Einführung in die Dehnungsmessstreifen-Technik

PDF Auszug von https://www.me-systeme.de/de/support/grundlagen/dms-grundlagen

Stand: 21.01.18, kb-straingage-3

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf

Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69

Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

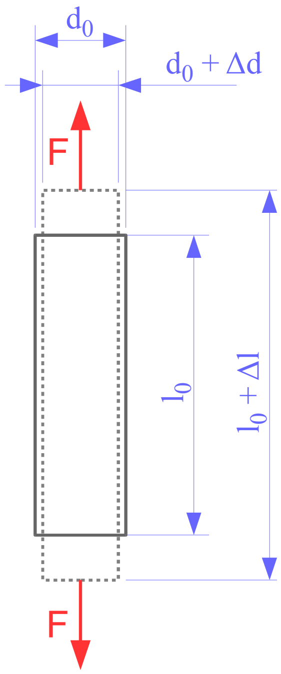
Inhaltsverzeichnis

Definition und Einheit der Dehnung....3
Hooksches Gesetz....4
Spannungs-Dehnungs-Diagramm....4
Materialkennwerte....5
Hinweise....5
Funktion und Aufbau des DMS....6
DMS-Materialien....6
DMS-Techniken....6
DMS-Effekte....6
Definition des k-Faktors....7
Widerstandsmessung....7
Beispiel zur Widerstandsmessung....7
Wheatstonesche Brückenschaltung....8
Vorteile der Brückenschaltung....8
Dreileiter-Anschlusstechnik....9
Vorteile der Dreileiterschaltung:....9
Kompensationstechniken im Sensorbau....10
Brückenschaltungen mit Dehnungsmessstreifen....12
Online Kalkulator zur Brückenschaltung....12
Viertelbrücke....12
Halbbrücke, 2x Längsdehnung....13
Halbbrücke, 1x Längsdehnung, 1x Querdehnung....13
Vollbrücke, 4x Längsdehnung....13
Vollbrücke, 2x Längsdehnung, 2x Querdehnung....14
Vollbrücke, 2x Längsdehnung, 2x Querdehnung....14
Kalibrierung von Messverstärkern mit Analogausgang....15
Spannungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen....16
Einachsiger Spannungszustand....16
Zweiachsiger Spannungszustand....17
Literatur....18

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Definition und Einheit der Dehnung

Die Dehnung ist ein Maß für die relative Längenänderung .
Unter "relativer Längenänderung" versteht man die Zu oder Abnahme der Länge Δl bezogen auf die ursprüngliche Länge l_0:
Das Formelzeichen für die Dehnung ist ε.



Das Formelzeichen für die Dehnung ist ε.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Die Einheit der Dehnung ist m/m
Typische Schreibweisen für die Dehnung sind:
10^{-3} m/m = 1000 µm/m = 1 ‰ = 0,1 % = 1000 microstrain (1000 µε)

Hooksches Gesetz

Die elastische Verformung ε ist proportional zur einwirkenden mechanischen Spannung σ (Kraft pro Querschnittsfläche).

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Im eindimensionalen Fall wird die Proportionalitätskonstante zwischen Spannung und Dehnung Elastizitätsmodul E genannt. Isotrope Werkstoffe werden durch E-Modul und Querkontraktionszahl beschrieben.
Elastizitätsmodul E [N/mm²]

mechanische Spannung σ = F/A: [N/mm²] (Kraft F pro Querschnittsfläche A)

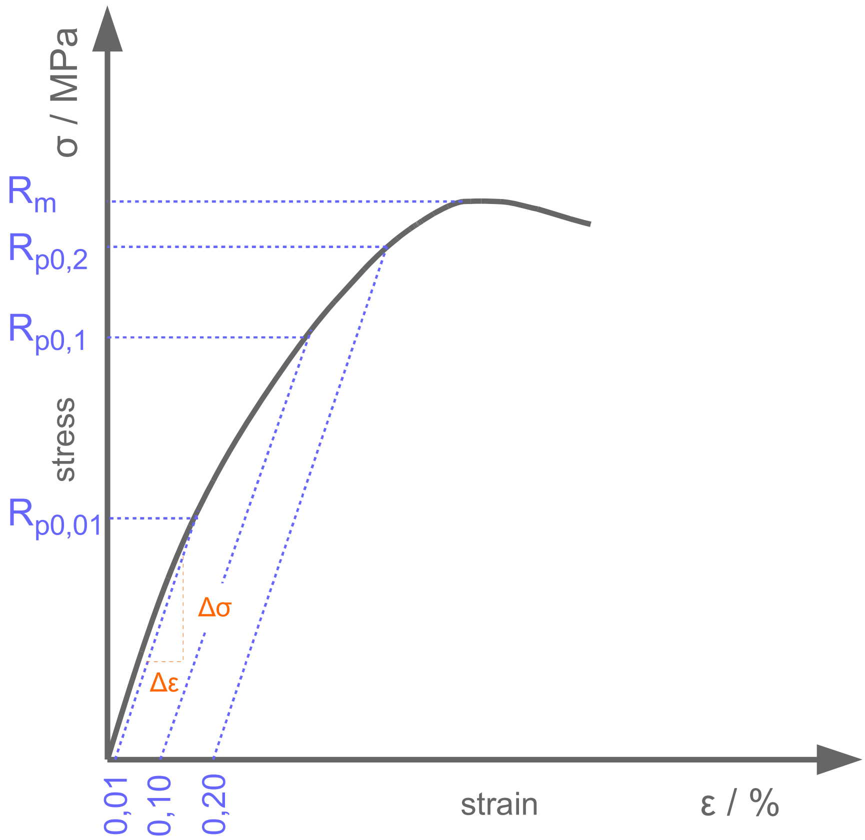
Typische. Schreibweisen: 1 N/mm^2 = 1 MPa (1 Mega Pascal) = 10^6 N/m^2

Typische Werte für den E-Modul:
Stahl: 200000 N/mm^2
Aluminium: 73000 N/mm^2
Leiterplatte FR4: ca. 40000 N/mm^2

Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Im Zugversuch werden charakteristische Eigenschaften von Materialien ermittelt.

Im linear elastischen Bereich gilt das Hooksche Gesetz.



ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Materialkennwerte

Dehngrenze $R_{p0,2}$: („Ersatzstreckgrenze") nach der Entlastung bleibt eine Dehnung von 0,2%.

technische Elastizitätsgrenze $R_{p0,01}$: nach der Entlastung bleibt eine Dehnung von 0,01% (100µm/m)

Streckgrenze R_e: diejenige Spannung, bei der der Werkstoff keine plastische Verformung zeigt.
Zugfestigkeit R_m: die maximal erreichbare Zugspannung
Typ. Werte für R_m:
AlZnMgCu1.5: 450 N/mm²
S355: 355 N/mm²
S275; 275 N/mm²
C45; 490 N/mm²
PH17-4, 1.4542: 1300 N/mm²

Hinweise

- Unterschied zwischen mechanisch bedingter Dehnung und thermisch bedingter Dehnung;
- Längenausdehnungskoeffizient von Kupfer: 16,8 µm/m/K, Stahl: 12 µm/m/K, AL:23 µm/m/K
- Messbereich eines Präzisions-Sensors: ±1000µm/m = 1000 ppm = 1‰
- Querkontraktionszahl ν für Metalle: ca. 0,3;

Funktion und Aufbau des DMS

- Am häufigsten angewendeter DMS: Metall-Folien-DMS
- Effekt: Widerstandsänderung einer metallischen Leiterbahn
- Aufbau: mäanderförmige Leiterbahnen auf einer Trägerfolie
- Grundwiderstand R: 120 Ohm, <u>350 Ohm</u>, 1000 Ohm, 5000 Ohm

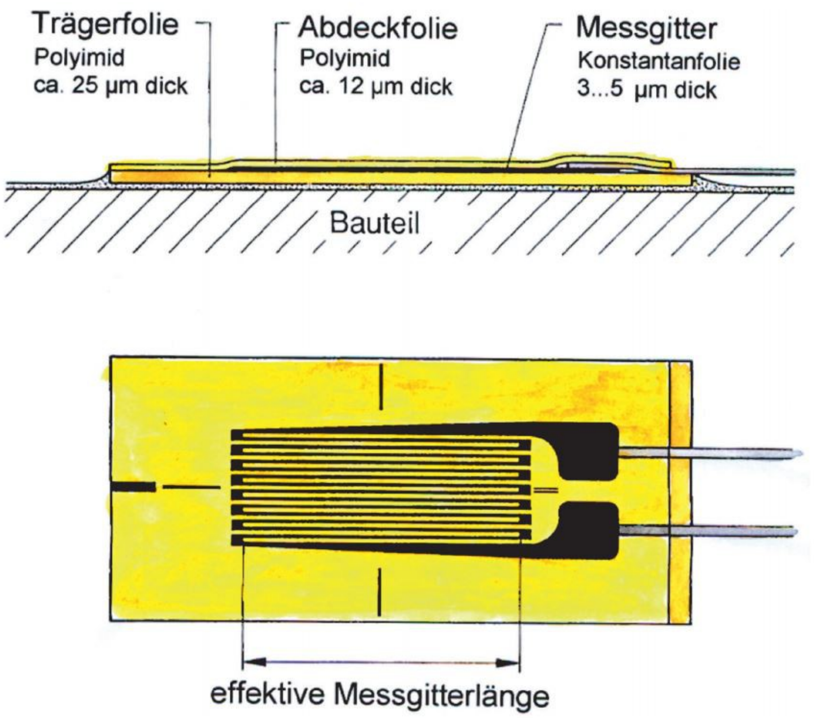


Abbildung 1: Aufbau eines DMS [1]

DMS-Materialien

- Messgitter aus Konstantan-Legierung (Metallfolien-DMS)
- Messgitter aus Karma-Legierung (Metallfolien-DMS)
- Halbleiter-DMS (Silizium-DMS)
- Trägermaterialien: Polyimid

DMS-Techniken

- Folien-DMS
- Dünnfilm-DMS
- Dickschicht-DMS

DMS-Effekte

Thomson-Effekt:

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon \cdot (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

- ε: Dehnung;
- ν: Querkontraktionszahl (Wertebereich 0,0...0,5),
- ρ: Spezifischer Widerstand;

Die Widerstandsänderung setzt sich zusammen aus einem geometrisch bedingten Anteil infolge der Querkontraktion und einem Materialanteil infolge einer Änderung des spezifischen Widerstands.

Definition des k-Faktors

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon$$

Der k-Faktor bestimmt den Zusammenhang zwischen Dehnung und Widerstandsänderung. Bei Legierungen mit einer vorwiegend geometrisch bedingten Widerstandsänderung (bei einer Querkontraktionszahl n =0,5) ergibt sich ein k-Faktor von k = 2,0.

Widerstandsmessung

Beispiel zur Widerstandsmessung

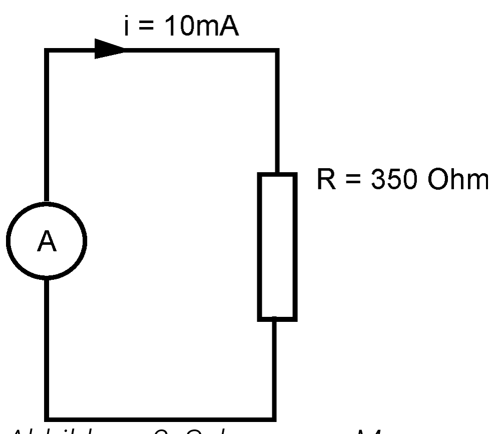


Abbildung 2: Schema zur Messung des Widerstands mit eingeprägtem Strom

Frage:

wieviele Stellen benötigt das Multimeter, um die Widerstandsänderung eines DMS mit einem k-Faktor von 2 bei einer Dehnung von 1‰ mit mindestens 100 Anzeigeschritten aufzulösen? Antwort: Die Spannung am Widerstand R bei 10 mA Strom ist 3,500 V,

Die Änderung des Widerstandes (und damit der Spannung) ist ΔR/R = k ε = 2‰ = 3,5 * 2/1000 = 7 mV. Das Multimeter müsste (im Messbereich 4 Volt !) 0,007/100 = 10^{-5} Volt = 001 mV auflösen.

Wheatstonesche Brückenschaltung

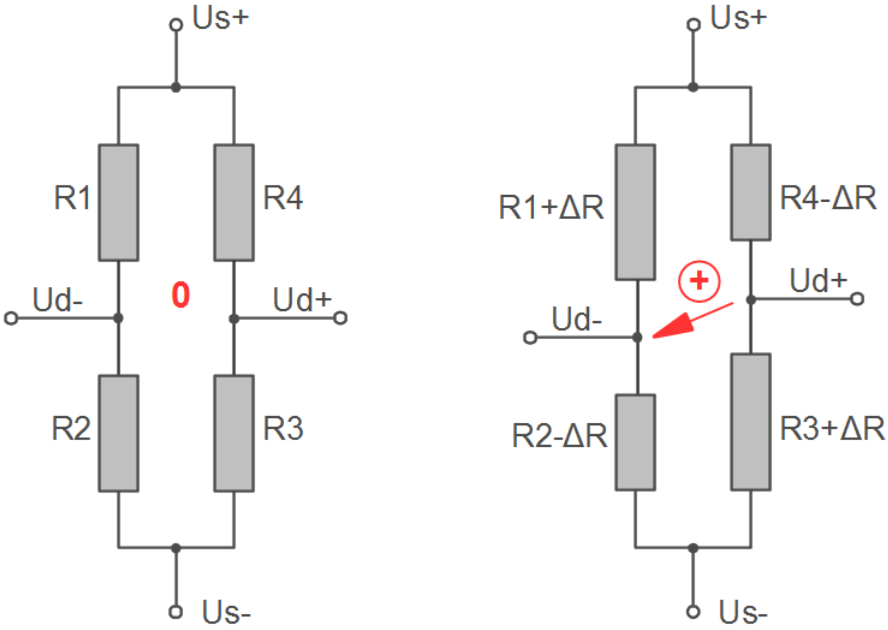


Abbildung 3: Wheatstone'sche Brückenschaltung

Die Differenzspannung $U_d = U_{d+} - U_{d-}$ ist 0, wenn alle Widerstände gleich sind (R1 = R2 = R3 = R4) oder wenn R1/R2 = R4/R3

Die Differenzspannung U_d wird maximal, wenn sich die Widerstände R1 und R3 entgegengesetzt ändern zu R2 und R4.

https://www.me-systeme.de/de/support/grundlagen/dms-grundlagen/grundlagen-zur-brueckenschaltung
https://www.me-systeme.de/inhalte/grundlagen/wheatstone-bruecke.pdf

Für die Brückenverstimmung Ud/Us gilt folgender Zusammenhang:

$$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right)$$

Für die Viertelbrücke gilt:

$$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} \; k \cdot \epsilon$$

Frage:

Welche Brückenverstimmung in mV/V erhält man mit einer Viertelbrücke bei 1000µm/m Dehnung bei einem DMS mit k-Faktor 2?

Antwort: U_d/U_s = 1/4 2 1000 10^{-6} m/m = 500 10^{-6} m/m = 500 10^{-6} V/V = 0,5 mV/V

Vorteile der Brückenschaltung

Die Brückenschaltung

- erlaubt eine hohe Verstärkung, da das Ausgangssignal 0,0 Volt im abgeglichenen

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Zustand beträgt,

- kompensiert temperaturbedingte Dehnung, wenn eine Vollbrücke oder eine Halbbrücke mit zwei aktiven DMS in benachbarten Brückenzweigen eingesetzt wird,
- erlaubt selektive Dehnungsmessung und damit die Kompensation von unerwünschten Querdehnungen.

Hinweise:

Ergänzungsschaltung, Spannungsanalyse, Dreileitertechnik

Ergänzungswiderstände, Kompensationsmaßnahmen, Selbstkompensation

Dreileiter-Anschlusstechnik

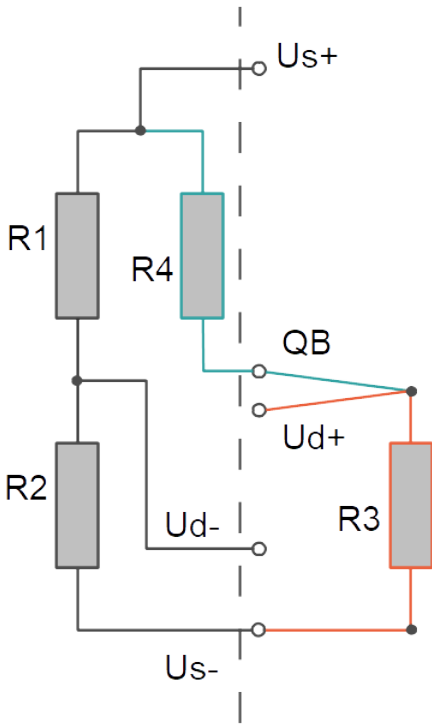


Abbildung 4: 3-Leiter Schaltung mit aktiven Dehnungsmessstreifen an R3

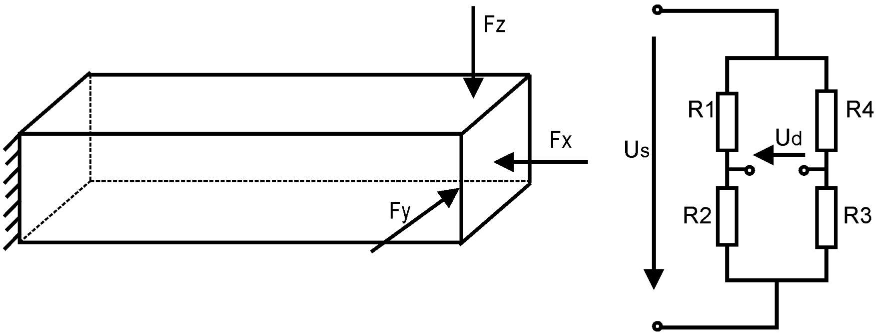
Vorteile der Dreileiterschaltung:

- Die Rückleitung vom DMS wird zu gleichen Teilen auf zwei benachbarte Brückenarme geschaltet.
- Die temperaturbedingte Widerstandsänderung der Anschlussleitung wird kompensiert.

Kompensationstechniken im Sensorbau

https://www.me-systeme.de/de/support/grundlagen/dms-grundlagen/verdrahtungsplaene

https://www.me-systeme.de/inhalte/grundlagen/kb-festigkeitslehre.pdf



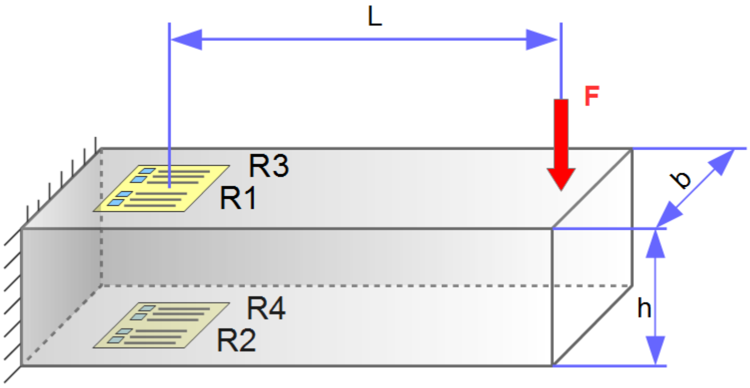


Abbildung 5: Biegebalken mit R1 und R3 auf der Zugfaserm R2 und R4 auf der Druckfaser. R2 gegenüber R1 zur Kompensation von Fy.

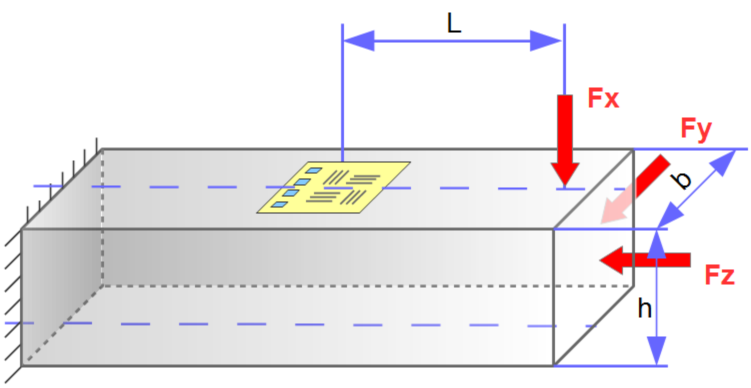


Abbildung 6: Biegebalken mit DMS-Vollbrücke auf einer Applikationsfläche. Unterschiedliche Messbereiche in Fx, Fy und Fz aufgrund unterschiedlicher Steifigkeiten. Anordnung der Gitter in der neutralen Faser für Biegung um x-Achse durch Fy.

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

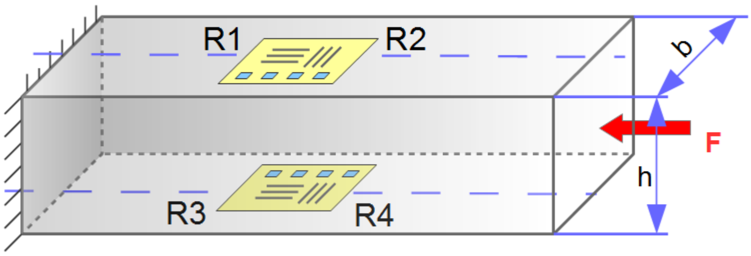


Abbildung 7: Zug- / Druckstab mit Längs- und Quergitter.

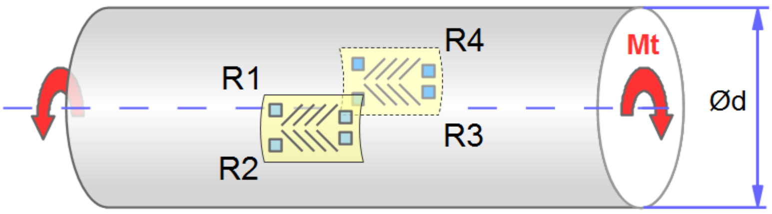


Abbildung 8: Torsionswelle mit Anordnung der Messgitter in 45° zur Längsrichtung

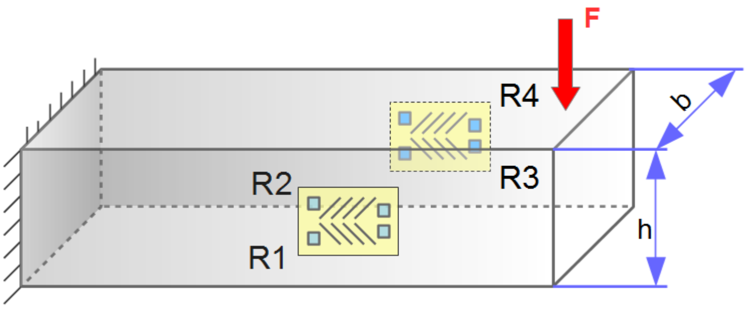


Abbildung 9: Messung der Schubspannung aufgrund der Querkraft Fz in der neutralen Faser bezüglich der Biegung um y-Achse.

Frage:
1. Biegebalken, Kompensation von Fx und Fy. 2 Applikationsflächen

2. Biegebalken, Kompensation von Fy, 1 Applikationsfläche
3. Normalkraftsensor, Kompensation von Fy und Fz
Hinweis:
weitere Kompensationstechniken: E-Modul-Kompensation, Nullpunkt-Abgleich, Nullpunktdrift-Abgleich;

Brückenschaltungen mit Dehnungsmessstreifen

https://www.me-systeme.de/de/support/grundlagen/dms-grundlagen/dms-brueckenschaltung

Die Wheatstonesche Brückenschaltung ist die bevorzugte Schaltung zur Messung von Widerständen. Sie kann eingesetzt werden zur absoluten Bestimmung eines Widerstandes oder zur Bestimmung einer Widerstands*änderung*.
Letzteres wird im Zusammenhang mit Dehnungsmessstreifen angewandt.

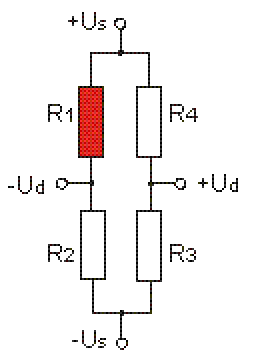
Die Vorteile der Brückenschaltung sind:

- Bei einer abgeglichenen Brückenschaltung ist die Ausgangsspannung 0 Volt. Die Verstärkung kann sehr hoch gewählt werden, um eine feine Auflösung zu erzielen.
- Die Symmetrie der Brückenschaltung wird ausgenutzt,um die thermische Dehnung elektrisch zu kompensieren,
- Die Symmetrie der Brückenschaltung wird ausgenutzt, um unerwünschte mechanische Dehnungen quer zur Messrichtung elektrisch zu kompensieren

Online Kalkulator zur Brückenschaltung

Hier finden Sie einen Online Kalkulator zur Berechnung der Dehnung aus der gemessenen elektrischen Brückenverstimmung U_d/U_s
https://www.me-systeme.de/de/support/kalkulator/dehnung

Viertelbrücke

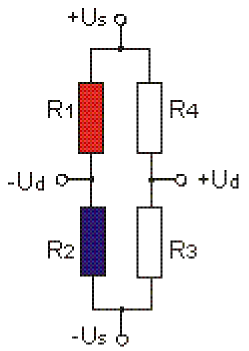
 	Us: Brückenspeisung Ud: Brückenausgang e: Dehnung k: k-Faktor (ca. 2,0) $U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1)$ $U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1)$ Mit einem k-Faktor k=2,0 gilt: **2000 µm/m entsprechen 1 mV/V**

Dies ist die meistgebrauchte Schaltung in der Spannungsanalyse.
Der aktive DMS (1) wird durch drei passive Widerstände (2,3,4) zur Vollbrücke ergänzt.

Die Nichtlinearität dieser Schaltung ist für kleine Dehnungen im Bereich bis 1000 µm/m vernachlässigbar.
Bei sehr hohen Dehnungen bis in den Bereich der plastischen Verformung kann der Fehler durch Nichtlinearität 2% und mehr betragen.

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Halbbrücke, 2x Längsdehnung



Us: Brückenspeisung
Ud: Brückenausgang
e: Dehnung
k: k-Faktor (ca. 2,0)

$U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2)$

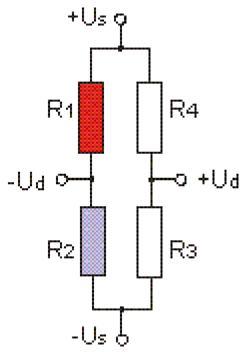
$U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$

Mit einem k-Faktor k=2,0 gilt:
1000 µm/m entsprechen 1 mV/V

Die aktiven DMS (1,2) werden durch zwei passive Widerstände zur Vollbrücke ergänzt.

Diese Schaltung wird in der Spannungsanalyse und bei Low Cost Sensoren angewendet.

Halbbrücke, 1x Längsdehnung, 1x Querdehnung



Us: Brückenspeisung
Ud: Brückenausgang
e: Dehnung
k: k-Faktor (ca. 2,0)

$U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2)$

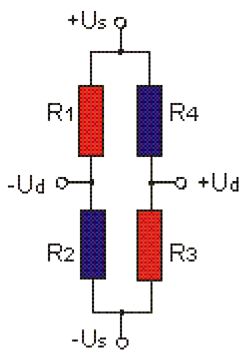
$U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - v \cdot \varepsilon_2)$

Mit einem k-Faktor k=2,0 und einer Querkontraktionszahl v=0,3 gilt:
1539 µm/m entsprechen 1 mV/V

Der aktive DMS (1) wird durch einen quer angeordneten "Poisson" DMS (2) und zwei passive Widerstände (3,4) zur Vollbrücke ergänzt.

Diese Schaltung wird in der Spannungsanalyse und bei Low Cost Sensoren angewendet

Vollbrücke, 4x Längsdehnung



Us: Brückenspeisung
Ud: Brückenausgang
e: Dehnung
k: k-Faktor (ca. 2,0)

$U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4)$

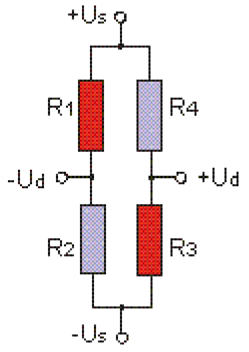
$U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$

Mit einem k-Faktor k=2,0 gilt:
500 µm/m entsprechen 1 mV/V

Die Vollbrücke mit 4 aktiven Dehnungsmessstreifen in Längsdehnung ist die bevorzugte Standardschaltung im Sensorenbau. Sie bietet die bestmögliche Kompensation von

Temperatureinflüssen und mechanischen Störeinflüssen.

Vollbrücke, 2x Längsdehnung, 2x Querdehnung

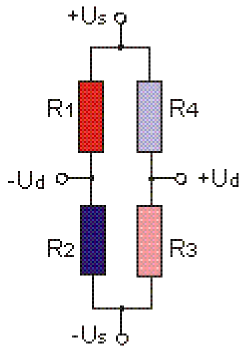


Us: Brückenspeisung
Ud: Brückenausgang
e: Dehnung
k: k-Faktor (ca. 2,0)
$U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4)$
$U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - v \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - v \cdot \varepsilon_4)$

Mit einem k-Faktor k=2,0 und einer Querkontraktionszahl v=0,3 gilt:
769 µm/m entsprechen 1 mV/V

Die zwei gleichsinnigen DMS (1,3) werden durch zwei quer angeordneten DMS (2,4) zur Vollbrücke ergänzt.
Diese Schaltung wird bei Zug-, Druckstäben bevorzugt eingesetzt. Für Präzionssensoren wird oft noch eine Linearisierung mit zusätzlichen Halbleiter-DMS vorgesehen.

Vollbrücke, 2x Längsdehnung, 2x Querdehnung



Us: Brückenspeisung
Ud: Brückenausgang
e: Dehnung
k: k-Faktor (ca. 2,0)
$U_d/U_s = 1/4 \cdot (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4)$
$U_d/U_s = 1/4 \cdot k \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + v \cdot \varepsilon_3 - v \cdot \varepsilon_4)$

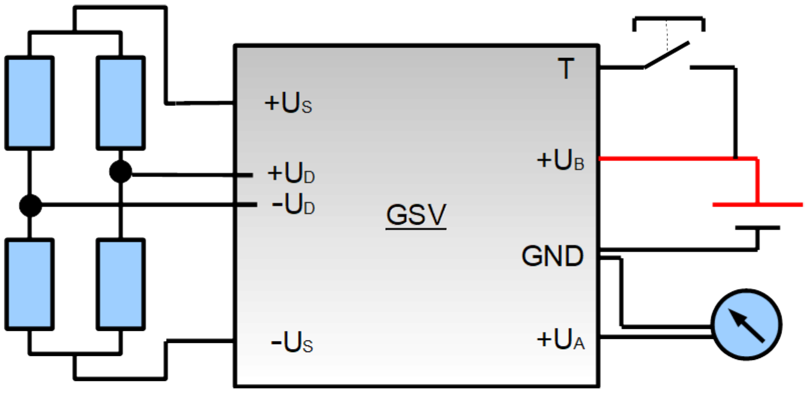
Mit einem k-Faktor k=2,0 und einer Querkontraktionszahl v=0,3 gilt:
769 µm/m entsprechen 1 mV/V

Die zwei gegensinnigen DMS (1,2) werden durch zwei quer angeordneten DMS (3,4) zur Vollbrücke ergänzt.

Diese Schaltung wird in der Spannungsanalyse und bei Low Cost Sensoren angewendet.

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Kalibrierung von Messverstärkern mit Analogausgang



Bei Messverstärkern mit Analogausgang besteht ein Zusammenhang zwischen

Brückenverstimmung Ud/Us am Eingang in mV/V

analoges Ausgangssignal in Volt oder Milliampere

Der typische Messbereich eines Messverstärkers mit Analogausgang ist 2 mV/V. Dieser Messbereich wird bisweilen auch „Eingangsempfindlichkeit“ oder „Range“ genannt.

das Typische Ausgangssignal eines Messverstärkers ist z.B. +- 10 Volt.

Das maximale Ausgangssignal wird bei 100% Aussteuerung des Messbereiches erreicht:

±2 mV/V <=> ±10 V

Die Speisespannung +Us für die Brückenschaltung ist bei einigen Messverstärkern 5V, bei anderen 2.5V, bei anderen möglicherweise 10V oder 1V.

Für die Kalibrierung der Messkette ist die Brückenspeisespannung nicht von Bedeutung. Sie muss aber zur Vermeidung von Selbsterwärmung der Dehnungsmesstreifen hinreichend niedrig ausgewählt werden, abhängig von Gittergröße und Material des Verformungskörpers.

Spannungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen

Einachsiger Spannungszustand

Der einachsige Spannungszustand tritt bei Zug- und Druckstäben auf wie in Abb. 1. Das Maximum der Zug-/Druckspannungen entsteht in Richtung der Kraft. In allen anderen Richtungen sind die Spannungen kleiner und folgen der Gleichung:

$$\sigma_1 = f(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{max} \cdot (1 + \cos 2\varphi)$$

- φ : Winkel zwischen der Hauptrichtung (hier Wirkungslinie der Kraft) und Betrachtungsrichtung (Messrichtung).
- σ_1: Erste Hauptrichtung

Trotz des einachsigen Spannungszustandes findet man jedoch einen zweiachsigen Dehnungszustand, aufgrund der Querdehnung.

$$\epsilon_2 = -\nu \cdot \epsilon_1$$

- ε_1: Dehnung in der 1. Hauprichtung
- ε_2: Dehnung in der 2. Hauprichtung (senkrecht zur 1. Hauptrichtung)
- ν: Querkontraktionszahl;

$$\epsilon = f(\varphi) = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_1 [1 - \nu + \cos(\ddot{2}\varphi) \cdot (1 + \nu)]$$

Merke:

➔ Die Werkstoffspannung darf nur dann aus Gleichung $\sigma = E\,\varepsilon$ berechnet werden, wenn die Dehnung in der Kraftrichtung gemessen wurde und der Spannungszustand einachsig ist.

➔ In der Querrichtung wird eine Dehnung gemessen, obwohl keine mechanische Spannung vorhanden ist.

ME-Meßsysteme GmbH
Neuendorfstr. 18a
16761 Hennigsdorf
Tel.: +49 3302 89824 60
Fax: +49 3302 89824 69
Mail: info@me-systeme.de
Web: www.me-systeme.de

Zweiachsiger Spannungszustand

Beim zweiachsigen Spannungszustand treten die maximalen Spannungen in zwei zueinander senkrechten Richtungen auf. Diese Richtungen nennt man Hauptspannungsrichtungen, indiziert mit *1* und *2*.
In der Regel sind bei der Spannungsanalyse die Hauptspannungsrichtungen nicht bekannt.
In diesem Fall wird eine Spannungsanalyse mit Rosetten durchgeführt.

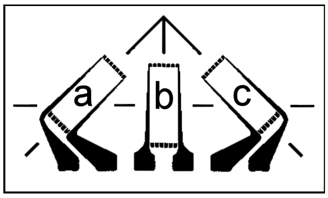


Abbildung 11: DMS-Rosette, 3x 45°

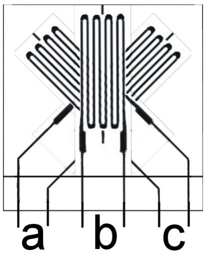


Abbildung 10: DMS-Rosette, 3x 45°, "Stack"

Mit der DMS-Rosette wird die Dehnung in drei Richtungen „a", „b" und „c" gemesen.

Die Gitter „b" und „c" sind jeweils relativ zum Messgitter „a" um 45° bzw. 90° gegen den Uhrzeigersinn orientiert (Alternativ werden auch Messgitter 0, 60° und 120° eingesetzt.)

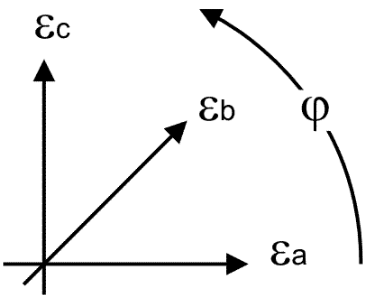


Abbildung 12: Bezeichnung der Messrichtungen entgegen den Uhrzeigersinn.

Der Winkel φ bezeichnet den Winkel zwischen Messgitter a und der ersten Hauptrichtung.

Für die 90° Rosette (0°, 45°, 90°) in Abb. 7 und Abb. 8 gilt folgender Zusammenhang zur Ermittlung der Hauptspannungen σ_1 und σ_2:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_c - \epsilon_b)^2}$$

Um den Winkel φ zu ermitteln, muss ausgehend von der folgenden Berechnung eine Fallunterscheidung durchgeführt werden:

$$\tan(\psi)=\frac{2\epsilon_b-\epsilon_a-\epsilon_c}{\epsilon_a-\epsilon_c}=\frac{y}{x}$$

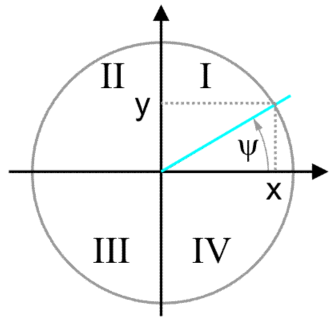


Abbildung 13: 1. Schritt: Bestimmung des Hilfswinkels ψ (PSI) aus den gemessenen Dehnungen

Aufgrund der Mehrdeutigkeit der Tangens-Funktion muss nun anhand einer Fallunterscheidung festgestellt werden, in welchem der Quadranten I bis IV sich die Lösung für den gesuchten Winkel φ befindet:

$y=2\epsilon_b-\epsilon_a-\epsilon_c$	$y\geq 0$	$y>0$	$y\leq 0$	$y<0$
$x=\epsilon_a-\epsilon_c$	$x>0$	$x\leq 0$	$x<0$	$x\geq 0$
Quadrant Nr.:	**I**	**II**	**III**	**IV**
Hauptrichtung:	$\varphi=\frac{1}{2}(0°+\lvert\psi\rvert)$	$\varphi=\frac{1}{2}(180°-\lvert\psi\rvert)$	$\varphi=\frac{1}{2}(180°+\lvert\psi\rvert)$	$\varphi=\frac{1}{2}(360°-\lvert\psi\rvert)$

Tabelle 1: 2. Schritt: Bestimmung des Winkels φ aus dem Hilfswinkel Ψ anhand einer Fallunterscheidung.

Literatur

[1] Keil, Stefan: Dehnungsmessstreifen. 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017

https://www.me-systeme.de/de/dehnungsmessstreifen/literatur