Gerätetechnisches Praktikum: Leichtbau

DREIGURTSCHEIBE

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik
Institut für Leichtbau
Prof.Dr.-Ing. H. Rapp

Stand: 22. Dezember 2010

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Versuchsaufbau **5**

3 Gerätetechnik **5**
3.1 Gerätebeschreibung 5
3.1.1 Digital-Anzeiger DA 3418 5
3.1.2 Gleichspannungs-Messverstärker KWS 3020 B 7
3.1.3 Trägerfreequenz-Meßverstärker KWS 3073 9
3.2 Bedienungsanleitung für die Messverstärker 11
3.2.1 Für DMS-Halbbrücken mit dem KWS 3020 DC-Verstärker 11
3.2.2 Für DMS-Halbbrücken mit KWS 3073 TF-Verstärker . 12
3.2.3 Für Druckaufnehmer 12
3.2.4 Kraftaufnehmer 13

4 Versuchsvorbereitungen **13**
4.1 Theoretische Vorbereitungen und Überlegungen 13
4.2 Praktische Vorarbeiten 13

5 Versuchsdurchführung **14**

6 Versuchsauswertung **14**

7 Diskussion **15**

A Auswertung der DMS am Rahmen **19**

B Auswertung der DMS-Rosette **20**

C Grundlagen der Dehnungsmessstreifen-Messtechnik **22**
C.1 Aufbau eines DMS 22
C.2 Elektrische Kenngrößen eines DMS 23
C.3 Schaltungen für Messungen mit DMS 24
C.4 Brückenfaktor 26
C.5 Einsatz von Gleichspannungs-Messverstärkern 26

1 Einleitung

Als typisches Beispiel für Krafteinleitungsprobleme und als Ersatzmodell für Klebeverbindungen dient im Leichtbau die Dreigurtscheibe.
In diesem gerätetechnischen Praktikum Luftfahrttechnik ist eine experimentelle Bestätigung von Rechenverfahren und -annahmen des Leichtbaues an einer Dreigurtscheibe durchzuführen.
Die Berechnungsverfahren, die hierbei berücksichtigt werden sollen, sind Folgende:

- Berechnung als Schubfeld,
- Statisch unbestimmte Rechnung
  (Rahmen mit Blech).

Das am häufigsten angewandte Messverfahren zur quantitativen Ermittlung von Spannungen ist das Verfahren mit Dehnmessstreifen (DMS), siehe auch Anlage C. Hierbei werden Dehnungen (positive $\underline{\Delta}$ Zug, negative $\underline{\Delta}$ Druck, Stauchung) gemessen. Die Spannungsermittlung erfolgt dann über die Annahme eines Materialgesetzes.
Vor Versuchsbeginn muss noch überlegt (bzw. errechnet) werden, wo und wieviel DMS erforderlich sind, um den Dehnungszustand (bzw. Spannungszustand) durch Messwerte eindeutig festlegen zu können. Bei diesem Praktikum ist diese Überlegung nicht mehr erforderlich, da das zu messende Bauteil, die Dreigurtscheibe, bereits fertig bestückt zu Messung zur Verfügung steht. Es sind lediglich die Messverstärker zu kalibrieren.
Auf der folgenden Seite ist der Versuchsaufbau als Blockschaltbild dargestellt.

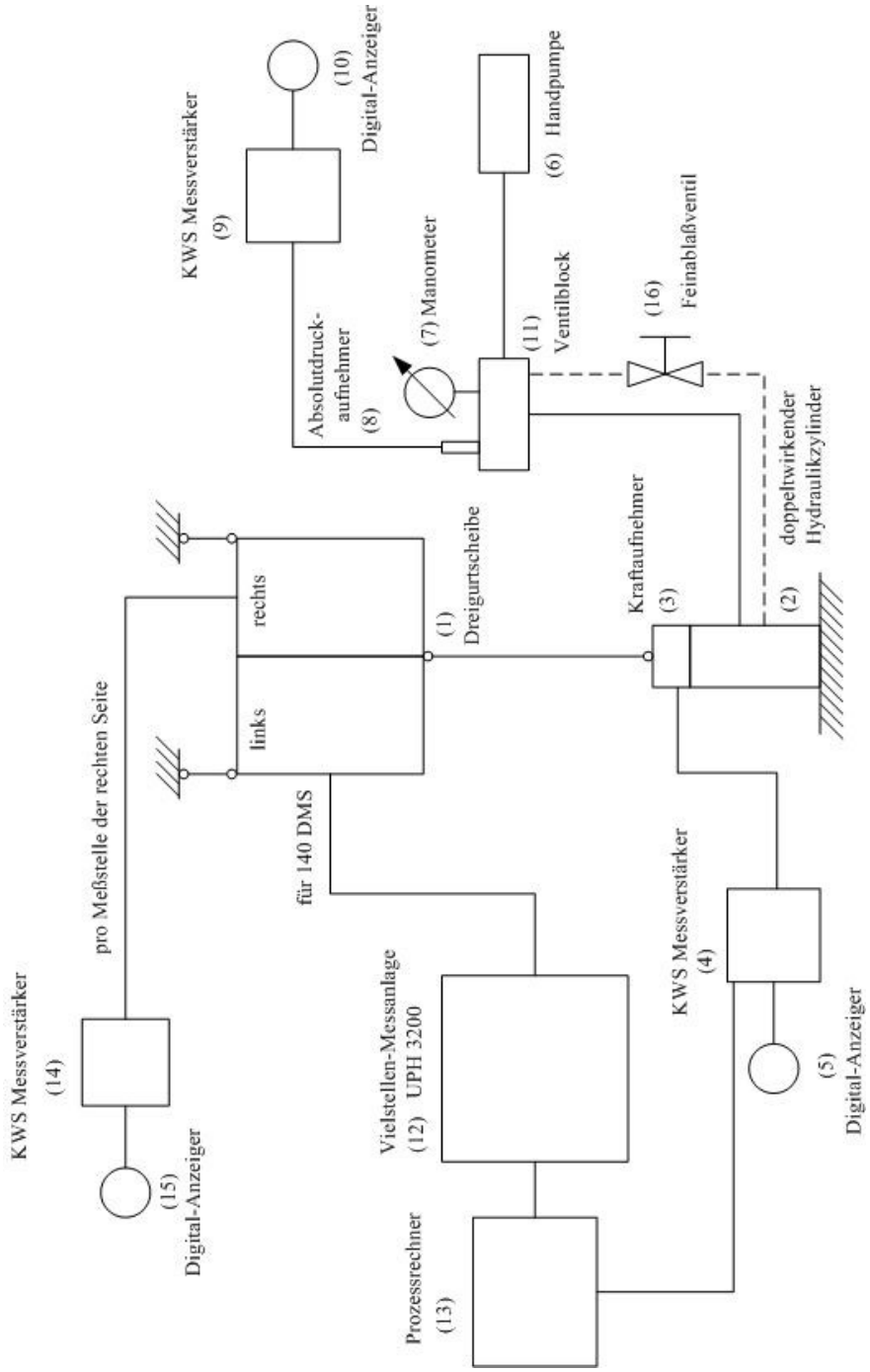


Abbildung 1: Blockschaltbild

2 Versuchsaufbau

Die in einem Rahmen eingespannte Dreigurtscheibe (1) wird von einem doppeltwirkenden Hydraulikzylinder (2) belastet. Die damit aufgebrachte Last $2F$ wird von einem Kraftaufnehmer (3) (Druckmessdose) gemessen. Deren Messsignal wird von einem KWS-Messverstärker (4) der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) verstärkt und über einen Digital-Anzeiger DA 3418 (5) von HBM dargestellt. Der zum Betreiben des Hydraulikzylinders (2) benötigte Druck wird von einer Handpumpe (6) erzeugt, der sowohl von einem Manometer (7) als auch von einem elektrischen Absolutdruckaufnehmer (8) gemessen wird. Dessen elektrisches Messsignal wird von einem Messverstärker (9) verstärkt und über einen Digital-Anzeiger (10) dargestellt. Um eine mechanische Überlastung des Versuchsaufbaues zu vermeiden, ist im Ventilblock (11) ein manuell einstellbares Überdruckventil eingebaut, welches den Öldruck auf ca. 65 bar begrenzt. Das Feinablaßventil (16) gestattet eine stufenweise Reduzierung der Belastung. Die Dreigurtscheibe (1) ist mit 150 DMS bestückt. Während die 140 DMS der linken Seite (siehe DMS-Belegungsplan) bzw. die Messwerte der 140 DMS der linken Seite von der automatischen Vielstellen-Messanlage UPH 3200 (12) von HBM erfasst, gespeichert und von einem Prozessrechner ausgewertet werden, müssen die Messwerte der 10 DMS der rechten Seite von je einem KWS Messverstärker (14) von HBM verstärkt und über einen Digital-Anzeiger (15) von HBM zur Anzeige gebracht werden.
Die Bedienung der Vielstellen-Messanlage (12) erfolgt während des Praktikums durch den Aufsichtsführenden, die des Prozessrechners durch einen Studenten nach entsprechender Einweisung vor Ort. Die Arbeitsweise und die Andwendungsmöglichkeiten der Vielstellen-Meßanlage werden während des Versuches kurz erklärt.
In diesem Umdruck werden deshalb nur diejenigen Geräte beschrieben, die zur Messung der rechten Seite benötigt werden.

3 Gerätetechnik

3.1 Gerätebeschreibung

3.1.1 Digital-Anzeiger DA 3418

Es können bis zu sieben Messverstärker an den Digital-Anzeiger angeschlossen werden. Das Messergebnis des gerade interessierenden Verstärkers wird über den Schalter S 22 “Messstelle” zur Anzeige gebracht. Durch die Messbereichsumschaltung (Schalter S 11) kann in Verbindung mit der Kalibrierung

des Verstärkers z.B. eine Dehnung jeweils direkt in den physikalischen Einheiten $\mu m/m$ abgelesen werden.

Abbildung 2:

Bedienungselemente:

- P 22 Nullpunkt
  dient zum Feinabgleich des Nullpunktes,
- S 11 Drehschalter “Messbereich” (Anzeigebereich)
  mit diesem Schalter wird diejenige Anzeige gewählt, welche einer Nenneingangsspannung von 10 V entsprechen soll,
- S 22 Drehschalter “Messstelle”
  dient zur Auswahl der gewünschten Messstelle (Messverstärker),
- S 33 Kippschalter “Start” ext./int.
  je nach Schalterstellung wird das Umsetzen der Eingangs- (Mess-)spannung in die digitale Anzeige (Zahlenwert) durch ein Signal von innen oder außen gestartet.

3.1.2 Gleichspannungs-Messverstärker KWS 3020 B

Der Messverstärker speist mit einer stabilisierten Gleichspannung den Messwertaufnehmer und verstärkt das vom Aufnehmer abgegebene messwertproportionale Signal, welches dann über DA 3418 zur Anzeige gebracht werden kann.

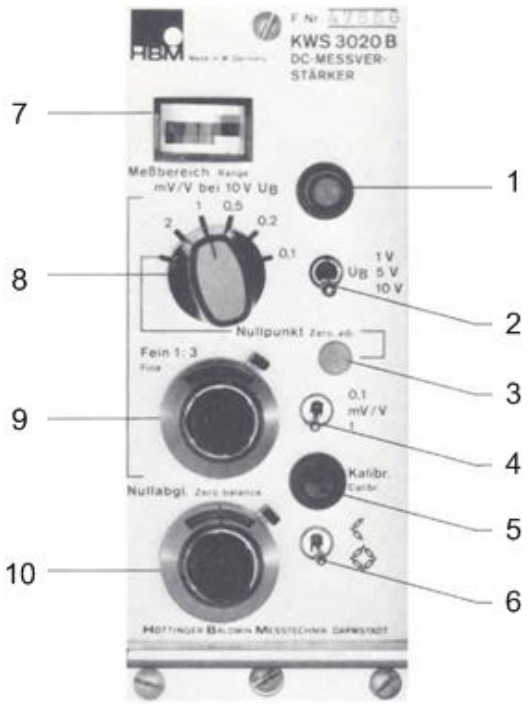


Abbildung 3:

Bedingungselemente:

- 1 Betriebskontrolllampe L 1
  leuchtet bei angelegter Betriebsspannung,

- 2 Brückenspeisespannungsschalter S 4
  umschaltbar zwischen $U_B = 1$V, 5 V und 10 V,

- 3 interne Nulleinstellung P 25
  wenn Messbereichsschalter S 1 (Pkt. 8) in linker Endstellung steht, kann der Endstufennullpunkt justiert werden,

- 4 Kalibriersignalschalter S 3
  umschaltbar zwischen 0,1 mV/V und 1 mV/V,

- 5 Kalibriersignaltaste S 5
  durch Tastendruck wird zur Kalibrierung das mit S 3 gewählte Signal abgerufen,

- 6 Brückenwahlschalter S 2
  umschaltbar zwischen DMS-Halb- und Vollbrücke,

- 7 Aussteuerungskontrollanzeige J 1
  muß zur genauen Messung stets im schwarzen Bereich gehalten werden,

- 8 Messbereichsstufenschalter S 1
  einstellbar auf fünf Messbereiche und interne Nullpunktkontrolle,

- 9 Messbereichsfeineinstellung P 1
  kontinuierliche Einstellung zwischen 90 % und 270 %, bezogen auf den mit S 1 angewählten Bereich,

- 10 Brückenfeinabgleich P 2
  Nullabgleich des angeschlossenen Messwertaufnehmers.

zu Pkt. 2: Brückenspeisespannung

Der Messverstärker liefert eine stabilisierte Gleichspannung, die von der Frontplatte aus umschaltbar ist (S4). Die am Messbereichsschalter (S 1) angegebenen Werte beziehen sich auf 10 V Brückenspeisespannung. Wird auf eine der anderen Spannungen umgeschaltet, reduziert sich die Empfindlichkeit um den Faktor des Spannungsverhältnisses $10V/U_B$, gleichzeitig werden dadurch die Messbereichswerte um den gleichen Faktor vergrößert. Wird bei einem schon abgeglichenen Verstärker eine andere Speisespannung gewählt, so muß der Verstärker neu abgeglichen werden. Die Wahl der Brückenspeisespannung U_B erfolgt nach folgenden Kriterien:

> Brückenspeisespannung 1V:
> Für mehrere parallel geschaltete Aufnehmer, Messungen auf schlecht wärmeleitenden Prüflingen (z.B. aus Kunststoff) sowie DMS mit sehr kleinen Messgittern. Damit wird eine zu große Eigenerwärmung der DMS ausgeschlossen.
> Neue Messbereiche: 1; 5; 10; 20 mV

Brückenspeisespannung 5V:
Standardanwendung bei DMS und Aufnehmern mit einem Widerstand größer als 85 Ω.
Neue Messbereiche: 0,2; 0,4; 1; 2; 4 mV

Brückenspeisespannung 10 V:
Für DMS und Aufnehmer, deren Anschlußwiderstände größer als 175 Ω sind, sowie DMS mit großer Messgitterlänge. Damit erreicht man größere Meßempfindlichkeit und geringere Nullpunktdrift.
Messbereiche: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 mV

zu Pkt. 6: Brückenwahl

Entsprechend dem angeschlossenen Aufnehmer wird mit dem Brückenwahlschalter S 2 die Betriebsart "Halb-" bzw. "Vollbrücke" angewählt. Bei "Halbbrücke" wird die angeschlossene DMS-Halbbrücke intern zu einer Vollbrücke ergänzt.

zu Pkt. 10: Brückenabgleich

Mit dem Messverstärker kann die Nullverstimmung eines angeschlossenen DMS-Aufnehmers bis max. ± 2mV/V abgeglichen werden. Die Abgleichspannung wird kompensatorisch über einen Summierverstärker eingespeist. Damit ist der Abgleichsbereich unabhängig von dem angeschlossenen Aufnehmerwiderstand. Mit P 2 (Nullabgleich) läßt sich der Abgleichbereich kontinuierlich durchfahren.

3.1.3 Trägerfreequenz-Meßverstärker KWS 3073

Der Messverstärker speist die Brückenschaltung mit einer Wechselspannung. Das Messsignal, welches ebenso eine Wechselspannung ist, wird verstärkt und gleichgerichtet über den Digitalanzeiger DA 3418 zur Anzeige gebracht.

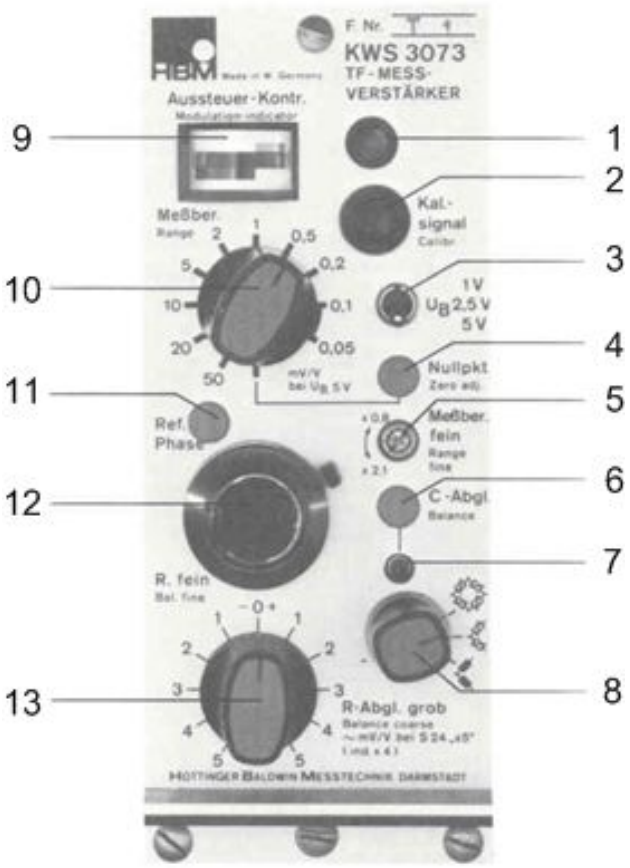


Abbildung 4:

Bedienungselemente:

- 1 Betriebskontrollampe L 1
- 2 Kalibriersignaltaste S 1
- 3 Brückenspeisespannungsschalter S 3
- 4 Interne Nullpunkteinstellung P 25
- 5 Messbereichsfeineinstellung P 2
- 6 Kapazitätsabgleich P 21
- 7 Anzeigespreizung der Aussteuerkontrolle S 5
- 8 Brückenwahlschalter S 21

- 9 Aussteuerkontrollanzeige J 1
- 10 Messbereichsstufenschaltern S 2
- 11 Referenzphaseneinstellung P 205
- 12 Feinabgleich für Brückennullpunkt P 1
- 13 Grobabgleich für Brückennullpunkt S 4

3.2 Bedienungsanleitung für die Messverstärker

(die Nummerierung der Schalter bezieht sich jeweils auf die Grafik des entsprechenden Messverstärkers)

3.2.1 Für DMS-Halbbrücken mit dem KWS 3020 DC-Verstärker

1. Messverstärker mit S 22 anwählen
2. Brückenart mit S 2 einstellen
3. Brückenspeisespannung U_B mit S 4 einstellen
4. Nullpunktabgleich:
   P 2 ist so zu drehen, dass auf dem DA 3418 ± 0000 steht.
   (Messbereich S 1 zunächst auf 2mV/V, dann feiner)
5. Kalibrieren des Messverstärkers:
   Da mit DMS-Halbbrücken gemessen werden soll, muss mit dem Verstärker-Kalibriersignal (S3 und S5) der Verstärker geeicht werden. Mittels P 1 kann auch jeder beliebige DMS-abhängige k-Faktor dem Verstärker eingegeben werden. Dabei geht man folgendermaßen vor:

   Mit S 3 kann ein Kalibriersignal $U_{\text{cal}}/U_B = 0,1$ oder $1mV/V$ dem Eingangssignal aufaddiert werden. Es soll die Eingangsspannung simulieren, die durch ein

   $$\varepsilon = (0,1;1) \cdot \frac{4000}{k \cdot B} \left[\frac{\mu m}{m}\right]$$

   entsteht. Da k durch den verwendeten DMS bekannt ist, lässt sich ε_{cal} errechnen, welches dieselbe Eingangsspannung erzeugen würde. Bei-

spiel:

$$\begin{aligned} U_{cal}/U_B &= 1mV/V \\ B \text{ (Brückenfaktor)} &= 1 \text{ (nur ein aktiver DMS)} \\ k &= 2,1 \\ \varepsilon_{cal} &\approx 1905\frac{\mu m}{m} = \frac{4000}{2,1 \cdot 1} \end{aligned}$$

Jetzt müssen S 1, P 1 und S 11 so variiert werden, dass der Wert 1905 beim DA 3418 abzulesen ist. Dabei ist S 5 immer gedrückt zu halten. Außerdem ist immer darauf zu achten, dass der Messverstärker nicht übersteuert wird. Wenn das Kalibriersignal den gewünschten Wert anzeigt, ist der Verstärker geeicht und einsatzbereit.

3.2.2 Für DMS-Halbbrücken mit KWS 3073 TF-Verstärker

1. Messverstärker mit S 22 anwählen
2. Brückenart mit S 21 anwählen
3. Brückenspeisespannung U_B mit S 3 einstellen
4. Nullpunktabgleich:
   Mit S 4 ist der Nullpunkt grob einzustellen. Die Feineinstellung erfolgt mit dem Schalter P 1. Der Messbereich sollte zu Beginn mit S 2 auf 5 mV/V, und danach feiner eingestellt werden.
5. Kalibrieren des Messverstärkers:
   Hier muss ähnlich dem Messverstärker KWS 3020 das entsprechende Messsignal eingestellt werden. Hierzu ist bei gedrückter Kalibriertaste mit P 2 der gewünschte Kalibrierwert einzustellen. Falls sich bei der bisherigen Einstellung nicht der gewünschte Wert erreichen lässt, sind S 2 und S 4 entsprechend zu variieren (hierbei muss jedoch der Nullpunkt ebenfalls wieder eingestellt werden).

3.2.3 Für Druckaufnehmer

Aus der Beschriftung des Druckaufnehmers, welcher als Vollbrücke zu berücksichtigen ist, können die Werte der Nennkraft (Nenndruck), Nennempfindlichkeit (Nennkennwert) in mV/V und die geeigneten Speisespannungen in V entnommen werden.
Das Kalibriersignal des NW liegt bei 1 mV/V. Für die direkte Druckanzeige ist der Schalter S 11 auf 1000 zu stellen. Der weitere Vorgang zur

Nullpunkteinstellung und Kalibrierung ist vergleichbar zur Kalibrierung der DMS.

3.2.4 Kraftaufnehmer

Das Vorgehen bei der Nullpunkteinstellung und Kalibrierung des Kraftaufnehmers ist ähnlich dem Vorgehen beim Druckaufnehmer und kann daher übernommen werden. Zum Druckaufnehmer ist bekannt, dass 2mV/V gleich 9810 N entsprechen.

4 Versuchsvorbereitungen

Die Arbeiten 4.1 sind vor Praktikumsbeginn durchzuführen!

4.1 Theoretische Vorbereitungen und Überlegungen

- Berechnung der Spannungen in der Dreigurtscheibe nach der Schubfeldtheorie Ermittlung der auftretenden Dehnungen infolge Zug/Druck und Schub (max. Belastung 2 F = 7000N)
- Berechnung der Dreigurtscheibe als Rahmentragwerk mit Blechaussteifung (keine Zahlenrechnung, reine Überlegungen)
  - = Grad der statischen Unbestimmtheit ermitteln
  - = Wahl eines statisch bestimmten Grundsystemes unter Ausnutzung der Symmetrie, Rechengang erläutern
  - = Überlegungen über die damit berechenbaren Schnittkräfte (Zug, Druck, Biegung, Torsion)
- Studium und Aufbereitung der Auswerteformeln für die Dehnungen, Spannungen und Schnittkräfte. Weitere Hinweise finden Sie in Anlage A.

4.2 Praktische Vorarbeiten

- Abgleich und Kalibrierung aller Messverstärker nach 3.2
- Herstellen der mechanischen Verbindung Dreigurtscheibe-Hydraulikzylinder

5 Versuchsdurchführung

- Aufbringen der einzelnen Laststufen 2 F,
- Protokollierung der einzelnen Dehnungen in nachfolgender Tabelle (nur Werte der rechten Seite, da die linke Seite automatisch von der UPH 3200 gemessen und über den Prozessrechner ausgewertet wird).

		Messstellen (Dehnungen in $\mu m/m$)									
nomin. Last 2 F $[N]$	wirkl. Last 2 F $[N]$	201	202	203	304	205	206	207	208	209	210
0											
1000											
2000											
3000											
4000											
5000											
6000											
7000											
6000											
4000											
2000											
1000											
0											

6 Versuchsauswertung

- Auswertung der rechten Seite gemäß Anlage A

- Austragung der Messwerte und des theoretischen Wertes der Schubfeldrechnung in die Diagramme der folgenden Seiten.
  Dabei haben die Indizes folgende Bedeutung:

$$\left.\begin{array}{rcl} N & = & \text{Normalspannung} \\ B & = & \text{Biegespannung} \end{array}\right\} \text{Rosettenwerte}$$

$$\left.\begin{array}{rcl} B1 & = & \text{Biegespannung im Rahmen, Moment senkrecht zur Scheibenebene} \\ B2 & = & \text{Biegespannung im Rahmen, Moment parallel zur Scheibenebene} \\ W & = & \text{Wölbspannung im Rahmen.} \end{array}\right\} \text{Werte der Linear-DMS}$$

Die zur Berechnung und Kalibrierung notwendigen DMS-Kennwerte befinden sich an der Dreigurtscheibe, eine ausführliche Zeichnung der Dreigurtscheibe und die DMS-Belegungspläne sind in den Grafiken 6 - 8 zu sehen.

7 Diskussion

- Vergleich von Theorie und Messung
- Ermittlung und evtl. Erklärung von Fehlern
- Interpretation und Darstellung der einzelnen Ergebnisse

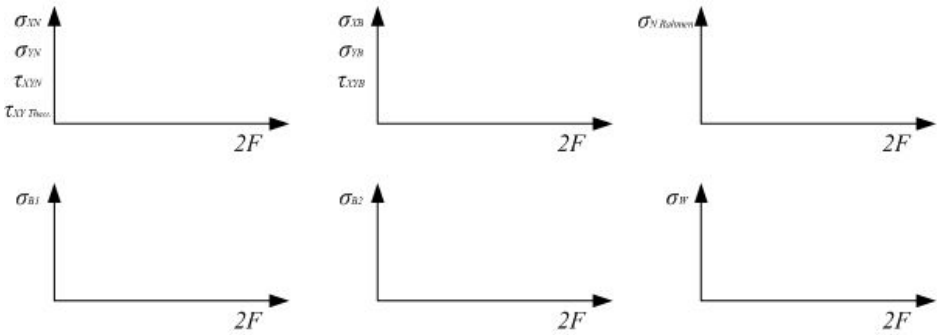


Abbildung 5:

DMS-Belegungsplan

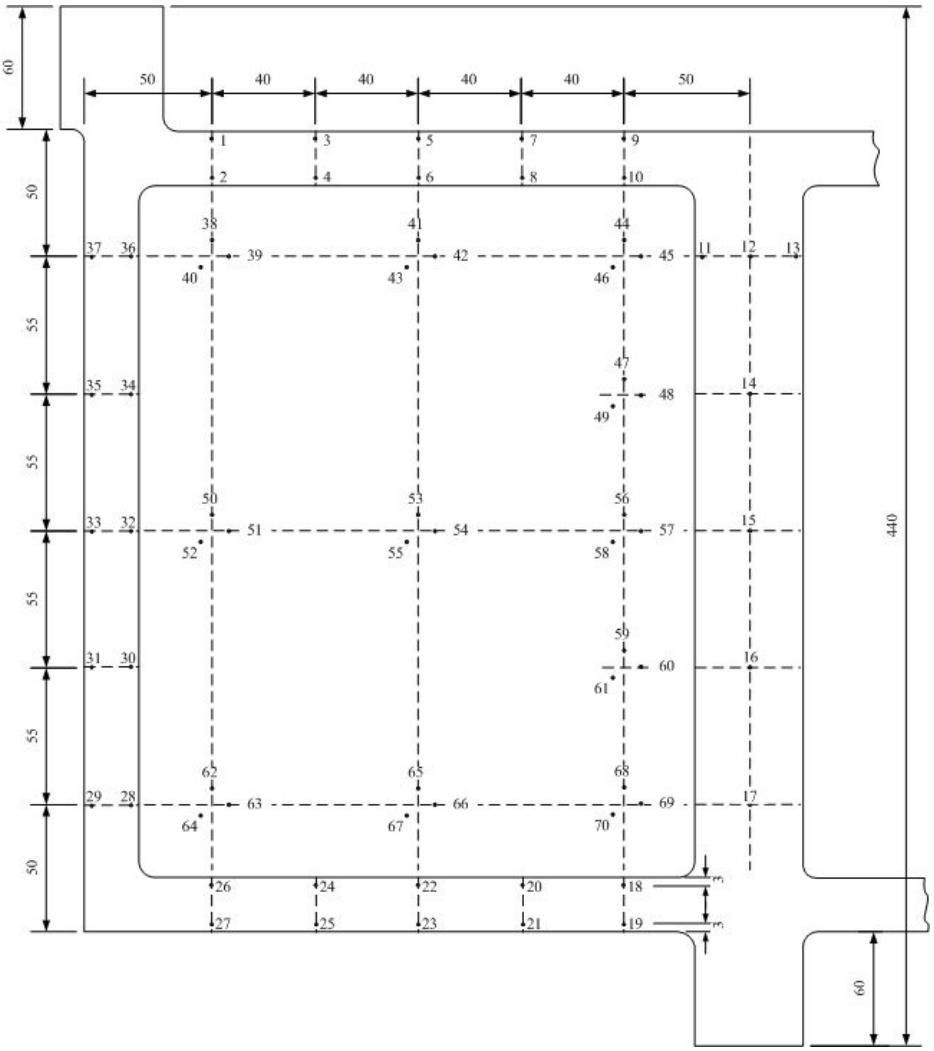


Abbildung 6: DMS-Belegungsplan der linken Seite

(Die DMS mit den 100-er-Nummern befinden sich spiegelbildlich auf der Rückseite, z.B. 39 - 139, 4 - 104 usw.)

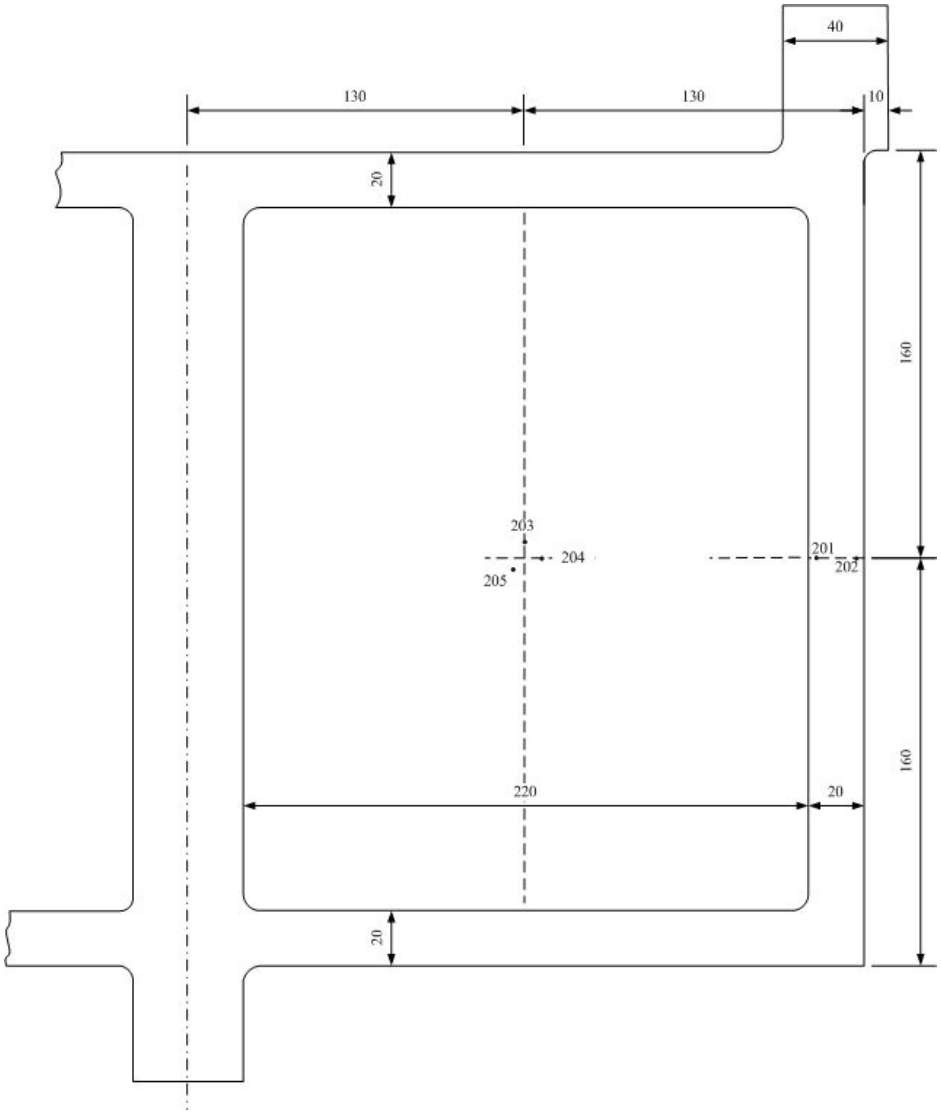


Abbildung 7: DMS-Belegungsplan der rechten Seite

Die dazu spiegelbildlich angebrachten DMS der Rückseite haben folgende Nummern:
201/206; 202/207; 203/208; 204/209; 205/210

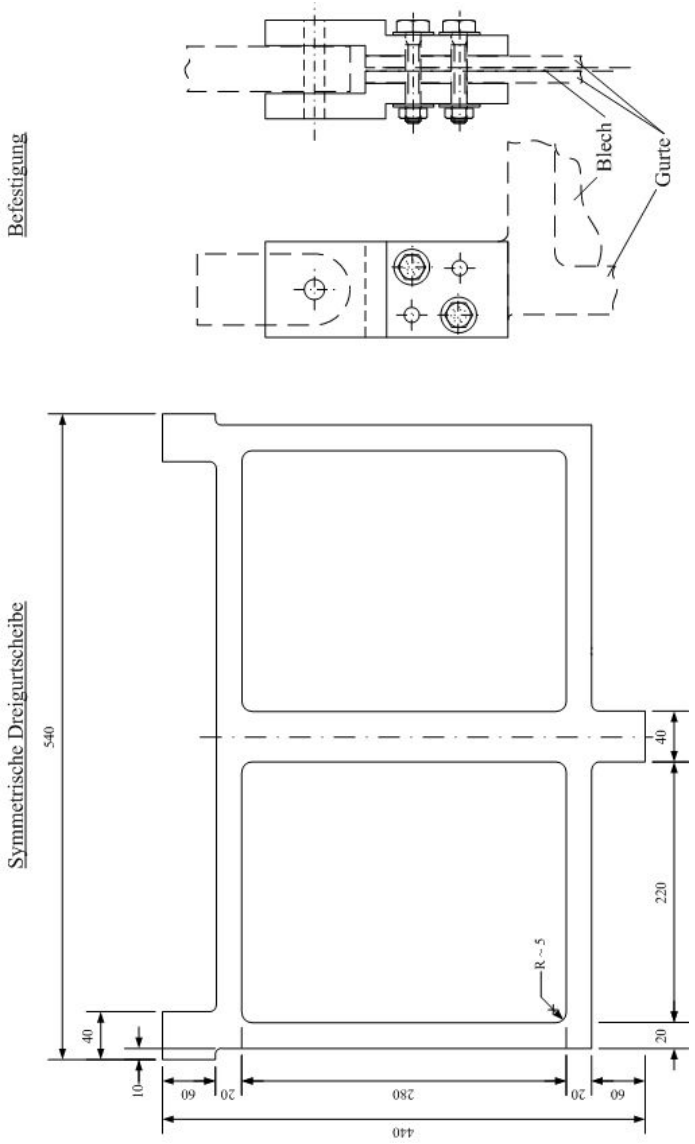


Abbildung 8:

Alle Gurte sind 11 mm dick, alle Bleche sind 1 mm dick.

Auswertgung der DMS-Werte im Praktikum Dreigurtscheibe

A Auswertung der DMS am Rahmen

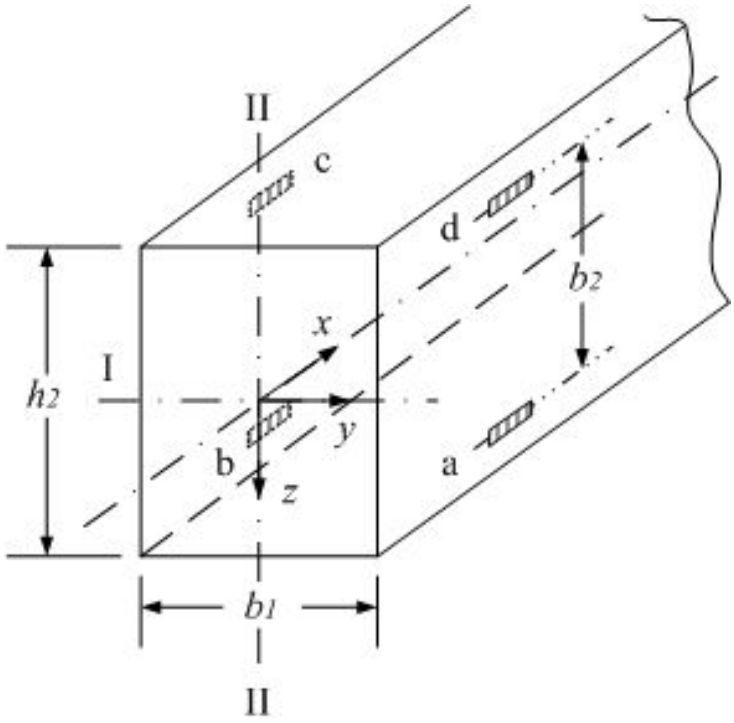


Abbildung 9:

An den Rahmen sind jeweils 4 DMS an einem Querschnitt appliziert (s. Abbildung 9). Die Messwerte $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$ und ε_D ermöglichen die Ermittlung von 4 linear unabhängigen Dehnungs- bzw. Spannungsverteilungen:

1. Zug/Druck (Index N)

2.+3. Biegung um die Achsen I - I und II - II (Indes $B1$ bzw. $B2$)

4. Verwölbung (Index W)

Sie werden wie folgt ererchnet:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_N \\ \varepsilon_{B1} \\ \varepsilon_{B2} \\ \varepsilon_W \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_a \\ \varepsilon_b \\ \varepsilon_c \\ \varepsilon_d \end{Bmatrix} \tag{1.1}$$

Aus den Größen $\varepsilon_N, \varepsilon_{B1}$ und ε_{B2} sind mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{1.2}$$

die Spannungen σ_2 und die Schnittkräfte N, M_{B1} und M_{B2} zu bestimmen. $E = 7,3 \cdot 10^6 N(cm^2; b_1, b2, h_2$ nach Messung!

B Auswertung der DMS-Rosette

Die DMS sind an der Vorderseite (Index v) und Rückseite (Indes r) angebracht. Jede Rosette liefert für ihren Appliaktionsort die Dehnungen des **ebenen Spannungszustandes** $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ und γ_{xy}.
Ist ε_i eine mit einem DMS gemessene Dehnung unter dem Richtungswinkel φ_i in einem $x-y$-Koordinatensystem, so gilt für den ebenen Spannungszustand der Zusammenhang:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_x \cos^2 \varphi_i + \gamma_{xy} \sin \varphi_i \cos \varphi_i + \varepsilon_y \sin^2 \varphi_i.$$

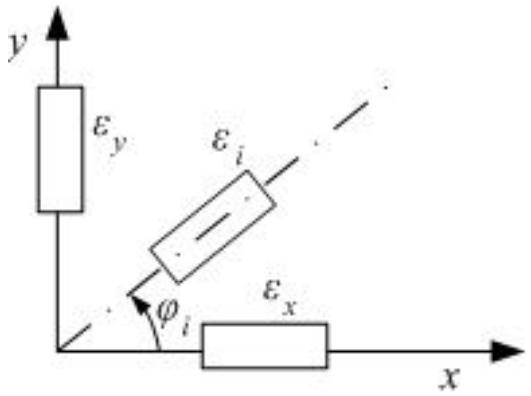


Abbildung 10:

Mit dieser Beziehung ist sofort einzusehen, dass mit 3 DMS die Dehnungen eines ebenen Spannungszustandes vollständig ermittelt werden können. Für die vorliegende Applikation ist $\varphi_1 = 0°, \varphi_2 = 45°, \varphi_3 = 90°$. Mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes für diesen Zustand folgt:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \nu \\ \nu & 0 & 1 \\ -\frac{1-\nu}{2} & 1-\nu & -\frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1(\varphi = 0) \\ \varepsilon_2\left(\varphi = \frac{\pi}{4}\right) \\ \varepsilon_3\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right) \end{Bmatrix}. \tag{2.3}$$

Diese Gleichung ist in der Ausarbeitung herzuleiten ($\nu = 0,3$!).

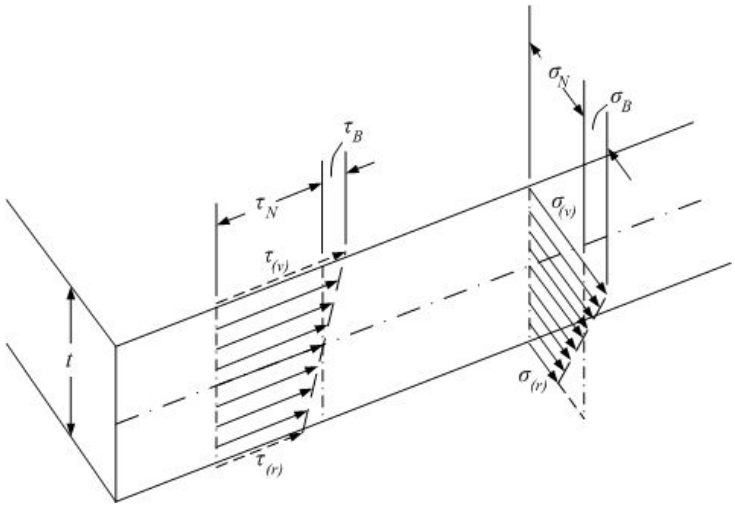


Abbildung 11:

Gemäß obiger Skizze sind die Mittelflächenspannungen σ_{xN}, σ_{yN} und τ_{xyN} sowie die Biegespannungen σ_{xB}, σ_{yB} und τ_{xyB} zu bestimmen.
Schließlich sind für die maximale Belastung die Hauptspannungsrichtungen und die zugehörigen Spannungen der Mittelflächengrößen und der Biegegrößen zu ermitteln $\rightarrow (\sigma_{1N}, \sigma_{2N}, \tau_N, \varphi_N, \sigma_{1B}, \sigma_{2B}, \tau_B, \varphi_B)$.

C Grundlagen der Dehnungsmessstreifen-Messtechnik

Dehnungsmessstreifen (abgekürzt: DMS) dienen als Messwertaufnehmer für die elektrische Messung von Dehnungen. Aus der Dehnung kann man nach Methoden der Festigkeitslehre die Materialspannung berechnen. DMS werden durch Klebung mit organischen Klebstoffen, keramischen Kitten, durch Flammspritzen oder mit anderen Verfahren auf die Messstelle appliziert. Mit Applikation auf spezielle Messkörper ist die Messung von Kräften, Drücken, Drehmomenten und anderen Größen möglich.

C.1 Aufbau eines DMS

Auf einem Trägerwerkstoff ist ein Messgitter aus einem metallischen Werkstoff mäanderförmig aufgebracht wie in Abb. 12 gezeigt.

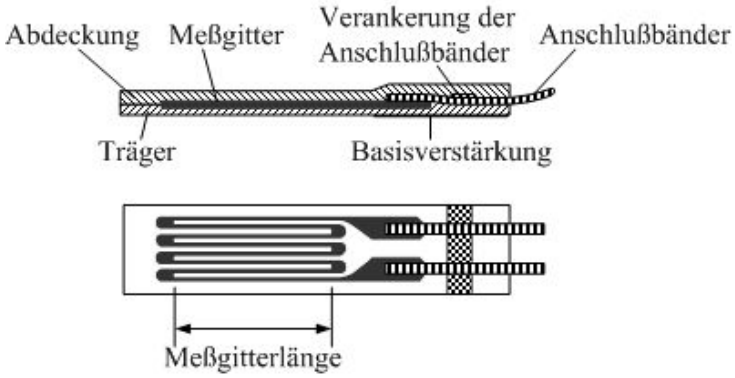


Abbildung 12: Aufbau eines DMS

Das Messgitter ist gegen äußere Einflüsse durch eine Abdeckung geschützt. Anschlussbänder und deren Verankerungen zur Verbindung des DMS mit der Messelektronik sind bei manchen DMS-Typen vorhanden. Folgende Kenngrößen und Werkstoffe gelten für einen Standard-DMS, der den auf der Dreigurtscheibe applizierten DMS entspricht.

Trägerwerkstoff: Polyimid
Messgitterwerkstoff: Konstanten-Folie
Messgitterlänge: 6 mm,
Widerstand: 120 Ω

Folgende Gründe können für die Auswahl der Materialien und Abmessungen angeführt werden.

Unter den Trägerwerkstoffen weist Polyimid hinsichtlich seiner Temperaturbeständigkeit und der Eignung für die Anwendung verschiedener DMS-Klebstoffe ein sehr günstiges Verhalten auf. Konstantan wird verwendet, da es einen für metallische Werkstoffe hohen spez. Widerstand von $0,49 \Omega mm^2/m$, einen geringen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes von $-3,1 \cdot 10^{-5}$ grad$^{-}1$ besitzt und bis zu einer Temperatur von 300° C einsetzbar ist. Ein Folien-DMS, bei dem der Widerstandsträger photochemisch geätzt wird, hat gegenüber einem Draht-DMS den Vorteil, dass er mit geringeren Toleranzen hergestellt werden kann. Ein DMS mit 6 mm aktiver Messgitterlänge und 120Ω Messgitterwiderstand stellt ein Optimum bezüglich Handhabung, Preis und messtechnischer Gesichtspunkte dar. Mit kleineren Abmessungen wird die Handhabung schwieriger und der Preis nimmt zu. Bezogen auf gleiche Leistungszufuhr erwärmen sich kleinere DMS wegen der geringeren Wärmeabfuhr stärker; entsprechend stärker machen sich die durch Erwärmung bedingten Fehler bemerkbar. Deshalb muss bei DMS mit kleineren Abmessungen die Speisespannung verringert werden, was zu geringeren Messspannungen führt, so dass der Abstand des Messsignals zu Störsignalen geringer wird. DMS mit diesen kleinen Abmessungen werden deshalb nur dann eingesetzt, wenn örtlich stark veränderliche Spannungen (z.B. Kerbspannungen) gemessen werden sollen.

C.2 Elektrische Kenngrößen eines DMS

Ein DMS formt Dehnungen, denen er ausgesetzt wird, in proportionale Widerstandsänderungen um. Den Zusammenhang zwischen der Dehnung $\varepsilon = \Delta\ell/\ell$ und der relativen Widerstandsänderung eines DMS beschreibt die Gleichung

$$\Delta R/R_0 = k \cdot \varepsilon \tag{3.1}$$

wobei k, der sogenannten "k-Faktor", eine experimentell festgestellte Kenngröße des verwendeten DMS ist. Der Wert von k liegt im Allgemeinen bei 2.

Weitere Kenngrößen sind der Messgitterwiderstand und der Temperaturgang. Der Nennwert des Messgitterwiderstandes eines Standard-DMS ist 120Ω, während auch ein Wert von 300, 350 und 600 Ω üblich ist.

Der Temperaturgang wird durch den Temperaturkoeffizienten des DMS festgelegt. Die tatsächlichen Werte des Messgitterwiderstandes, des k-Faktors und des Temperaturganges liegen üblicherweise mit ihren Toleranzen und anderen Angaben jeder von der Herstellerfirma gelieferten DMS-Packung bei.

C.3 Schaltungen für Messungen mit DMS

Aussgehend von Gleichung (1.1) wäre es denkbar, Dehnungen mit Hilfe der Widerstandsänderung des DMS direkt zu messen. In der Praxis wird jedoch stets die Wheatston'sche Brückenschaltung verwendet. Sie hat den Vorteil, dass mit dieser Schaltung eine Kompensation des Temepraturganges des DMS möglich ist. Die Brückenschaltung ist in Abb. 13 dargestellt.

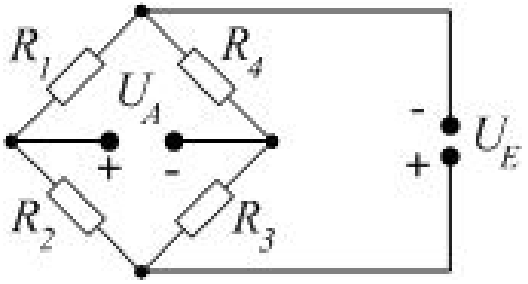


Abbildung 13: Wheatston'sche Brückenschaltung

Für den Fall, dass

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \text{ oder } R_1/R_2 = R_3/R_4 \text{ gilt } U_A/U_E = 0.$$

Ändern sich die Widerstände R_i in ihrem Wert, so wird die Brücke verstimmt und es erscheint eine Brückenspannung U_A, die bei vorgegebenem ε_i gegenüber Abb. 13 entweder positive oder negative Polarität aufweist.

$$\begin{array}{ll} \varepsilon_1 > 0 \ldots U_A > 0 & \varepsilon_1 < 0 \ldots U_A < 0 \quad [\varepsilon > 0 \text{ Dehnung}] \\ \varepsilon_2 > 0 \ldots U_A < 0 & \varepsilon_2 < 0 \ldots U_A > 0 \\ \varepsilon_3 > 0 \ldots U_A > 0 & \varepsilon_3 < 0 \ldots U_A < 0 \\ \varepsilon_4 > 0 \ldots U_A < 0 & \varepsilon_4 < 0 \ldots U_A > 0 \end{array}$$

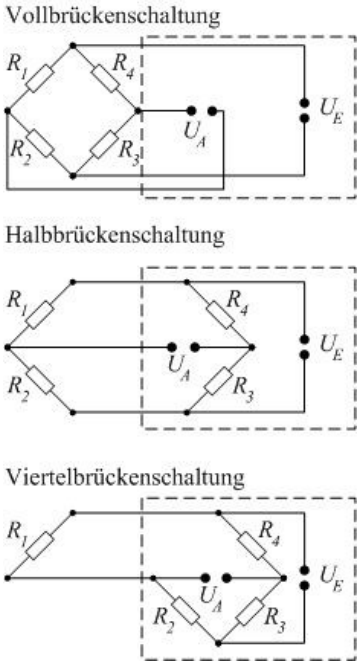
Unter der Annahme, dass $\Delta R_i << R_i$ erhält man die Beziehung

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

und mittels Gleichung (3.1)

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \tag{3.2}$$

Vielfach ist es nicht möglich oder erforderlich, dass sämtliche vier Widerstände der Wheatston'schen Brücke DMS sind. Es genügen oft ein oder zwei DMS und eine Ergänzung der Brücke durch konstante Widerstände. Folgende Schaltungen sind möglich, wobei die verschiedenen DMS folgende Funktionen erfüllen können:



Aktiver DMS
DMS, welcher der durch Belastung (sowie durch Temperaturänderung) des Prüflings entstehenden Dehnung folgt.

Kompensations-DMS
DMS, der das in einem aktiven DMS durch Temperaturänderung hervorgerufene scheinbare Dehnungssignal in einer Brückenschaltung kompensiert.

Passiver DMS, Blind-DMS
Applizierter DMS, der nur die Funktion eines Widerstandes hoher Konstanz ausübt (keine Dehnung, konstante Temperatur)

Abbildung 14:

Die Voll- und Halbbrückenschaltung hat gegenüber der Viertelbrückenschaltung den Vorteil, dass Temperaturkompensation mittels Kompensations-DMS möglich ist. Dies läßt sich z.B. mit der Halbbrückenschaltung leicht zeigen, wenn man annimmt, dass R_1 ein aktiver DMS und R_2 ein passiver Kompensations-DMS ist mit gleichen thermischen Eigenschaften wie R_1. Bei einer mechanischen Dehnung ε_M erfolgt bei gleichzeitiger Temperaturänderung eine thermische Dehnung ε_{th}, so dass entsprechend Gleichung (3.1)

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k(\varepsilon_M + \varepsilon_{th}).$$

Setzt man diese Gleichung in Gleichung (3.2) ein, so erhält man

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4}(\varepsilon_M + \varepsilon_{th} - \varepsilon_{th}) = \frac{k}{4} \cdot \varepsilon_M.$$

Somit hat ε_{th} keinen Einfluß auf das Messergebnis, was einer Kompensation des Temperatureinflusses entspricht.

C.4 Brückenfaktor

Sind mehrere aktive DMS in der Brückenschaltung enthalten, so erhöht sich bei gleicher Dehnung ε des Messobjektes das Ausgangssignal der Brückenschaltung um den Brückenfaktor B.
Um die Bestimmung des Brückenfaktors B zu erläutern, soll als Beisiel ein Zugstab mit zwei aktiven DMS R_1 und R_3 in Kraftangriffsrichtung und zwei aktiven DMS R_2 und R_4 senkrecht dazu betrachtet werden. Dabei ergibt sich Folgendes:

$$\begin{aligned} [R_1 = R_2 = R_3 = R_4] \qquad & \text{infolge Querkontraktion} \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \sigma \cdot E \qquad & \varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \\ \Delta R_1 = \Delta R_3 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1 \qquad & \Delta R_2 = \Delta R_4 = -\nu\varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2 \end{aligned}$$

Aus Gleichung (3.2) erhält man

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot \big[\varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1) + \varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1)\big].$$

Da $\nu \approx 0.3$ ergibt sich

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot 2,6 \cdot \varepsilon_1 \tag{3.3}$$

Somit ist $B = 2.6$ für diese Applikation der DMS.

C.5 Einsatz von Gleichungsspannungs- und Trägerfrequenz-Messverstärkern

Bei dem Trägerfrequenzverfahren wird die Brückenschaltung nicht mit Gleichspannung, sondern mit einer Wechselspannung versorgt, die im vorliegenden Fall eine Frequenz (die Trägerfrequenz) von 5 kHz aufweist. Somit ist das Messsignal ebenso eine Wechselspannung, die verstärkt und gleichgerichtet zur Anzeige gelangt.
Der besondere Vorteil dieses Trägerfrequenz-Messverfahrens liegt in der höheren Nullpunktstabilität sowie der Störspannungsunterdrückung. Bei einem Gleichspannungs-Messverstärker wird die Nullpunktstabilität ausschliesslich durch die Spannungsdrift der Eingangsstufe bestimmt. Selbst wenn diese bei hochwertigen Gleichspannungs-Messverstärkern durch entsprechenden Aufwand relativ gering gehalten werden kann, lassich sich Nullpunktfehler infolge von Thermospannungen oder sonstigen galvanischen Spannungen in der Aufnehmereingangsschaltung des Gleichspannungs-Messverstärkers von echten Gleichspannungsmesssignalen nicht unterscheiden. Es sei erwähnt, dass

die Thermospannung an den Verbindungsstellen zwischen zwei Metallen bei einer Temperaturdifferenz von nur 1K bis zu 40 μV betragen kann. Dagegen liegen die Nullpunktdriften von Trägerfrequenz-Messverstärkern bis weit unter $0,1\mu V/K$. Störgleichspannungen oder niederfrequente Störspannungen, die um mehr als die Messfrequenzbandbreite von 1000Hz von der Trägerfrequenz entfernt liegen, können bei Trägerfrequenz- Messverstärkern unterdrückt werden und beeinflussen das Messergebnis nicht.
Ein weitere Vorteil eines Trägerfrequenz-Messverstärkers ist der Einsatz von induktiven und kapazitiven Aufnehmern, z.B. zur berührungslosen Weg- und Abstandsmessung, während ein Gleichspannungsmessverstärker nur die Verwendung Ohm'scher Aufnehmer gestattet.