

## Laborpraktikum

# Messtechnik und Messtechnik/Sensorik

## Versuch

# Sensorankopplung

## S2

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| 1. Versuchsziel .....  | 3  |
| 2. Grundlagen .....  | 3  |
| 2.1 Dehnungsmessstreifen .....                                     | 3  |
| 2.2 Verformungskörper mit konstanter Oberflächendehnung .....      | 5  |
| 2.3 Handhabung von Dehnungsmessstreifen mit Applikationshilfe..... | 6  |
| 3. Versuchsanordnung .....   | 7  |
| 3.1 Biegebalken mit konstantem Spannungsverlauf .....              | 7  |
| 3.2 6-Leiterschaltung .....  | 9  |
| 4. Kontrollfragen .....  | 11 |
| 5. Aufgabenstellung .....  | 11 |
| Literatur .....  | 12 |

Betreuer: **Dr.-Ing. Frank Eichelbaum**  
Stand vom 20.09.2019

## 1. Versuchsziel

Der Versuch dient zum Kennenlernen der Messschaltungen für Dehnungsmessstreifen sowie der Eigenschaften von Metallfoliendehnungsmessstreifen. Das betrifft besonders die Aspekte der elektrischen Ankopplung der Dehnungsmessstreifen (DMS) und der Technologie des Aufbringens der DMS auf das Messobjekt.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (Folien-DMS) sind Messmittel zur Erfassung von mechanischen Spannungen und Dehnung an Bauteilen und haben unter allen anderen Verfahren der Spannungs- und Dehnungsmessung die größte praktische Bedeutung erlangt. Unter dem Begriff der Dehnung bzw. Stauchung versteht man allgemein die vorzeichenabhängige relative Längenänderung.

Treten beispielsweise an einem mechanischen Bauteil infolge äußerer oder innerer Kraftwirkungen Gestaltänderungen auf, so gehen diese mit Verzerrungen (Dehnungen) seiner Oberfläche einher. Ein an dieser Oberfläche befestigter Dehnungsmessstreifen folgt nun den ihm vom Messobjekt aufgezwungenen Dehnungen und verändert dabei seinen elektrischen Widerstand. Die Widerstandsänderung ist ein Maß für die auftretende Dehnung. Die Anwendung und der Einsatz von Dehnungsmessstreifen ist zur Messung solcher Größen angebracht, die sich auf eine Dehnung bzw. Stauchung abbilden lassen. Dehnungsmessstreifen bieten somit die Möglichkeit, mechanische nichtelektrische Größen in eine elektrische Größe zu wandeln und diese der elektrischen Signalverarbeitung zugänglich zu machen. Beispiele derartiger Größen sind die Kraft, das Drehmoment, der Druck, die Beschleunigung und der Weg.

Der Messbereich ist u.a. vom jeweiligen Typ des Dehnungsmessstreifens, dem verwendeten Klebstoff sowie der Temperatur abhängig. Er liegt bei Folien-Dehnungsmessstreifen aus Metall bei  $\pm (1..3) \%$ .

**Achtung!** Im Rahmen der Versuchsdurchführung darf eine **maximale Dehnung von  $\pm 1,5 \%$**  in keinem Fall überschritten werden!

Für die relative Widerstandsänderung gilt die allgemeine Beziehung

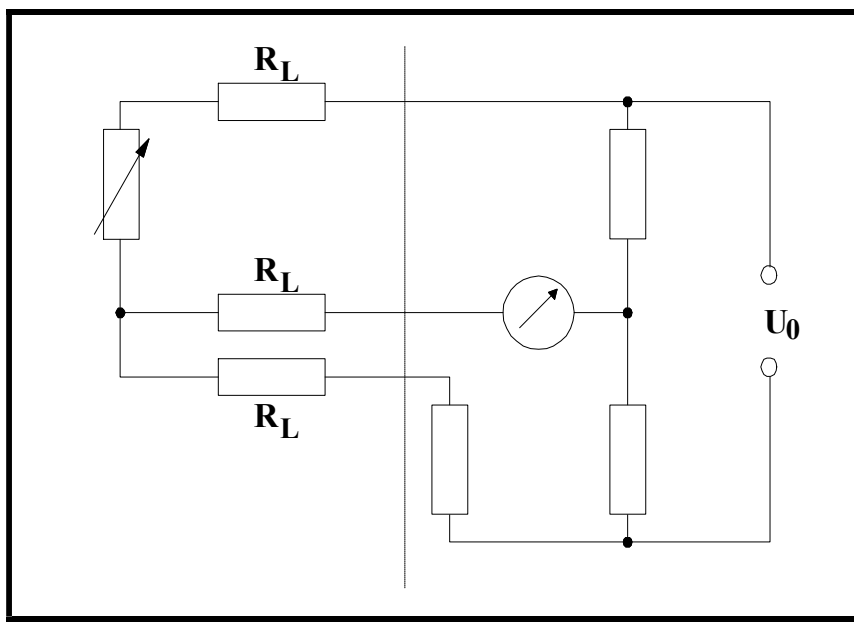
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

Der k-Faktor ist insbesondere vom Typ des Dehnungsmessstreifens abhängig. Er liegt für Metalldehnungsmessstreifen auf der Basis von Konstantan ideal bei 2 bzw. für andere Metall-DMS zwischen 1,5 bis 7. Bei Dehnungsmessstreifen aus Konstantan liegt die Proportionalitätsgrenze je nach Vorbehandlung zwischen  $\pm(1 \text{ bis } 3) \text{ mm/m}$ . Charakteristisch für die Dehnungsmessstreifen ist, dass sie aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen eine integrale Spannungsverteilung an der Oberfläche des Bauteils wiedergeben, von dem die mechanischen Spannungen ermittelt werden sollen. Je kleiner mechanische Spannungsverteilungen nachgewiesen werden müssen, umso kleiner müssen auch die geometrischen Abmessungen der zu verwendenden Dehnungsmessstreifen sein. mit dieser Reduktion ist meist auch eine Verringerung des k-Faktors und der damit zusammenhängenden Messempfindlichkeit verbunden. Aus der Kenntnis der Bauteilgeometrie bezüglich der auf der Oberfläche befestigten DMS und der durch sie erfassten Dehnung, kann aus spannungsanalytischen Betrachtungen auf kritische mechanische Spannungszustände im Bauteil geschlossen werden. Kurze Messgitter der Dehnungsmessstreifen (0,4 bis 3) mm werden benötigt, wenn Kerbspannungen zu ermitteln sind oder wenn im Bereich von Spannungsgradienten gemessen werden soll.

Dehnungsmessstreifen werden im allgemeinen in einer Halb- oder Vollbrückenschaltung betrieben, seltener in einer Viertelbrückenschaltung. Hohe Empfindlichkeit, eine linearisierende Wirkung sowie eine geringere Temperaturempfindlichkeit sind die wesentlichen Vorteile gegensinnig arbeitender Dehnungsmessstreifen. Bei mehreren Messstellen ist bei geeigneter Verschaltung auch eine Mittelwertbildung möglich.

Die Brückenspeisung ist so zu dimensionieren, dass die Dehnungsmessstreifen nicht thermisch überlastet werden. Bezogen auf die Messgitterfläche des Dehnungsmessstreifens kann für Folie-DMS eine thermische Belastung von ca.  $4 \text{ W/cm}^2$  als orientierender Maximalwert bei Raumtemperaturen angesehen werden. Diese Werte beziehen sich auf großflächige Metallobjekte, auf denen die Dehnungsmessstreifen befestigt sind.

Unterliegt bei Verwendung einer Viertelbrückenschaltung die Zuleitung großen Temperaturschwankungen und damit großen Widerstandsänderungen, dann wird in der Regel die 3-Leiterschaltung eingesetzt. Das **Bild 1** zeigt diese in der Anwendung als Viertelmessbrückenschaltung für einen Dehnungsmessstreifen.



**Bild 1:** Verschaltung eines Dehnungsmessstreifens in einer Wheatstoneschen Messbrücke in 3-Leiterschaltung.

Von besonderer Bedeutung für die Messunsicherheit ist die Ausführung der Klebestelle und die Art des verwendeten Klebstoffes. Des Weiteren werden besondere Anforderungen an die zu beklebende Oberfläche gestellt. Sie muss bei Metallteilen blank und feingeschliffen sein. Auf ihr anhaftende Fettschichten sind mit einem geeigneten Lösungsmittel (z.B. Aceton) zu entfernen. Als Klebstoffe werden folgende Typen empfohlen:

- Z 70 Kalthärtender Einkomponenten- Schnellklebstoff, bis  $120^\circ\text{C}$  anwendbar; erfordert glatte Klebeflächen.
- X 60 Kalthärtender Zweikomponenten- Schnellklebstoff, bis  $80^\circ\text{C}$  anwendbar.
- EP 250/ Heißhärtende Zweikomponenten- Klebstoffe, bis  $250^\circ\text{C}$  bzw.
- EP 310  $310^\circ\text{C}$  anwendbar.

## 2.2. Verformungskörper mit konstanter Oberflächendehnung

Zur Kalibrierung von Dehnungsmessstreifen sind Versuchsanordnungen erforderlich, mit denen die Dehnungsmessstreifen mit einer konstanten Dehnung oder Stauchung belastet werden können. Ziel derartiger Experimente ist es, die messtechnischen Eigenschaften der Dehnungsmessstreifen wie k-Faktor, Messdynamik u.a. sowie deren Befestigung auf dem Messobjekt nachzuweisen. Zu diesem Zweck ist ein Verformungskörper erforderlich, der entlang seiner Oberfläche eine konstante Dehnung besitzt, um eine gleichmäßige Belastung der Dehnungsmessstreifen entlang ihrer Messgitter zu gewährleisten. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei Lösungsmöglichkeiten.

Die eine geht davon aus, dass auf den Biegebalken ein Biegemoment einwirkt. Unter Einbeziehung des Hookeschen Gesetzes  $\sigma = \varepsilon \cdot E$  ( $\sigma$  - mechanische Spannung und  $E$  - Elastizitätsmodul, Youngscher Modul) ergibt sich der allgemeine Zusammenhang

$$\frac{M_B}{W} = \varepsilon \cdot E, \quad (2)$$

wobei in dieser Gleichung  $M_B$  das Biegemoment und  $W$  das Widerstandsmoment ist.

Da eine unveränderliche Geometrie mit konstantem Querschnitt des Biegebalkens ( $W = \text{konstant}$ ) gegeben ist, wenn verformungsbedingte Gestaltänderungen bei diesen Betrachtungen unberücksichtigt bleiben, der Elastizitätsmodul  $E$  eine Materialkonstante und ein konstantes Moment  $M_B$  eingeleitet wird, resultiert daraus eine mit

$$\varepsilon = \frac{M_B}{E \cdot W}, \quad (3)$$

konstante Dehnung bzw. Stauchung entlang des Biegebalkens.

Eine zweite Lösungsmöglichkeit geht von einem einseitig eingespannten Biegebalken aus, der in einem Abstand  $l_e$  (**Bild 3**) vom Einspannort mit einer Kraft  $F$  belastet wird. Die dadurch auftretende Ortsabhängigkeit der mechanischen Spannungen kann durch eine ortsabhängige Gestaltänderung im Widerstandsmoment  $W(x)$  und auf Grund des gegenläufigen Verhaltens des Biegemoments  $M_B = -F \cdot (l - x)$  aufgehoben werden, so dass eine ortsunabhängige Spannungs- bzw. Dehnungsverteilung entsteht. Die Verwendung eines rechteckigen Querschnitts erlaubt es, die kompensierende Wirkung über eine ortsabhängige Änderung der Breite  $b$  oder der Dicke  $h$  des Biegebalkens zu erreichen, wenn von der Gleichung des Widerstandsmoments

$$W(x) = \frac{b(x) \cdot h^2(x)}{6} \quad (4)$$

ausgegangen wird. Setzt man diesen allgemeinen Zusammenhang der Gl. (4) in die Gl. (3) ein und berücksichtigt das Biegemoment (negatives Schnittufer), so erhält man die Gleichung

$$\varepsilon(x) = -\frac{6 \cdot F \cdot (l - x)}{E \cdot b(x) \cdot h^2(x)}. \quad (5)$$

Fertigungstechnisch ist es nicht sinnvoll, die zur Kompensation der Ortsabhängigkeit des Biegemoments erforderlichen ortsabhängigen Querschnitt des Biegebalkens über deren Breite  $b(x)$  und dessen Dicke  $h(x)$  oder nur über dessen Dicke  $h(x)$  auszuführen. Im Fall der Nutzung der Biegebalkendicke  $h(x)$  zur ortsabhängigen Querschnittsänderung hat diese einen wurzelförmigen Verlauf, der mit vertretbaren Kosten als Biegebalken mit konstantem Biegespannungsverlauf nicht gefertigt werden kann.

Der ortsabhängige Verlauf der Biegebalkenbreite  $b(x)$  von der Einspannstelle  $x=0$  zum Kraftangriffsort  $x=l$  in Form eines gleichschenkligen Dreiecks bietet hier eine kostengünstige Alternative.

Dieser Verlauf kann mit

$$b(x) = b_0 \cdot (1 - m \cdot x) \quad (6)$$

beschrieben werden, wobei  $b_0$  die Breite des Biegebalkens am Ort der Einspannung ist. Berücksichtigt man diese Gl. (6) nun in der Gl. (5) und verwendet man einen Biegebalken gleicher Dicke  $h$  ( $h(x)=h$ ), der praktisch aus einem Federblech hergestellt wird, so ergibt sich für die ortsabhängige Dehnung bzw. Stauchung der Zusammenhang

$$\varepsilon(x) = -\frac{6 \cdot F \cdot l}{E \cdot b_0 \cdot h^2} \cdot \frac{1 - \frac{1}{l} \cdot x}{1 - m \cdot x} \quad (7)$$

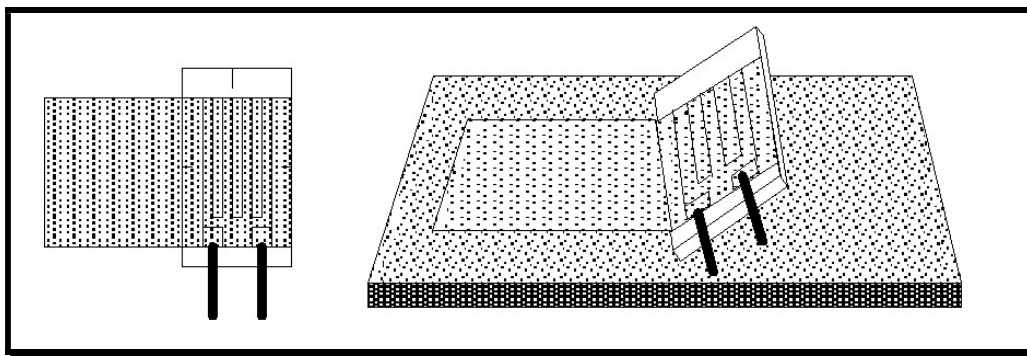
Soll die Dehnung einen konstanten Betrag haben, muss der Anstieg der Biegebalkenbreite den Ausdruck  $m = \frac{1}{l}$  annehmen. Auf diese Weise ergibt sich für den im **Bild 3** dargestellten Winkel der Geometrieänderung  $\alpha$  aus geometrischen Überlegungen der Zusammenhang

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \frac{b_0}{2 \cdot l}, \quad (8)$$

so dass sich hier eine ortsunabhängige Oberflächendehnung  $\varepsilon$  ergibt. Es kann damit allgemein gezeigt werden, dass sich jedem Verhältnis von  $b_0$  und  $l$  ein gleichschenkliges Dreieck mit dem Winkel  $\alpha$  zuweisen lässt, das auf der Oberfläche eine ortsunabhängige konstante Dehnung bzw. Stauchung besitzt. Das Messgitter eines auf seiner Oberfläche aufgebrachtene Dehnungsmessstreifens wird an jedem Ort mit der gleichen Dehnung beaufschlagt.

### 2.3. Handhabung von Dehnungsmessstreifen mit Applikationshilfe

Das Klebeband, mit dem die Dehnungsmessstreifen (DMS) auf der Verpackungsfolie befestigt sind, dient als Fixierhilfe beim Befestigen des DMS auf dem Messobjekt. Die DMS werden vom Werk gebrauchsfertig ausgeliefert und bedürfen keiner besonderen Vorbereitung. Eine zusätzliche Reinigung der DMS vor der Applikation ist nicht notwendig.



**Bild 2:** Applikation von Metallfolien-Dehnungsmessstreifen.

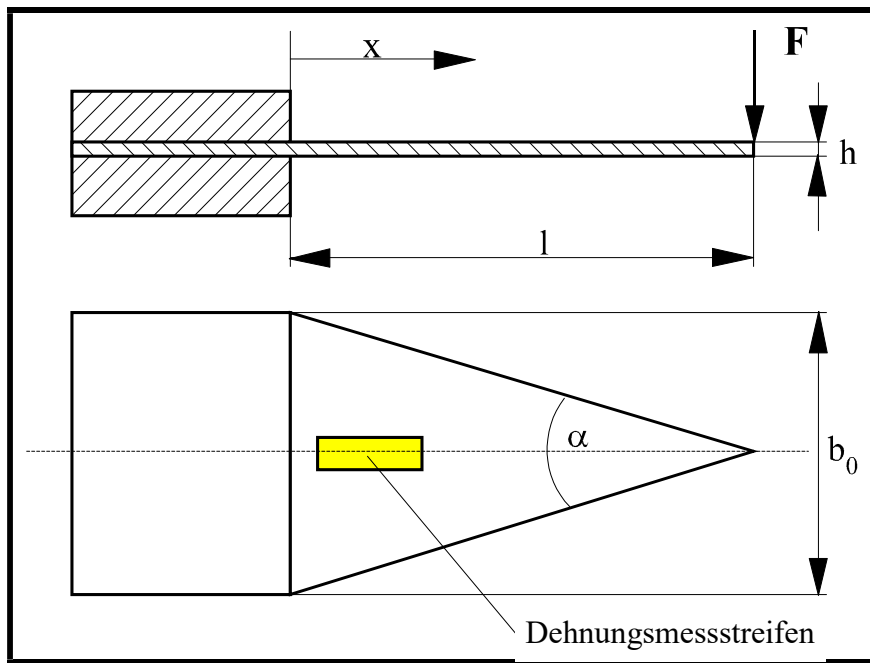
1. Das Klebeband ist mit einer Schere so aufzutrennen, dass entweder links oder rechts vom DMS ein ca. 10 mm langes Stück übersteht. Auf der anderen Seite ist es möglichst nah an der DMS-Kante aufzutrennen (**Bild 2**, linkes Bild).
2. Klebeband und DMS vorsichtig mit einer Pinzette von der Folie lösen (Pinzette nur am Klebeband ansetzen).

3. DMS auf der vorher markierten Messstelle genau ausrichten und Klebeband so andrücken, dass eine scharnierartige Verbindung entsteht (**Bild 2**, rechtes Bild).
4. Klebstoff auf zu beklebende Oberfläche auftragen.
5. DMS mittels übergelegter Teflon Folie mit dem Daumen andrücken.

### 3. Versuchsanordnung

#### 3.1 Biegebalken mit konstantem Spannungsverlauf

Die Messgröße Dehnung wird mit Hilfe von einseitig eingespannten Biegebalken (**Bild 3**) erzeugt. Der in Form eines Dreiecks ausgeführte Verformungskörper hat den Vorteil, dass die an der Oberfläche Dehnung zwischen der Einspannstelle und dem Ort der Krafteinleitung konstant ist. Die Ortsabhängigkeit des Dehnungsmessstreifens zur Erzielung einer hohen Messempfindlichkeit ist dadurch nicht mehr vorhanden, als wenn ein Verformungskörper mit rechteckiger Oberfläche Verwendung findet.



**Bild 3:** Belastungseinrichtung Vermessung von Dehnungsmessstreifen.

Am Versuchsplatz befinden sich 3 derartige Verformungskörper, die mit einer entsprechenden Belastungseinrichtung versehen sind. Die Belastung erfolgt auf der Basis einer am Kraftangriffspunkt eingeleiteten Verformung, die über ein Gewinde mit der Steigung von 1,0 mm/Umdrehung erzeugt wird. Die verformende Kraftwirkung kann anhand der Federkraft aus  $\vec{F} = -c \cdot \vec{s}_a$  ermittelt werden. Betrachtet man die Belastungsvorrichtung (**Bild 3**), so kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Krafteinleitung  $F$  senkrecht zur Biegebalkenoberfläche erfolgt. Das Biegemoment kann damit als  $M_B = -F \cdot (l - x)$  beschrieben werden. Die Gleichung (7) besitzt damit Gültigkeit. Mit der Gestalt des Biegebalkens, der eine konstante Dicke  $h$  besitzt und die Form des Biegebalkens einem gleichschenkligen Dreieck genügt, ergibt sich die Gleichung der ortsunabhängigen Dehnung bzw. Stauchung

$$\varepsilon = -\frac{6 \cdot l \cdot F}{E \cdot b_0 \cdot h^2} \quad (8)$$

Berücksichtigt man nun noch die durch die Verformung  $s_a$  erzeugte Kraftwirkung  $F$ , so geht die Gl. (8) in

$$\varepsilon(s_a) = -\frac{6 \cdot l \cdot c}{E \cdot b_0 \cdot h^2} \cdot s_a \quad (9)$$

über, wobei  $c$  die Federkonstante der Belastungseinrichtung und  $s_a$  die durch die Schraube erzeugte Durchbiegung ist, so dass ein funktioneller Zusammenhang zwischen der Dehnung und der Auslenkung am Kraftangriffsort  $s_a$  besteht. Die zur Berechnung der Dehnung nun noch notwendige Federkonstante wird über die Verformungsarbeit ermittelt. Die damit verbundene Verformung der elastischen Linie beschreibt die Eulersche Gleichung

$$\frac{\frac{d^2 s_a}{dx^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{ds_a}{dx}\right)^2}} = -\frac{M_z(x)}{E \cdot I(x)} \quad (10)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ist in dieser Form nur noch mit numerischen Verfahren möglich. Praktisch kann man in vielen der Anwendungsfällen in guter Näherung davon ausgehen, dass der Tangens des Winkels der verformten elastischen Linie sehr viel kleiner als 1 ist. Durch die Quadrierung verkleinert sich der Wert nochmals, so dass die in der Wurzel stehende Summe in guter Näherung mit dem Wert 1 angenähert werden kann. Die Eulersche Gleichung der elastischen Linie geht damit in den vereinfachten und lösungsfreundlicheren Ausdruck

$$\frac{d^2 s_a}{dx^2} = -\frac{M_z(x)}{E \cdot I(x)} \quad (11)$$

über. Das ortsabhängige Flächenträgheitsmoment  $I(x)$  mit

$$I(x) = \frac{b_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{l} \cdot x\right) \cdot h^3}{12} \quad (12)$$

und die Berücksichtigung des Schnittmoments  $M_z(x) = -F \cdot l \cdot \left(1 - \frac{1}{l} \cdot x\right)$  führt schließlich zu der gewöhnlichen Differentialgleichung 2. Ordnung

$$\frac{d^2 s_a}{dx^2} = \frac{12 \cdot l}{E \cdot b_0 \cdot h^3} \cdot F \quad (13)$$

Die zweifache Integration nach  $dx$  und die Berücksichtigung der Randbedingungen, dass die Tangente in der Einspannung  $s'_a = 0$  und die Verformung an dieser Stelle  $s_a = 0$  ist, führt für die Verformung der elastischen Linie an der Stelle der Krafteinleitung  $l$  zu dem Ergebnis

$$s_a(F) = \frac{6 \cdot l^3}{E \cdot b_0 \cdot h^3} \cdot F \quad (14)$$

Diese Gleichung besteht nur noch aus geometrischen Größen und dem Elastizitätsmodul ( $E=2,2 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup> für Stahl). Aus der Gl. (14) kann nach der Umformung die gesuchte Federkonstante der Belastungseinrichtung mit

$$c = \frac{E \cdot b_0 \cdot h^3}{6 \cdot l^3} \quad (15)$$



ermittelt werden. Mit der Gl. (15) kann jetzt die Federkonstante  $c$  der Gl. (9) substituiert werden und für die durch die Bewegung der Schraube eingeleitete Dehnung der Oberfläche gilt schließlich der Zusammenhang

$$\varepsilon(s_a) = -\frac{h}{l^2} \cdot s_a. \quad (16)$$

Charakteristisch für diese Gl. (16) ist, dass in die Dehnung  $\varepsilon$  nur noch die Dicke des Biegebalkens  $h$  und der Abstand zwischen der Einspannstelle und der Krafteinleitung  $l$  als geometrische Größen eingehen. Die anderen Größen, die in der Gl. (9) und der Gl. (14) noch vorhanden sind, können durch diese Art der Belastungseinrichtung eliminiert werden, wodurch einer Verringerung des Fehlers bei der Dehnungseinstellung erreicht wird.

Gemäß der Vorbetrachtungen ist diese Belastungseinrichtung (**Bild 3**) dazu geeignet, die messtechnischen Eigenschaften von Dehnungsmessstreifen zu untersuchen. Besonders von Interesse ist dabei der  $k$ -Faktor. Unter Einbeziehung der Gl. (1) und der mit der Belastungseinrichtung erzeugten Dehnung (Gl. (16)) ergibt sich als Bestimmungsgleichung für den  $k$ -Faktor der Ausdruck

$$k = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{l_e^2}{h \cdot s_a}. \quad (17)$$

Fertigungsbedingt ist die Belastungseinrichtung mit nicht erfassbaren Anteilen systematischer Fehler beaufschlagt, die sich im Wesentlichen aus Abweichungen von dem der Berechnung zugrunde liegenden gleichschenkligen Dreieck als Verformungskörper ergeben.

### ***Versuchsteil Klebetechnologie***

Der DMS ist entsprechend der Klebevorschrift auf den Biegebalken (3) aufzukleben. Zur Auswertung wird der DMS-Messverstärker verwendet. Vor der Messung ist der Verstärker (Kanal 3) laut Bedienungsanleitung abzugleichen.

### ***Versuchsteil 2-, 3-Leiterschaltung***

Dieser Versuchsteil wird mit dem Biegebalken (2), dem Messverstärker (Kanal 2) und der Temperaturregeleinrichtung durchgeführt. Durch Umschaltung kann ohne Veränderung des Abgleichs die 2- oder 3-Leiterschaltung betrieben werden. Es ist jeweils eine Messung ohne Dehnung und bei maximaler Dehnung vorzunehmen.

## **3.2. 6-Leiterschaltung**

In Wägezellen verwendet man aus Gründen der Präzision und der Empfindlichkeit unter anderem einen Biegebalken mit Gegenmoment.

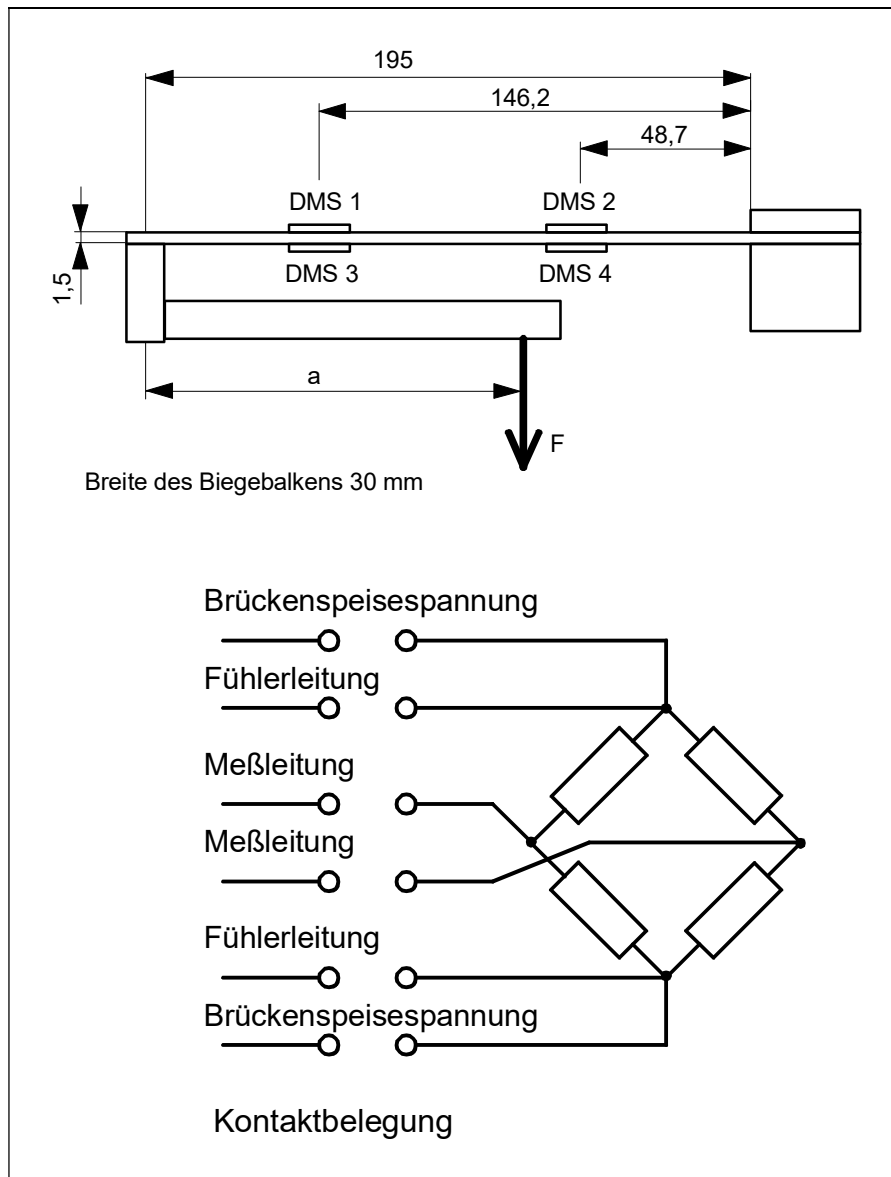


Bild 4: Biegebalken mit Gegenmoment und Kontaktschema der Dehnungsmessstreifen

Durch Belastung des Biegebalkens entsteht ein entsprechendes Gegenmoment, welches den Balken an seinem freien Ende entgegen der Belastungsrichtung verformt. Dadurch treten an der oberen und unteren Grenzschicht sowohl Zug- als auch Druckspannungen auf. Bei entsprechender Applizierung der Dehnungsmessstreifen kann somit eine Vollbrückenschaltung in 6-Leiterschaltung zur Anwendung kommen und damit die Messempfindlichkeit erhöht werden. Voraussetzung dafür ist die richtige Größe des Gegenmomentes. Die Verbindungsstelle des freien Endes des Biegebalkens mit dem darunterliegenden Hebelarm, als auch der Hebelarm selber sind als biegesteif anzusehen.

#### 4. Kontrollfragen

- Wie wird der Temperaturkoeffizient des k-Faktors üblicherweise angegeben?
- Wie lässt sich der Temperaturkoeffizient des k-Faktors schaltungstechnisch korrigieren?
- Berechnen Sie den Zusammenhang zwischen Diagonalspannung und Dehnung bei Viertel-, Halb- und Vollbrückenschaltung.
- Welche Vorteile haben Halb- und Vollbrückenschaltungen gegenüber der Viertelbrückenschaltung?
- Welche Voraussetzungen sind für die Wirksamkeit der 3-Leiterschaltung erforderlich?
- Berechnen Sie den Einfluss der Widerstände der Zuleitungen bei der 2- und 3-Leiterschaltung auf die Brückendiagonalspannung.
- Vergleichen Sie 2- und 3-Leiterschaltung hinsichtlich der Stabilität des Nullpunktes.
- Was versteht man unter dem Kriechen von DMS und wodurch wird das Kriechen begünstigt?
- Nennen Sie Anwendungsgebiete für DMS.
- Welche Vorteile ergeben sich durch den Einsatz einer 6-Leiterschaltung (Bild 4)?
- Berechnen Sie den Einfluss der Leitungswiderstände bei der 4-Leiterschaltung.
- Was versteht man unter Querempfindlichkeit?

#### 5. Aufgabenstellung

1. Berechnen Sie die Dehnung bei einer Durchbiegung von  $s_a = 5$  mm. Hierzu ist die zur Berechnung erforderliche Geometrie des Verformungskörpers zu vermessen.
2. Klebetechnologie
  - 2.1 Kleben Sie einen Folien-DMS auf den Biegebalken.
  - 2.2 Nehmen Sie die Kennlinie des von Ihnen aufgeklebten Dehnungsmessstreifen in Abhängigkeit von der an der Versuchsanordnung (**Bild 3**) eingestellten Durchbiegung im Intervall  $(0,0 \leq s_a \leq 8,0)$  mm in Schritten von 1 mm und der gemessenen Brückenspannung auf. Stellen Sie die gemessenen Kennlinie graphisch dar.
  - 2.3 Bestimmen Sie die Reproduzierbarkeit der Versuchsanordnung (**Bild 3**) anhand des Vertrauensbereichs der gemessenen Messbrückenspannungen mit einer statistischen Sicherheit von 95% (Anzahl der Messungen 11 bei 5 mm Durchbiegung). Ermitteln Sie den Gesamtfehler der gemessenen Dehnung ( $k = 2,04 \pm 1\%$ ;  $U_0 = 5V \pm 0,5\%$ ).
  - 2.4 Vergleichen Sie die berechnete mit der gemessenen Dehnung für die Durchbiegung von  $s_a = 5$  mm.
3. 2-Leiterschaltung/3-Leiterschaltung
 

Untersuchen Sie die Eigenschaften von 2- und 3-Leiterschaltungen, bezüglich der Nullpunktstabilität und des Einflusses auf die Steilheit der Messbrücke.

  - 3.1 Messen Sie jeweils in 2- und 3-Leiterschaltung die Brückendiagonalspannung bei einer Durchbiegung im Intervall  $(0,0 \leq s_a \leq 8,0)$  mm in Schritten von 1 mm bei jeweils zwei Temperaturstufen.
  - 3.2 Interpretieren Sie ihr Messergebnis.

4. Verschalten Sie die Vollbrücke (Bild 4) einmal in 6-Leiterschaltung und einmal in 4-Leiterschaltung. Zur Simulation der Leitungswiderstände werden niederohmige Widerstände zur Verfügung gestellt.
- 4.1 Messen Sie die Brückendiagonalspannung für beide Varianten bei drei verschiedenen Belastungen.
- 4.2 Stellen Sie die Ergebnisse in einem gemeinsamen Diagramm dar und diskutieren Sie die Ergebnisse.

## Literatur

- Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen. – 9. aktual. Aufl., Carl Hanser Verlag; München, Wien; 2007.
- Lerch, R.: Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren. - 7. aktual. Aufl., Springer Vieweg Verlag; Berlin, Heidelberg; 2016.
- Profos, P.; Pfeifer, T.: Handbuch der industriellen Messtechnik. - R. Oldenbourg Verlag; München, Wien, 1992.
- Giesecke, P.: Dehnungsmessstreifentechnik: Grundlagen und Anwendung in der industriellen Messtechnik. – Vieweg Verlag; Braunschweig, Wiesbaden, 1994.
- Keil, S.: Dehnungsmessstreifen. – 2. neubearb. Aufl., Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2017
- Hauptmann, P.: Sensoren-Prinzipien und Anwendungen. - Carl Hanser Verlag; München, Wien; 1991.
- Schaumburg, H.: Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik. - Teil 3: Sensoren; B.G. Teubner; Stuttgart; 1992.
- Winkler, J.; Aurich, H.: Technische Mechanik, 6. Verb. Aufl., Fachbuchverlag Leipzig, 1991.
- Böge, A.; Böge, W.: Technische Mechanik: Statik – Reibung – Dynamik – Festigkeitslehre – Fluidmechanik. 32., überarb. und erw. Aufl., Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2017