

EINSATZ VON ABTASTEINHEITEN ZUR VERMEIDUNG VON DURCH WÄRMEWIRKUNG VERURSACHTEN FEHLERN BEIMMESSEN MIT DEHNUNGSMESSSTREIFEN

VON MANFRED KREUZER, HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH, DARMSTADT

An Dehnungsmessstreifen (DMS) angelegte Speisespannungen verursachen Wärmewirkungen, die Signaländerungen und Messfehler erzeugen können. Diese Publikation zeigt die wichtigsten Ergebnisse zahlreicher Messungen, die ausgeführt wurden, um die Amplituden und Zeitkonstanten dieser Signaländerungen bei verschiedenen Dehnungsmessstreifen, Speisespannungen sowie Haft- und Konstruktionsmaterialien zu bestimmen. Im zweiten Teil der Veröffentlichung werden Methoden zur Vermeidung von Messfehlern infolge von Wärmewirkung erläutert, und es wird eine Abtasteinheit beschrieben, mit der Messungen fast unabhängig von Wärmewirkung, Spannungsabfällen an Messleitungen und Schaltelementen oder induzierten Fehlerspannungen ausgeführt werden können.

1. EINFÜHRUNG

Wenn zahlreiche Signale von Dehnungsmessstreifen gemessen werden sollen, werden dazu im Allgemeinen Abtasteinheiten verwendet. Diese Abtasteinheiten enthalten normalerweise nur eine zentrale Messverstärker- und Signalaufbereitungseinheit, die mit den einzelnen Dehnungsmessstreifen durch hochentwickelte Schaltkreise verbunden ist. Daraus resultieren Schwierigkeiten, da Fehler infolge von Spannungsabfällen, die durch Schalt- und Leitungswiderstände verursacht werden, vermieden werden müssen. Dies ist besonders schwierig, wenn Dehnungsmessstreifen in Halb- und Viertelbrückenschaltungen verwendet werden, da die Änderungen der gemessenen Widerstände extrem klein sind. Dieser Aufsatz zeigt, wie Schaltkreise auszulegen sind, damit Spannungsabfälle an den Messleitungen und Schaltelementen die Messwerte nicht verfälschen können. Da die individuellen Messstellen einzeln nacheinander geschaltet werden, liegt die Speisespannung nur während der Messung an den Dehnungsmessstreifen an. Darum erhöhen sich die Temperaturen der Dehnungsmessstreifen nur unbedeutend. Dies ist besonders wichtig, da Dehnungsmessstreifen an Kunststoff, Holz oder anderen Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit befestigt werden. Wärmewirkungen können jedoch nicht vollständig vernachlässigt werden, da die temperaturabhängigen Signale sich sehr schnell verändern, sobald die Dehnungsmessstreifen gespeist werden. Wenn also die Messzeit variiert, können die Messwerte ebenfalls bedeutend variieren. Es gibt viele Gründe, warum die Messzeit variieren kann. Hohe Abtastgeschwindigkeiten und eine hohe Signalaufösung können nicht gleichzeitig erreicht werden. Um bei Messungen mit Dehnungsmessstreifen stabile Werte mit einer hohen Auflösung zu erhalten, müssen die Signale der Dehnungsmessstreifen über eine ausgedehnte Zeitdauer, z. B. 100 ms, integriert werden. 100 ms entsprechen jedoch etwa dem 4-fachen Wert der Anwärmzeitkonstante eines mittelgroßen Dehnungsmessstreifens, der an einem Prüfbjekt aus Stahl appliziert ist.

Darum weichen die mit höheren Abtastgeschwindigkeiten ($> 40 \text{ s}^{-1}$) erfassten Messungen von den Messungen ab, die man erhält, wenn mit niedrigeren Abtastgeschwindigkeiten und ausgedehnten Integrationszeiten gearbeitet wird. Wenn also die Abtastgeschwindigkeiten gesenkt und die Integrationszeit erhöht wird, erhält man nicht nur eine höhere Auflösung sondern auch veränderte Messwerte, was ein negativer Begleitumstand ist. Die meisten Abtasteinheiten erlauben einen automatischen Nullabgleich. Es kann vorkommen, dass unmittelbar nach dem Nullabgleich erfasste Messwerte von Null abweichen, obwohl die Belastung nicht verändert wurde. Dies ist wahrscheinlich, wenn Nullabgleichsverfahren länger als die tatsächlichen Messungen dauern und wenn kleine Dehnungsmessstreifen mit hohen Brückenspeisespannungen gespeist werden. Diese Abweichungen können besonders groß ausfallen, wenn die Messstellen manuell gewählt und über eine längere Zeitdauer gespeist werden.

2. DURCH WÄRMEWIRKUNG INDUZIERTER SIGNALÄNDERUNGEN VON DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Wenn ein Dehnungsmessstreifen mit Hilfe einer Abtasteinheit gemessen werden soll, muss der Dehnungsmessstreifen zunächst mit einer Spannung gespeist werden. Wenn die Speisespannung an den Dehnungsmessstreifen angelegt wird, beginnt die Temperatur des Dehnungsmessstreifens zu steigen, bis der Fluss des Speisestroms durch die Aufnahme des Wärmeenergiestroms in den Prüfling und zu einem viel kleineren Teil in die Abgriffdrähte und die Außenluft ausgeglichen wird. Die Amplitude und die Zeitfunktion der Anwärmdauer hängen von verschiedenen Parametern ab. Zu diesen zählen Speisespannung, Größe und Widerstand des Dehnungsmessstreifens, Kleber und Dicke der Klebestelle, Material, und unter bestimmten Bedingungen auch die Masse des Prüflings. Dieser Aufsatz enthält nur Messergebnisse von an massiven Prüflingen aus ferritischem Stahl und Aluminium applizierten Dehnungsmessstreifen, bei denen der Temperaturanstieg aufgrund ihrer Masse vernachlässigt werden konnte.

Temperaturabhängige Änderungen des spezifischen Gitterwiderstands des Dehnungsmessstreifens

treten im applizierten DMS infolge der linearen Wärmedehnungskoeffizienten der Gitter- und Prüflingsmaterialien und des Temperaturkoeffizienten des spezifischen elektrischen Widerstands auf. Diese Widerstandsänderungen simulieren eine mechanische Dehnung im Prüfling. Der Temperaturkoeffizient α_a eines verwendeten Dehnungsmessstreifens kann anhand der Gleichung (1) berechnet werden:

$$\alpha_a = \alpha_s - (\alpha_g - \alpha_r/k) \quad \text{in } \text{m m}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad [1]$$

α_s = Wärmedehnungskoeffizient des Prüflings
 α_g = Wärmedehnungskoeffizient des Gittermaterials des Dehnungsmessstreifens (15 ppm mit Konstantan)
 α_r = Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstands des Gittermaterials des Dehnungsmessstreifens
 k = k-Faktor

Um den infolge von Temperaturänderungen angezeigten Dehnungswert so klein wie möglich zu halten, werden die Dehnungsmessstreifen während der Produktion auf einen bestimmten linearen Wärmedehnungskoeffizienten abgestimmt, beispielsweise für Stahl, Aluminium, Quarz oder Kunststoff. Dies geschieht durch Ändern des Temperaturkoeffizienten des spezifischen elektrischen Widerstands. Der daraus resultierende Temperaturkoeffizient des applizierten Dehnungsmessstreifens, den man nach Befestigung des abgestimmten Dehnungsmessstreifens am entsprechenden Messobjekt erhält, beträgt ungefähr Null ($\alpha_a = 0$).

In diesem Fall wird ausgehend von der Gleichung (1) die Dehnung des Prüflings, die durch die Temperaturänderung verursacht wird, in Bezug auf den angezeigten Dehnungswert des verwendeten Dehnungsmessstreifens kompensiert. Daraus resultiert die Gleichung (2):

$$\alpha_s = \alpha_g - \alpha_r/k \quad [2]$$

In Fällen, bei denen sich Dehnungsmessstreifen infolge der Speisespannung erwärmen, während die Temperatur der Prüflinge aufgrund ihrer guten Wärmeleitfähigkeit ungefähr konstant bleibt, bleibt die Länge der Prüflinge unverändert, während die Gitter der Dehnungsmessstreifen sich infolge der Erwärmung ausdehnen würden, wenn sie nicht an den Prüflingen befestigt wären. Aus diesem Grunde zeigen die Dehnungsmessstreifen eine negative Dehnung an. Dieser angezeigte Dehnungswert kann anhand der Gleichung (3) berechnet werden:

$$\epsilon_a = (\alpha_g - \alpha_r/k) * \Delta T \quad [3]$$

ΔT = Differenz zwischen der Temperatur des Dehnungsmessstreifengitters und der Temperatur des Prüflings

In Fällen, bei denen Dehnungsmessstreifen und Prüflinge thermisch abgestimmt sind, ergibt sich aus den Gleichungen (2) und (3) die Gleichung (4):

$$\epsilon_a = \alpha_s * \Delta T \quad [4]$$

Umgekehrt kann die Differenz ΔT zwischen der Temperatur des DMS-Gitters und der Temperatur des Prüflingsmaterials einfach berechnet werden, wenn die angezeigte Dehnung des applizierten Dehnungsmessstreifens gemessen werden kann und die Werte von α_g , α_r und k bekannt sind. Die Umstellung der Gleichung (3) ergibt Folgendes:

$$\Delta T = \epsilon_a / (\alpha_g - \alpha_r/k) \quad [5]$$

In Fällen, bei denen Dehnungsmessstreifen auf den Wärmedehnungskoeffizienten des Prüflings abgestimmt sind, kann die Differenz ΔT der Temperaturen durch Umstellen der Gleichung (4) noch einfacher berechnet werden:

$$\Delta T = \epsilon_a / \alpha_s \quad [6]$$

Die Gleichungen (3) und (4) enthalten interessante Informationen. Wenn die applizierten Dehnungsmessstreifen auf Materialien mit $\alpha_s = 0$ abgestimmt werden, würde die Wärmewirkung auch dann nicht zu einem angezeigten Dehnungswert führen, wenn der Wärmedehnungskoeffizient des Prüflings stark von Null abweicht. Abb. 1 zeigt den angezeigten Dehnungswert ε_a als Funktion der Zeit nach dem Einschalten der Speisespannung. Der Dehnungsmessstreifen ist eine Folie des Typs 3/120 LY11 (siehe auch Tabelle 1, Nr. 4...6), der auf einen Block aus ferritischem Stahl abgestimmt ist und an diesem appliziert ist. Die gemessenen Kurven passen gut in das erwartete exponentielle Verhalten.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a0} * (1 - \exp(-t/\tau)) \quad [7]$$

ε_{a0} = angezeigter Dehnungswert nach Stabilisierung der Erwärmung

τ = Zeitkonstante der gemessenen Kurve unmittelbar nach dem Einschalten der Speisespannung

Die theoretische Annäherung der gemessenen Kurven kann leicht verbessert werden, wenn zwei exponentielle Funktionen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten und unterschiedlichen Amplituden überlagert werden: Die Parameter werden in Gleichung (8) gezeigt:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{a0} * (0.8 * (1 - \exp(-6/7 * t/\tau)) + 0.2 * (1 - \exp(-3 * t/\tau))) \quad (8)$$

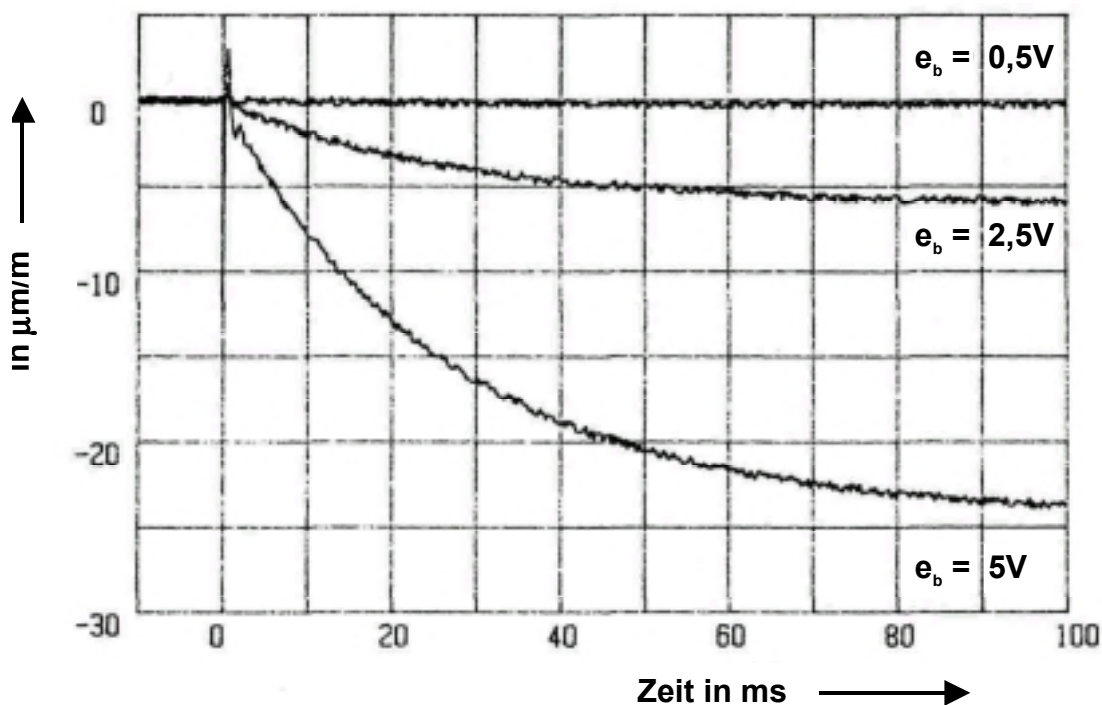


ABBILDUNG 1. Angezeigter Dehnungswert ε_a eines applizierten Dehnungsmessstreifens des Typs 3/120 LY11 nach dem Einschalten der Brückenspeisespannung

Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Ergebnissen mit verschiedenen Messparametern. Offensichtlich ist die Amplitude der angezeigten Dehnung proportional zum Quadrat der Brückenspeisespannung. Je kleiner der aktive Gitterbereich, desto größer die durch Wärme induzierte angezeigte Dehnung und desto kürzer die Zeitkonstanten. Die Zeitkonstante der Anwärmdauer hängt auch vom Kleber, der Dicke der Klebestelle und dem Material des Prüflings ab. Der Heißkleber EP25 hat eine bessere Wärmeleitfähigkeit als die Kaltkleber Z70 und X60. Aus diesem Grunde sind die Zeitkonstanten der Messungen Nr. 7 bis 12 besonders kurz, und die angezeigten Dehnungswerte sind ziemlich klein. Bei Z70, einem Einkomponentenkleber, sind dünnere Klebestellen als mit X60 möglich. Aus diesem Grunde zeigen die Messungen mit Z270 kürzere Zeitkonstanten und kleinere Amplituden der angezeigten Dehnung als die Messungen mit X60, einem Zweikomponentenkleber. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Ergebnisse auch in starkem Maße davon abhängen, wie sorgfältig die DMS-Applikation ausgeführt wurde. Die in Tabelle 1 gezeigten Werte sind Durchschnittsmessergebnisse verschiedener Dehnungsmessstreifen, die mit Sorgfalt aufgebracht wurden. Die Wärmeleitfähigkeit des Prüflings beeinflusst ebenfalls die Wärmewirkung. Dies wird deutlich, wenn Messung Nr. 7 mit Messung Nr. 10 verglichen wird. Die Temperaturdifferenz ΔT steigt auf 1,4 K, wenn die Dehnungsmessstreifen

mit EP250 an Stahlprüflinge geklebt wurden, verglichen mit nur 1,1 K, wenn sie unter den gleichen Bedingungen an Aluminiumprüflingen hafteten. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass

TABELLE 1. DIE ABHÄNGIGKEIT VON DER ANWÄRMWIRKUNG UNTER VERSCHIEDENEN VERSUCHSBEDINGUNGEN

Nr.	Versuchsbedingungen					Versuchsergebnisse				
	Dehnungsmessstreifen Typ	Gitter- länge (mm)	Prüf- stück- material	Kleber	ϵ_{σ} [$\frac{V}{m}$] <small>rms = quadratischer Mittelwert</small>	ϵ_{a0} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ΔT [K]	τ [ms]	Ausregelzeit [ms]	
									<10 $\mu\text{m}/\text{m}$	<1 $\mu\text{m}/\text{m}$
1	3/120 LY 11 abgestimmt auf Stahl mit = $11 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ [6,1 ppm/°F]	3	Stahl St 37	X60	5	-35	3,2	30	35	150
2					2,5	-9	0,8	0	75	
3					0,5	<-1	0,03	0	0	
4				Z70	5	-25	2,2	20	15	60
5					2,5	-6	0,5	0	35	
6					0,5	<-1	0,02	0	0	
7				EP250	5	-15	1,4	15	5	40
8					2,5	-4	0,35	0	20	
9					0,5	<-1	<0,02	0	0	
10	3/120 LY 13 abgestimmt auf Aluminium mit = $23 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ [12,7 ppm/°F]	3	Al	EP250	5	-26	1,1	12	10	40
11					2,5	-6,5	0,3	0	25	
12					0,5	<-1	<0,02	0	0	
13	7/120 KY 10 Dehnungsmessstreifen- kette abgestimmt auf Stahl mit $11 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ [6,1 ppm/°F]	0,6	St37	Z70	5 ¹⁾	-160	14,5	8	25	100 ²⁾
14					2,5 ¹⁾	-40	3,6	12	30	
15					0,5	-1,5	0,15	0	3	
16	10/120 LY 11 abgestimmt auf Stahl mit = $11 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ [6,1 ppm/°F]	10	St37	Z70	5	-3	0,25	50	0	50
17					2,5	<-1	0,06	0	0	
18					0,5	=0	<0,01	0	0	

1) $\epsilon_{\sigma} = 1,5V$ ist zulässig

2) Infolge von Kriechwirkung wegen Überhitzung

sich der direkt unter dem Dehnungsmessstreifengitter befindliche Bereich des Stahlprüflings um etwa 0,4 K erwärmt hat, während sich der Bereich des Aluminiumprüflings nur bis 0,1 K erwärmt haben kann, was auf die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium zurückzuführen ist, die viermal größer als die von Stahl ist.

Alle Messergebnisse zeigen überraschend kurze Zeitkonstanten. Es kann ausgesagt werden, dass der Restfehler 100 ms nach der Speisung der Dehnungsmessstreifen in fast jedem Fall geringer als 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ ist. Wenn die Brücke mit 0,5 V gespeist wird, liegen die durch die Wärmewirkung erzeugten angezeigten Dehnungswerte bei fast 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ oder weit darunter.

3. WÄRMWIRKUNG UND GEGENMASSNAHMEN

Obwohl die Wärmewirkung in etwa 100 ms abklingt, kann sie nicht ignoriert werden, wenn die Messrate auf zehn oder sogar auf mehrere hundert Messungen pro Sekunde steigt. Ein Messung, die unmittelbar nach dem Einschalten der Speisespannung vorgenommen wird, kann von kontinuierlich ausgeführten Messungen bis zu

angezeigten Dehnungswerten von ϵ_{a0} (siehe Tabelle 1) abweichen. Deshalb können unmittelbar nach dem Nullabgleich vorgenommene schnelle Messungen bedeutend vom Nullpunkt abweichen, wenn der Nullabgleich der Messstellen manuell oder durch ein langes automatisches Abgleichverfahren ausgeführt wird. Wenn eine Gruppe von Dehnungsmessstreifen an denselben Kompensations-DMS angeschlossen sind, können die Messungen der verschiedenen Messstellen voneinander abweichen, obwohl sie kurz zuvor in einem fehlerfreien kurzen Messkreis auf Null abgeglichen worden sind und in der Zwischenzeit keine mechanische Belastung erfolgt ist. Grund für diese Abweichungen kann der Anwärm-Einflusseffekt des KompensationsDMS sein. Wenn dem ersten Dehnungsmessstreifen der Gruppe die Speisespannung zugeschaltet wird, wird dem Blind-DMS oder Kompensations-DMS ebenfalls zum ersten Mal die Speisespannung zugeschaltet, und er zeigt darum ungefähr denselben Anwärm-Einflusseffekt wie der gemessene Dehnungsmessstreifen, wohingegen der Anwärm-

Einflusseffekt des Kompensations-DMS während der nachfolgenden Messungen abklingt. Aus diesem Grunde kann es sein, dass die Anwärmwirkung des zuerst geschalteten Dehnungsmessstreifens in der Gruppe fast keine angezeigte Dehnung bewirkt, wohingegen die anderen Dehnungsmessstreifen zunehmend größere Amplituden der angezeigten Dehnungswerte aufweisen.

Was kann also getan werden, um auf diese Wärmewirkung zurückzuführende Messfehler zu vermeiden? Verschiedene Methoden können angewandt werden. Es kann schon genügen, einen der folgenden Hinweise zu befolgen. Hier sind einige Vorschläge:

Verwenden Sie Dehnungsmessstreifen mit den Temperaturkoeffizienten $\alpha_a = 0$, und versuchen Sie mit Hilfe eines unbelasteten Kompensations-DMS, der sich dicht neben der normalen Gruppe von Dehnungsmessstreifen befindet, einen Temperaturabgleich herzustellen.

Verwenden Sie einen separaten Kompensations-DMS für jeden gemessenen Dehnungsmessstreifen.

Wählen Sie Brückenspeisespannungen von $\leq 0,5$ V.

Verzögern Sie jede Messung um etwa ≈ 50 ms, bis die Wärmewirkung abgeklungen ist.

Führen Sie in regelmäßigen Zeitabständen einen Nullabgleich und Messungen aus.

Wenn eine Messstelle kontinuierlich angezeigt werden soll, sollte die Speisespannung gepulst werden.

Speisen Sie die Dehnungsmessstreifen mit Trägerfrequenzen, um die thermoelektrischen Spannungen zu unterdrücken, die durch Wärmewirkung erzeugt werden.

Abb. 2 zeigt eine Abtasteinheit des Typs UPM60, die über alle oben erwähnten Funktionen verfügt. Die Dehnungsmessstreifen können bei einer Trägerfrequenz von 225 Hz mit Brückenspeisespannungen von 5 oder 0,5 V gespeist werden. Messungen können mit Geschwindigkeiten von bis zu 100 Messstellen pro Sekunde ausgeführt werden, und die Nullabgleichzeit entspricht immer der Messzeit. Wenn die Messstellen manuell gewählt werden, speist die UPM60 die Dehnungsmessstreifen nur für eine Dauer von 40 ms je 500 ms Intervallzeit, um das Aufwärmen zu reduzieren.

4. UNIVERSSELL EINSETZBARE VIELSTELLENMESSGERÄTE

Neben dem Anwärm-Einflusseffekt existieren beim Messen mit Dehnungsmessstreifen zahlreiche weitere Fehlerquellen, insbesondere dann, wenn in Viertelbrückenschaltungen gemessen werden muss. Die größten Fehlerquellen sind wahrscheinlich Spannungsabfälle an den Messleitungen und Schaltelementen, da die Signale von Dehnungsmessstreifen sehr

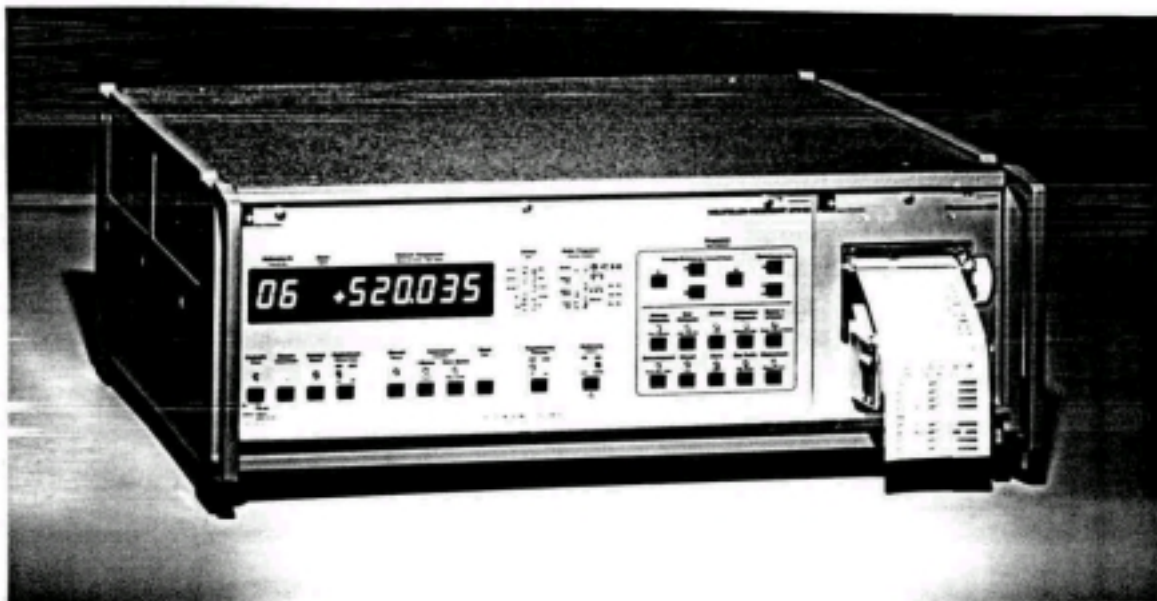


ABBILDUNG 3. Abtasteinheit, die mit Gleichstrom- und Trägerfrequenzverstärkern ausgestattet ist, um höchste Präzision mit verschiedenen Aufnehmertypen zu gewährleisten.

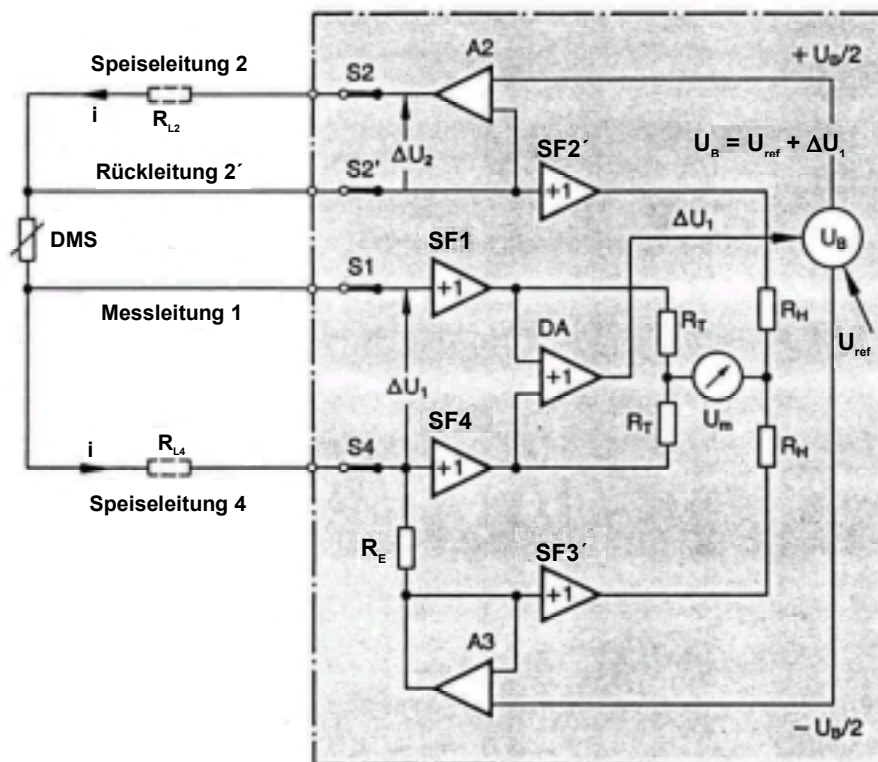


ABBILDUNG 3. Die neue Brückenschaltung reduziert Nullabgleichs- und Empfindlichkeitsfehler durch interne Rückleitungen, die Spannungsabfälle an den Leitungen und Schaltern korrigieren.

schwach sind und Spannungsabfälle die Messsignale von Dehnungsmessstreifen mit 100 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ übersteigen können. Das UPM 60 verwendet eine patentierte, hochentwickelte Zwischenschaltung [2]. Fehler infolge von Spannungsabfällen werden fast völlig vermieden. Abb. 3 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild der Brückenschaltung des UPM 60.

Rückführtechniken ermöglichen den Einsatz zuverlässiger Halbleiterschalter (FET), obwohl diese im Vergleich mit mechanischen Kontakten höhere Einschaltwiderstände haben. Dieser Schaltkreis ermöglicht das Anschließen von Dehnungsmessstreifen in Viertelbrückenschaltungen, die 500 - 1000 m vom UPM 60 entfernt sein können.

Natürlich kann das UPM 60 mehr als nur Messungen mit Dehnungsmessstreifen in Viertelbrückenschaltungen ausführen. Es besitzt Wahlmodule zum Anschließen von Dehnungsmessstreifen in Viertel-, Halb- und Vollbrücken, induktive Aufnehmer als Wegaufnehmer, Thermoelemente, Pt100-Widerstandsthermometer, RTD und Spannungs- und Stromquellen. Um diesen Anforderungen zu genügen, ist das UPM 60 mit drei verschiedenen Verstärkertypen ausgerüstet:

ein Gleichstromverstärker, der hauptsächlich zum Messen von Thermoelementen und Spannungs- oder Stromquellen oder Hochgeschwindigkeitsmessungen mit Dehnungsmessstreifen vorgesehen ist,

ein Trägerfrequenzverstärker (225 Hz) für Präzisionsmessungen mit Dehnungsmessstreifen und RTD, ein Trägerfrequenzverstärker (5 kHz) zum Messen von induktiven Aufnehmern.

Das UPM 60 ermöglicht den Anschluss von und Messungen mit bis zu 60 Messstellen mit verschiedenen Aufnehmern und erfüllt damit moderne Prüfanforderungen der gleichzeitigen Messung von Belastungen, Kräften, Wegen und Temperaturen.

Das UPM 60 bietet zahlreiche Datenverarbeitungsfunktionen und die Standardschnittstellen RS232-C und IEEE 488, wodurch Fernsteuerung und zusätzliche Online-Datenverarbeitung mit Hilfe eines externen Computers möglich sind.

LITERATURHINWEISE

1. Hoffmann K.: Ursachen temperaturabhängiger Nullpunkts- und Empfindlichkeitsänderungen bei Dehnungsmessstreifen-Aufnehmern. VDI-Berichte Nr.137,1970

2. Kreuzer M. : Comparing the effect of lead and switch resistances on voltage- and current-fed strain-gage circuits. Reports in Applied Measurements Band .1 (1985) Nr. 1