \quad (2)$$

E_{A-C} ist die wirkliche Brückenspeisespannung, die an den parallelen Schaltungen anliegt, und es wird vorausgesetzt, dass sie für alle gleich ist. Die wichtige Erkenntnis aus diesem Ausdruck ist, dass der Strom im gemeinsamen Leiter und damit die Brückenspeisespannung zwischen den Punkten A und C zu jedem gegebenen Zeitpunkt nicht nur abhängen vom Widerstand des gemeinsamen Leiters, vom Widerstand der individuellen Leiter und den Brückenergänzungswiderständen, sondern auch vom momentanen Widerstand aller unabhängig voneinander variablen DMS-Widerstände in den parallelen Netzwerken. Der Effekt, den dieses Phänomen bezüglich des Brückenausgangs hervorruft, wird in der folgenden Diskussion als "Übersprechen" bezeichnet.

Wendet man den Spannungsanteil H vom "Spannungsteiler" auf den Halbbrückenterm der üblichen Gleichung für den Ausgang einer Wheatstone-Brücke an, dann kann $e_0 - e_1$, das Signal von jedem aktiven DMS in den parallelen Schaltungen in Abb. 1, für jede Kombination von Widerstandswerten so errechnet werden:

$$e_0 - e_1 = E_p \left[\frac{1}{2} - \frac{H(R_{Li} + R_{Di})}{R_{Gi} + R_{Li} + R_{Di}} \right] \quad (3)$$

3.0 Initiale Brückenverstimmung

Weil der gemeinsame Leiter auf die Spannung an der internen Halbbrücke keinen Einfluss hat, kommt H für den Term $\frac{1}{2}$ in Gleichung (3) nicht zur Anwendung. Das gibt Anlass zum Problem einer initialen Brückenverstimmung in jeder Schaltung, auch und sogar wenn der aktive DMS und der Brückenergänzungs-DMS widerstandsgleich sind. Um sich über die Größe dieser initialen Brückenverstimmung klar zu werden, sei der Messfall mit n parallelen Schaltungen betrachtet, bei dem alle aktiven DMS und alle Brückenergänzungen den gleichen Widerstand R_G aufweisen und auch der Widerstand R_L alle Leiter der Messkabel, einschließlich des gemeinsamen Leiters, gleich ist. Bei einer K-Faktor-Einstellung am Instrument von 2,000, ist die initiale Brückenverstimmung, ausgedrückt in $\mu\text{m/m}$:

$$\varepsilon_1 = \frac{(n-1)R_L/R_G}{2 + (n+1)R_L/R_G} \times 10^6 \quad (4)$$

Gleichung (4) ist in Abb. 2 für verschiedene Kombinationen der Parameter n und R_L/R_G grafisch dargestellt. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, kann die Initial-Brückenverstimmung leicht den Abgleichbereich kommerzieller Dehnungsmessbrücken oder Brückenverstärker überschreiten.

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

4.0 Kalibrierfehler

Die Nebenschlusskalibrierung der individuellen Viertelbrückenschaltungen zur Einstellung der Instrumentenempfindlichkeit würde normalerweise derart geschehen, dass man den Kalibrierwiderstand der Brückenergänzung in einer Schaltung parallel schaltet, unter der Bedingung, dass der Ausgang der restlichen parallelen Schaltungen Null ist. Die Anwendung des gemeinsamen Leiters wird beim eigentlichen Kalibrierprozess selbst keinen Fehler hervorrufen. Bei der folgenden Dehnungsmessung werden jedoch die von der Dehnung hervorgerufenen Widerstandsänderungen in den individuellen DMS Änderungen der Werte von R_{A-C} , H und schließlich auch E_{A-C} bewirken. In der Konsequenz wird eine Änderung von E_{A-C} dann in einer Änderung des Brückenausgangs resultieren, auch wenn der Widerstand des aktiven DMS mit dem Kalibrierwert korrespondiert. Der Kalibrierfaktor zwischen Widerstandsänderung und Ausgangsspannung ist dann für die Kalibrierschaltung nicht mehr korrekt, und die angezeigte Dehnung ist fehlerhaft. Entsprechend ist der Kalibrierfaktor allgemein nur korrekt für die Kalibrierbedingung -, nämlich wenn der Strom im gemeinsamen Leiter gleich dem Strom während der Kalibrierung ist. Der Kalibrierfehler, der sich ergibt, wenn parallele DMS der Dehnung ausgesetzt sind, entzieht sich der Verallgemeinerung, aber er ist symptomatisch für das Übersprechen zwischen Schaltungen. Dieses wird im nächsten Abschnitt behandelt.

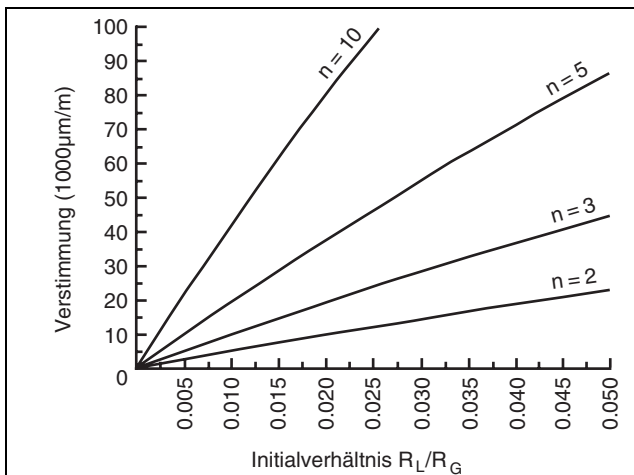


Abb. 2 - Initial-Brückenverstimmung aufgrund des gemeinsamen Leiters, die entsteht, wenn alle aktiven DMS und alle Brückenergänzungen widerstandsgleich sind, alle Kabelleiter (individuelle und der gemeinsame) widerstandsgleich sind und die K-Faktor-Einstellung 2,000 ist.

5.0 Messung von Übersprech-Fehlern

Der Begriff *Übersprechen* bezieht sich auf Änderungen sowohl der Empfindlichkeit und des Ausgangssignals in allen parallelen Schaltungen, wenn eine Widerstandsände-

rung in einer Schaltung geschieht. Wie im Falle des Kalibrierfehlers entsteht Übersprechen, weil eine Widerstandsänderung in jeder einzelnen der parallelen Schaltungen die Speisespannung und damit auch das Ausgangssignal aller anderen Schaltungen beeinflusst.

Fehler des Ausgangssignals können teilweise verallgemeinert werden, um zu einem "Übersprechempfindlichkeits-Index" zu gelangen, wie in Abb. 3 dargestellt. Die Grafik zeigt den ungefähren inkrementalen Ausgang, der sich in allen anderen parallelen Schaltungen ergibt, wenn in einer Schaltung eine Änderung von $1000\mu\text{m/m}$ stattfindet. Es ist zu beachten, dass dieser inkrementale Ausgang nicht unmittelbar mit der Größe eines beliebigen anderen Ausgangssignals zusammenhängt, das z. B. aufgrund von Dehnung in der betreffenden Schaltung vorliegt. Die inkrementalen Ausgangssignale können eher als "Ausgangsdrift" gedacht werden, die bei den betroffenen Schaltungen zu jedem der angezeigten Dehnungswerte algebraisch zu addieren wären.

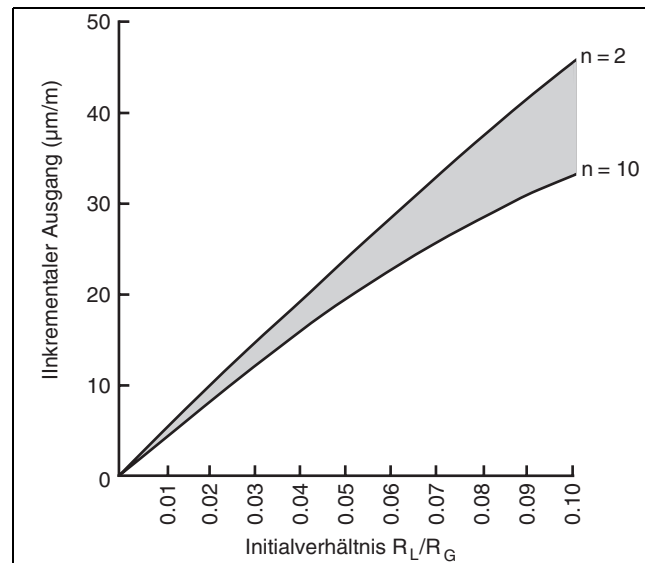


Abb. 3 - Bereich des nominalen inkrementalen Ausgangssignals in einer Gruppe von parallelen Schaltungen aufgrund einer Dehnungsänderung von $1000\mu\text{m/m}$ in einer der Schaltungen. Bedingungen: Gleicher Initialwiderstand aller aktiver und Brückenergänzungs-DMS, widerstandsgleiche Kabelleiter, Kalibrierung der Schaltung für $1000\mu\text{m/m}$ im Nebenschluss zu den aktiven DMS, K-Faktor 2,000.

Ist eine genauere Kenntnis des von Übersprechen hervorgerufenen inkrementalen Ausgangs gefordert, können mit Gleichung (3) die Ausgangsgrößen für alle Schaltungen und jegliche "momentane" Widerstandsbedingungen berechnet werden. Im Vergleich zu Fehlern, die entstehen, wenn die Kompensation von Kabel-Temperatureffekten verloren geht, sind die Übersprechfehler jedoch als relativ klein anzusehen.

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

6.0 Fehler aufgrund von Temperatureinwirkungen auf die Messkabel

Sind bei einer einzelnen, von anderen Schaltungen isolierten Viertelbrücken-3-Leiterschaltung alle Leiterlängen von gleichem Widerstand und diese der gleichen Temperatur ausgesetzt, gibt es praktisch kein falsches Ausgangssignal aufgrund von Temperatureinwirkungen auf die Kabel. Da sich ein Leiter in Serie mit dem aktiven DMS befindet und der andere mit der Brückenergänzung, heben sich thermisch bedingte Widerstandsänderungen in den Leitern gegenseitig auf. Der verbleibende Fehler aufgrund der Desensibilisierung des K-Faktors ist normalerweise klein genug, um ignoriert werden zu können. Diese Gegebenheiten ändern sich jedoch komplett, wenn eine Messanordnung mit gemeinsamem Leiter vorliegt.

Als einzelner Aspekt beim Einsatz eines gemeinsamen Leiters birgt der Verlust der Kompensation thermischer Kabeleffekte das größte Fehlerpotenzial. Kupfer, aus dem die Kabelleiter in der Regel bestehen, besitzt einen ziemlich hohen Widerstands-Temperaturkoeffizienten. Unterliegen

der gemeinsame Leiter und die individuellen Rückleitungen der parallelen Schaltungen den gleichen Temperaturänderungen, werden gewöhnlich falsche Ausgangssignale entstehen. Das Phänomen ist darin begründet, dass der gemeinsame Leiter die Summe aller Ströme der individuellen Leiter führt. Außer bei einigen besonderen Kombinationen von Leitungswiderständen wird eine thermisch hervorgerufene Widerstandsänderung in den Leitern im gemeinsamen Leiter und den individuellen Leitern unterschiedliche Spannungsabfälle ergeben, was zu einer Brückenverstimmung führt. Wenn z. B die aktiven und die Brückenergänzungs-DMS den gleichen Initialwiderstand aufweisen und der gemeinsame Leiter den gleichen Widerstand hat wie die individuellen Leiter, wird im gemeinsamen Leiter der Spannungsabfall um den Faktor n größer sein, als in den individuellen Leitern. Die Spannungsänderungen heben sich nicht gegenseitig auf, wie bei der einzelnen, isolierten Viertelbrückenschaltung, und die Kompensation thermischer Messleitungseffekte ist nicht mehr existent.

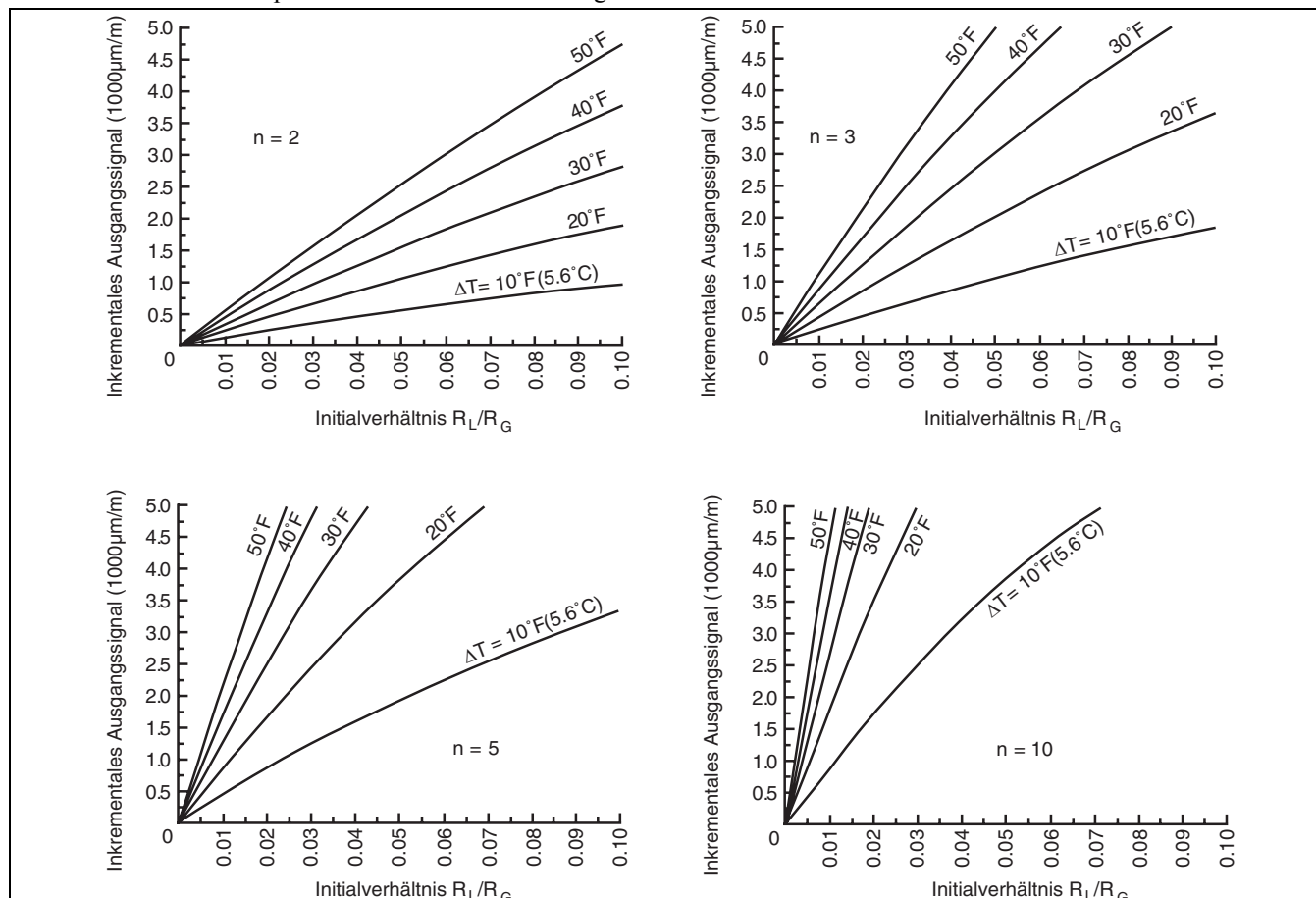


Abb. 4 - Inkrement des Ausgangssignals aufgrund thermisch bedingter Widerstandsänderungen der Messleitungen, wenn alle aktiven und Brückenergänzungs-DMS widerstandsgleich sind und bei K-Faktor 2000 eine Schaltungskalibrierung mit 1000µm/m parallel zum aktiven DMS stattgefunden hat. Das thermische Ausgangssignal der DMS selbst ist nicht beinhaltet.

TECH NOTE

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

Abb. 4 zeigt, dass die Größe des falschen Ausgangssignals mit der Temperatur und der Anzahl der parallelen Schaltungen dramatisch ansteigt. Diese Ausgangssignale sind im Wesentlichen unabhängig vom Dehnungspegel, dem die DMS unterliegen. Im Ergebnis kann der Verlust der Temperaturkompensation der Messleitungen zu sehr großen prozentualen Messfehlern führen (im Extremfall sogar zu falschen Dehnungsvorzeichen), wenn im Bereich typischer Arbeitsdehnungen, also z. B. im elastischen Bereich von Metallen, gemessen wird.

7.0 Abhilfemaßnahmen

Die bei Weitem beste Abhilfe für Probleme, die sich aus dem Einsatz des gemeinsamen Leiters ergeben, besteht darin, diese gar nicht zu benutzen. In Fällen jedoch, bei denen diese Alternative nicht zur Verfügung steht, können mit verschiedenen Maßnahmen die Schwierigkeiten minimiert werden. Wenn z. B. die Dehnungsmessbrücke bei Versuchstemperatur abgeglichen werden kann und vor der Messung keine weiteren Temperaturänderungen auftreten, werden sich natürlich keine Kabel-Temperaturfehler ergeben. Obwohl damit nur noch die relativ kleinen Fehler aus dem Übersprechen zwischen parallelen Schaltungen übrig bleiben, kann es immer noch ein Problem geben, wenn die initiale Brückenverstimmung über den Abgleichbereich des Instruments hinausgeht. Abhilfe dafür kann so aussehen, dass die instrumentenseitigen Anschlüsse der Brückenergänzungen an einem Punkt zusammengefasst werden und man in Serie zu diesem Punkt ein Festwiderstand zwischen die Punkte D und C (Abb. 1) einfügt. Sind alle Leiter widerstandsgleich, einschließlich dem gemeinsamen Leiter, wird für diesen Zweck ein Widerstand der Größe $R_L(n-1)/n$ die Initial-Brückenverstimmung auf Null zurücksetzen und Übersprechen reduzieren.

Die beste Abhilfe wäre sicher die, bei der die Initial-Brückenverstimmung eliminiert wäre und gleichzeitig die Temperaturkompensation auch und sogar unter variierenden Temperaturen erhalten bliebe. Das kann erreicht werden, indem ein gemeinsamer Leiter benutzt wird, dessen Widerstand sich um den Faktor $1/n$ vom Widerstand der individuellen Leiter unterscheidet. In Tabelle 1 beschreibt eine einfache Vorgehensweise zur Bestimmung der entsprechenden Standard-Leitermaße ein befriedigendes Schaltungsverhalten. Wählt man in dieser Weise den Widerstand des gemeinsamen Leiters aus, werden damit nicht nur die Probleme aus der Initialbrückenverstimmung und die der Kabel-Temperatureffekte gelöst, sondern auch die Kalibrier- und Übersprechfehler reduziert. Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass alle Probleme in umgekehrter Weise neu auftreten, wenn der Widerstand des gemeinsamen Leiters kleiner ist als $R_L \times 1/n$.

TABELLE 1

STANDARDMASSE FÜR DEN GEMEINSAMEN LEITER		
Zahl der Parallelen Schaltungen	Reduzierung der AWG*-Nummer	Durchmesser Verhältnis (Indiv. Leiter : gemeins. Leiter)
2	3 Schritte	1 : $\sqrt{2}$
3	5 Schritte	1 : $\sqrt{3}$
5	7 Schritte	1 : $\sqrt{5}$
10	10 Schritte	1 : $\sqrt{10}$

Die AWG-Nr. des gemeinsamen Leiters sollte im Vergleich zur der Nummer der individuellen Leiter um die oben angegebenen Schrittzahlen reduziert werden, um die Brückenverstimmung und den Verlust der Temperaturkompensation der Messleiter zu minimieren. Voraussetzung: Alle Leiter sind von gleicher Länge, und alle Brückenergänzungen und aktiven DMS sind widerstandsgleich.

ANMERKUNG: Diese Vorgehensweise zur Schaltungskompensation mittels Selektion der Leitermaße basiert auf Draht-Einzelleiter (keine Litze), für die ein gut definiertes Verhältnis zwischen AWG-Nr. und Leiterquerschnitt vorliegt. Da diese Leiter normalerweise eher auf Durchmesserstandards bezogen und nicht auf Widerstand, ist für sehr genaue Kompensationsarbeiten eine Messung des Widerstands erforderlich. Bei Litzen ist das Verhältnis von Standard-Leiterabmessung für Widerstand noch variabler; der Widerstand sollte also immer gemessen werden, um einen genauen Wert für das $1/n$ -Verhältnis zwischen dem gemeinsamen und den individuellen Leitern erstellen zu können. Um eine korrekte Temperaturkompensation der Leiter zu erhalten, kann zur Einstellung des benötigten Widerstands jedoch immer die Länge des gemeinsamen Leiters nach Erfordernis verändert werden.

*AWG bedeutet American Wire Gauge, ein Industriestandard für Kabel- bzw. Leiterdurchmesser. Siehe Vishay Micro-Measurements Katalog A-110 "DMS-Zubehör" unter "Drähte Kabel und Zubehör"

Eine weitere einfache Möglichkeit zur Reduzierung aller Brückenverstimnungen und Fehler wäre eine Reduzierung des Verhältnisses R_L/R_G . Das kann erreicht werden, indem man, wenn verfügbar, DMS mit höherem Widerstand einsetzt.

Die vielen geschilderten Probleme mit dem gemeinsamen Leiter zur Speisespannungszuführung können komplett ausgeschaltet werden, indem man Brückenergänzungsmodule (BCM - Bridge Completion Module) von Vishay Micro-Measurements einsetzt. In diesem Fall wird der Brückenergänzungswiderstand zum Ort des DMS verschoben und gemeinsame Leiter für alle parallelen Schaltungen zum positiven und negativen Kontakt der Speisespannungsquelle gezogen. Für die Wirksamkeit dieser Technik ist es wichtig, dass beide gemeinsame Leiter den gleichen Widerstand aufweisen und sie den gleichen Temperaturänderungen unterworfen sind. Das mindere Problem der K-Faktor-Desensibilisierung durch die Leitungswiderstände bleibt erhalten, kann jedoch mit einer Nebenschluss-Kalibrierung parallel zum aktiven DMS oder zur Brückenergänzung behoben werden.

Fehlerbetrachtung zu parallelen DMS-Schaltungen mit gemeinsamer Zuleitung

8.0 Zusammenfassung

Die Anwendung eines gemeinsamen Leiters für die Brückenspeisespannung kann bei Dehnungsmessungen mit DMS zu großen Fehlern führen, einhergehend mit Problemen auf der Instrumentenseite wie übermäßige initiale Brückenverstimmungen. Es erscheint daher sinnvoll, vom Einsatz solcher gemeinsamer Leiter ganz abzusehen, wenn eine wirkliche Notwendigkeit nicht gegeben ist. Werden aber DMS-Brückenschaltungen in Gruppen parallel betrieben, muss sich der Anwender der entstehenden Fehlergrößen bewusst sein, durch Auswahl entsprechend dimensionierter Kabelleiter die Fehler minimieren und - wann immer möglich - numerische Korrekturen der Messwerte einführen.