

## Aufbau einer Waage mit Dehnungsmessstreifen (E24)

### Ziel des Versuches

Mit Hilfe von Sensoren können nichtelektrische Größen elektrisch gemessen werden. Im Versuch werden Dehnungsmessstreifen (DMS) genutzt, um Kräfte zu messen. Es wird eine elektrische Waage aus Biegebalken, Dehnungsmessstreifen und einer Brückenschaltung zur Messung sehr kleiner Spannungsänderungen aufgebaut und kalibriert. Anschließend wird das Gewicht eines Probekörpers gemessen und die Widerstandsänderung der DMS in Abhängigkeit von der Belastung ermittelt.

### Theoretischer Hintergrund

#### Dehnungsmessstreifen (DMS)

In der elektronischen Wägetechnik werden Dehnungsmessstreifen (DMS) als Sensoren eingesetzt. Für den ohmschen Widerstand eines Drahtes gilt  $R = \rho l/A$ . Dehnt oder staucht man den Draht (im Gültigkeitsbereich des hookschen Gesetzes) so ändert sich nicht nur dessen Länge sondern auch der Querschnitt. Es sei  $\tilde{l} = l + \Delta l = l(1 + \varepsilon)$  die Länge des gedehnten oder gestauchten Drahtes mit  $\varepsilon = \Delta l/l$  als relative Längenänderung. Da das Volumen des Drahtes konstant bleibt, ergibt sich für die bei Dehnung oder Stauchung veränderte Querschnittsfläche  $\tilde{A} = A/(1 + \varepsilon)$ . Für den Widerstand des gedehnten oder gestauchten Drahtes folgt

$$\tilde{R} = \rho \frac{\tilde{l}}{\tilde{A}} = (1 + \varepsilon)^2 \rho \frac{l}{A} = R + \Delta R \quad . \quad (1)$$

Bei Vernachlässigung des quadratischen Terms ergibt sich für die durch Dehnung oder Stauchung bedingte Widerstandsänderung

$$\Delta R \approx 2\varepsilon R = 2 \frac{\Delta l}{l} R \quad . \quad (2)$$

Das Verhältnis zwischen relativer Widerstandsänderung und relativer Längenänderung wird auch als  $k$ -Faktor bezeichnet. Dieser  $k$ -Faktor hat etwa den Wert zwei. Damit ist eine direkte Umrechnung einer gemessenen Widerstandsänderung in eine Längenänderung möglich. Um gut messbare Widerstandsänderungen zu erhalten, sollte der zu dehnende Draht eine möglichst große Länge und einen möglichst kleinen Querschnitt haben. In der Praxis wird eine dünne Leiterbahn mäanderförmig auf ein Substrat aufgebracht, um eine ausreichende Drahtlänge auf einer kleinen Fläche zu realisieren. Ein typischer DMS-Sensor mit einem Widerstandswert von  $120 \Omega$  ist in Abb. 1 gezeigt.

$\rho$  = spezifischer Widerstand  
 $l$  = Länge  
 $A$  = Querschnittsfläche

Bei DMS aus anderen Materialien, z. B. Halbleitern, kann der  $k$ -Faktor andere Werte haben.

Die Idee der Kraftmessung über die Widerstandsänderung eines Drahtes stammt von Lord Kelvin (1856).

Patentiert wurde die DMS-Technik von Simmons (1942) und Ruge (1944) in den USA. Mit Hilfe von DMS wird z. B. auch die Ausdehnung von Brückenaufliegern infolge von Temperaturschwankungen überwacht. Damit die dabei auftretenden temperaturbedingten Widerstandsänderungen kompensiert werden können, werden mindestens zwei DMS verwendet, die senkrecht zueinander auf das zu untersuchende Teil aufgeklebt sind. Die Widerstandswerte beider DMS verändern sich gleichermaßen mit der Temperatur und der Widerstandswert eines DMS zusätzlich durch Dehnung oder Stauchung. Zur Auswertung der zu untersuchenden Widerstandsänderung wird eine Brückenschaltung verwendet.

Im Versuch wird ein einseitig eingespannter Biegebalken genutzt, der schematisch in Abb. 2 dargestellt ist, um die Waage zu realisieren. Wird der Balken mit der Kraft  $F$  nach unten gebogen, so wird dessen Oberseite gedehnt und die Unterseite gestaucht. Auf beiden Seiten sind DMS angebracht. Damit vergrößert bzw. verkleinert sich der Widerstand des auf der Oberseite bzw. Unterseite angebrachten DMS bei Durchbiegung proportional zur am Balken angreifenden Kraft.

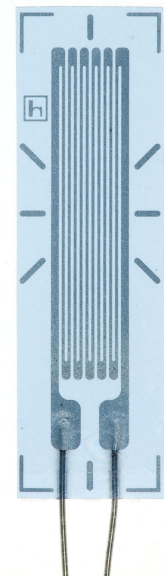
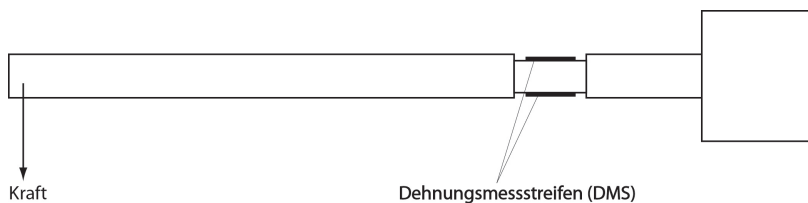


Abbildung 1: Dehnungsmessstreifen, äußere Abmessungen etwa 5 mm x 13 mm

Abbildung 2: Biegebalken zur Kraftmessung

### Brückenschaltung

Mit der Brückenschaltung können kleine Widerstandsänderungen gut beobachtet werden. In Abb. 3 ist eine Halbbrücke gezeigt, bei der sich im linken Brückenarm sowohl der obere, gedehnte DMS ( $R + \Delta R$ ) als auch der untere, gestauchte DMS ( $R - \Delta R$ ) und im rechten Brückenarm zwei Festwiderstände mit dem Widerstandswert  $R$  befinden.

Offensichtlich fließen in beiden Brückenarmen dann zu jeder Zeit identische Teilströme  $I_T = U_B / 2R$ . Damit beträgt die Potentialdifferenz  $U_{AB}$  zwischen den Punkten A und B der Halbbrücke  $U_{AB} = I_T(R + \Delta R) - I_T R = I_T \Delta R = U_B \Delta R / 2R$ .

Die Empfindlichkeit kann verdoppelt werden, wenn eine Vollbrücke aufgebaut wird. Bei der Vollbrücke befinden sich in jedem Brückenarm jeweils ein gedehnter und ein gestauchter DMS. Bei dem im Versuch verwendeten Biegebalken sind deshalb sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite jeweils zwei DMS aufgeklebt.

### Versuchsaufbau und -durchführung

#### Aufbau und Kalibrierung der Waage

Zum Aufbau der Waage stehen Ihnen der in einem Stativhalter einseitig eingespannte Biegebalken mit jeweils zwei auf der Ober- und der Unterseite

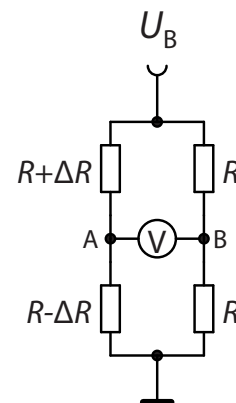


Abbildung 3: Schaltung einer Halbbrücke

aufgeklebten DMS zur Verfügung. Am freien Ende des Biegebalkens ist eine Waagschale befestigt.

Zum Aufbau der Vollbrücke stehen Ihnen ein Steckbrett, entsprechende Verbinders, ein  $10\ \Omega$ - und ein  $11\ \Omega$ -Festwiderstand, ein Messmodul sowie ein  $1\ \text{k}\Omega$ - und ein  $10\ \text{k}\Omega$ -Potentiometer zur Verfügung. Die Schaltung der Vollbrücke ist in Abb. 4 gezeigt. Mit den zusätzlichen Widerständen im linken Brückenarm kann der Offset, der durch die Eigengewichte des Biegebalkens, der Waagschale und der Kabel und Stecker entsteht, ausgeglichen werden. Die Parallelschaltung des  $11\ \Omega$ -Widerstands mit beiden Potentiometern gestattet eine Feineinstellung dieser Widerstandskombination im  $\text{m}\Omega$ -Bereich, wie es in Abb. 5 dargestellt ist. Genau einstellen kann man natürlich nur im flachen Bereich der Kurve.

Das Messmodul besteht aus verschiedenen Einzelmodulen, dessen Verwaltung und Verarbeitung ein auf dem Messmodul befindlicher, programmierter Microcontroller (Arduino-Nano) übernimmt. Im einzelnen besteht das Messmodul aus einem hochempfindlichen Wägezellensensor, einem Drehencoder, einem Grafikdisplay und dem Microcontroller.

Die Betriebsspannung  $U_B$  der Brückenschaltung wird vom Messmodul selbst erzeugt und liegt bei etwa  $3,5\ \text{V}$ . Durch die relativ kleinen Widerstandswerte entsteht bereits bei dieser Spannung eine nicht zu vernachlässigende joulesche Wärme, sodass eine gewisse Zeit nötig ist, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Erwärmung und Wärmeabgabe der Widerstände einstellt. Da die Widerstandswerte temperaturabhängig sind, sollte auch direkte Sonneneinstrahlung auf die Brückenwiderstände vermieden werden.

Die mit der Brücke zu messende Potentialdifferenz zwischen den Punkten A bzw. B liegt im  $\mu\text{V}$ -Bereich und wird direkt an den Eingang des Messmoduls angeschlossen.

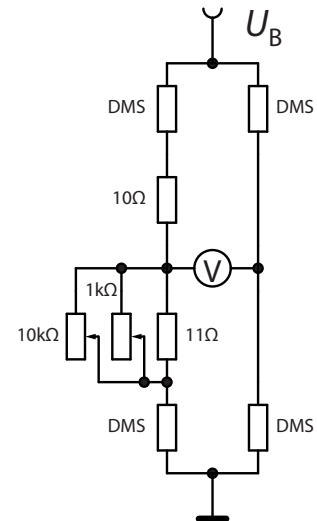


Abbildung 4: Vollbrücke mit vier DMS und Offsetkompensation

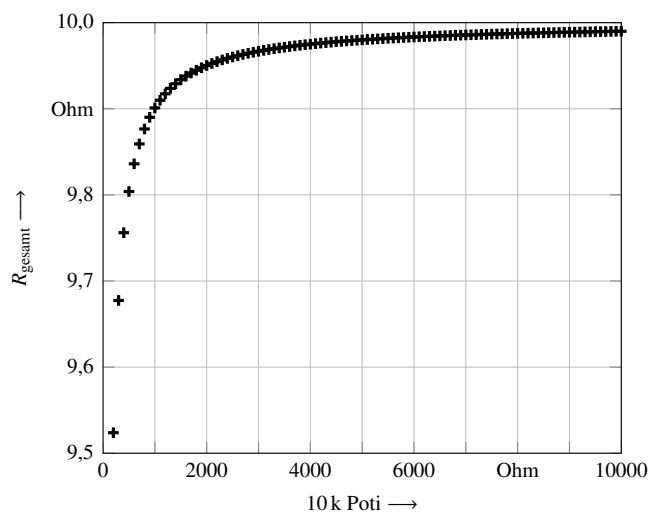


Abbildung 5: Gesamtwiderstand der Parallelschaltung zur Offset-Kompensation in Abhängigkeit vom Widerstandswert des  $10\ \text{k}\Omega$ -Potentiometers (Widerstandswert des  $1\ \text{k}\Omega$ -Potentiometers hier  $110\ \Omega$ )

Nach sorgfältiger Offsetkompensation der Brücke erfolgt die Kalibrierung der Waage<sup>1</sup> mit Massestücken aus einem Wägesatz im Bereich von 1 bis 20 g (in etwa 5 g-Schritten) sowie mit 50 g und 100 g. Die Massestücke sind dabei vorsichtig mit der Pinzette auf die Wägeschale zu legen.

<sup>1</sup> Bei der Kalibrierung der Waage soll zuerst ein 100 g Massestück aus dem Wägesatz verwendet werden. Mit Hilfe des Drehencoders kann dem 100 g Massestück die Maßzahl 100 zugeordnet werden. Danach erfolgt die Überprüfung der Linearität der Anzeige.

### *Aufgabenstellung*

1. Bauen Sie eine Vollbrücke mit den vier DMS auf und korrigieren Sie sorgfältig den Offset.
2. Kalibrieren Sie die Waage mit Hilfe des Drehencoders und einem 100 g Massestück und überprüfen Sie die Linearität der Kalibrierung mit Massestücken aus dem Wägesatz im Bereich von 1 g bis 20 g in 1 g-Schritten sowie für 50 g und 100 g und fertigen Sie bereits während des Versuches eine Kalibrierungskurve auf Millimeterpapier an.
3. Bestimmen Sie die Masse von 5 Probekörpern mit Ihrer Waage.
4. Bestimmen Sie die Dichte des Aluminiumquaders.
5. Tragen Sie die Widerstandsänderung  $\Delta R$  der hier verwendeten DMS in Abhängigkeit von der Belastung  $F$  auf. Der ohmsche Widerstand eines hier verwendeten DMS beträgt im unbelasteten Fall 120 Ohm.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Nehmen Sie, bei einer Belastung von 100 g und einem Ablesewert von 100, eine Spannung von 1 mV an.

### *Hinweise*

- Kontrollieren Sie öfter, auch zwischen verschiedenen Messserien, den Nullpunkt der Waage. Ein stabiler Nullpunkt stellt sich erst ein, wenn ein Temperaturgleichgewicht erreicht ist. Sonneneinstrahlung und Berührung vermeiden.
- Messungen von Massen kleiner 0,5 g sind aufgrund der vorhandenen Spannungsschwankungen zu ungenau. Bei Massen über 200 g ist die Durchbiegung zu groß.