

Einführung in die Sensortechnik (E24NF)

Ziel des Versuches

Im Messalltag verschiedenster wissenschaftlicher Disziplinen ist die Verwendung von Sensoren mit unterschiedlichsten Aufgaben Standard. Gemeinsam ist der technischen Sensorik, dass sie elektronische Komponenten verwendet, die nichtelektrische Messgrößen, wie z. B. Druck, Temperatur, Lichtstärke etc., in elektrische Messgrößen, wie z. B. Spannung umwandelt. Zur Anwendung kommen Sensoren zur Messung und Kontrolle von Veränderungen bei technischen, umweltbezogenen, chemischen oder biologischen Systemen, aber auch in unserem Alltag, wie bei den vielfältigen Funktionen eines Mobiltelefons. In diesem Versuch erfolgt die Umwandlung der nichtelektrischen Messgröße durch eine Änderung des Widerstandes des Sensorelementes. Die Messung von Widerstandsänderungen eines Sensors findet u. A. Anwendung zur Temperatur- und Druckmessung und bei elektronischen Waagen. Letztere Anwendung ist Gegenstand dieses Versuches.

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

ρ = spezifischer Widerstand
 l = Länge
 A = Querschnittsfläche

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

Bei Vernachlässigung des Terms ε^2 , da $\varepsilon \ll 1$ ist, ergibt sich für die durch Dehnung oder Stauchung bedingte Widerstandsänderung

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

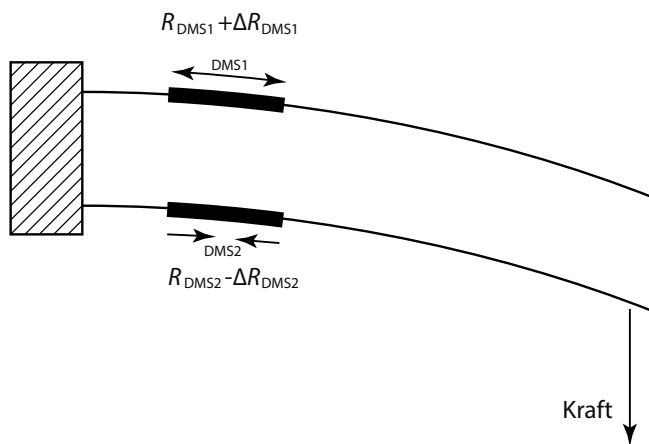
Das Verhältnis zwischen relativer Widerstandsänderung und relativer Längenänderung wird auch als k -Faktor bezeichnet. Dieser k -Faktor hat etwa den Wert zwei.¹ Damit ist eine direkte Umrechnung einer gemessenen Wi-

¹ Bei DMS aus anderen Materialien, z. B. Halbleitern, kann der k -Faktor andere Werte haben.

derstandsänderung 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.

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.



Die maximale Widerstandsänderung eines Standard DMS liegt bei ca. 0,2 %. Bei einem Widerstand von 120 Ohm bedeutet dies eine Widerstandsänderung im milli-Ohm-Bereich, die gemessen werden muss. Zur Bestimmung von unbekanntem Widerständen und kleiner Messwertveränderungen wird eine Schaltung von zwei parallelen Spannungsteilern verwendet. Für einen Spannungsteiler (Abb. 3), bei dem zwei Widerstände in Reihe geschaltet sind gilt: $R_{\text{ges}} = R_2 + R_4$ und mit dem ohmschen Gesetz: $I = \frac{U_0}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_0}{R_2 + R_4}$ betrachtet für den Widerstand R_4 gilt dann: $U_4 = I \cdot R_4 = \frac{U_0 R_4}{R_2 + R_4}$. Der gleiche Zusammenhang gilt auch für R_1 und R_3 .

Die zwei parallelgeschalteten Spannungsteiler (siehe Abb. 4) sind an den Punkten A und B über eine Brücke miteinander verbunden, an der die Spannung U_{AB} gemessen wird. Mit Anwendung der Maschenregel ($\sum U_i = 0$) ergibt sich: $U_{AB} + U_4 - U_3 = 0$ und mit dem Resultat für die Spannung an einem der Widerstände des Spannungsteilers: $U_3 = U_0 \frac{R_3}{R_1 + R_3}$ und $U_4 = U_0 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$. Damit folgt aus der Maschenregel:

$$U_{AB} = U_3 - U_4 = U_0 \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right)$$

Diese Brückenschaltung ermöglicht es, das Verhältnis der Widerstände R_1/R_3 und R_2/R_4 so einzustellen, dass ihr Verhältnis gleich groß ist. Damit folgt $U_{AB} = 0$. Dieses Verfahren nennt man Nullabgleich. Die Empfindlichkeit

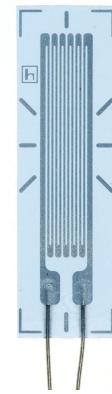


Abbildung 1: Dehnungsmessstreifen, äußere Abmessungen etwa 5 mm x 13 mm

Abbildung 2: Biegebalken zur Kraftmessung

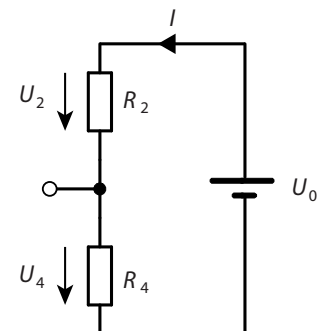


Abbildung 3: Spannungsteiler

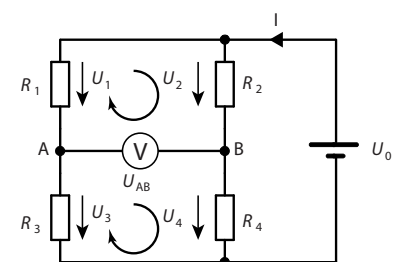


Abbildung 4: Doppelter Spannungsteiler, der einer Brückenschaltung entspricht.

des Systems wird über $k = \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ ausgedrückt.

Ist die Schaltung so eingestellt, dass $U_{AB} = 0$ ist und verändert sich nun einer der Widerstände, z. B. durch Dehnung ($R_3 = R + \Delta R$), dann wird $U_{AB} \neq 0$ und mit $\nu = \Delta R/R$ und k folgt:

$$\frac{U_0}{U_{AB}} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) = \left(\frac{R + \Delta R}{R_1 + (R + \Delta R)} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) = \frac{1 + \nu}{1 + \nu + k} - \frac{1}{1 + k} \approx \nu \frac{k}{(1 + k)^2}$$

für $\nu \ll 1 + k$.

In dem verwendeten Versuchsaufbau werden für die vier Widerstände R_1, R_2, R_3 und R_4 jeweils gleiche DMS verwendet, sodass im Idealfall $R_1 = R_3$ und $R_2 = R_4$ gilt. Für den Fall ist $k = 1$ und es gilt:

$$\frac{U_0}{U_{AB}} = \frac{1}{4}\nu = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

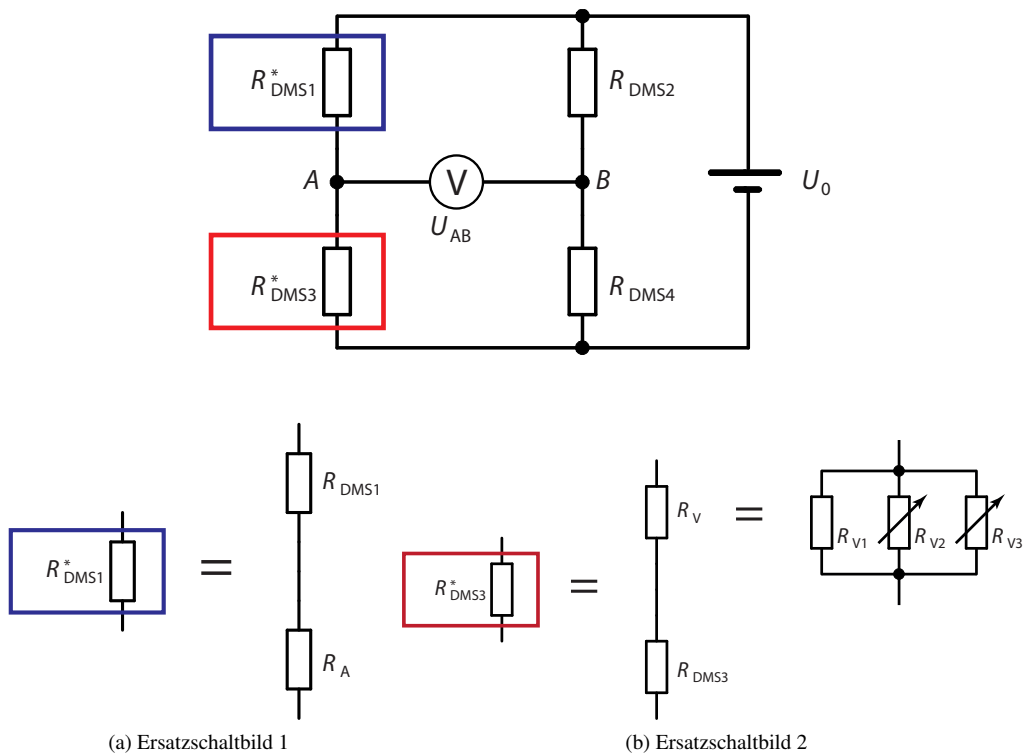


Abbildung 5: Messbrücke

Da sich durch externe Einflüsse der Widerstand aller vier DMS ändern kann ($\Delta R_{DMS1, DMS2, DMS3, DMS4}$) muss die Gleichung erweitert werden zu:

$$\frac{U_0}{U_{AB}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_{DMS3}}{R} - \frac{\Delta R_{DMS1}}{R} - \frac{\Delta R_{DMS4}}{R} + \frac{\Delta R_{DMS2}}{R} \right)$$

In der Realität haben die DMS z. B. aus Produktionsgründen ohne Belastung nicht den exakt gleichen Widerstand R . Da jedoch das Messprinzip darauf beruht und vor Messbeginn, also ohne Gewichtsbelastung, $U_{AB} = 0$ sein soll, muss der Messaufbau derart modifiziert werden, dass es möglich ist zumindest von einem Zweig des Spannungsteilers das Verhältnis der Widerstände einstellen zu können. Daher werden in dem linken Zweig, zusätzlich zu R_{DMS1} der Widerstand $R_A = 10 \Omega$ in Reihe geschaltet und bei R_{DMS3} der veränderbare Widerstand R_V . Für die Anpassung muss R_V in sehr kleinen

Schritten veränderbar sein. Dies wird durch drei parallel geschaltete Widerstände mit $R_{V1} = 11 \Omega$, R_{V2} veränderbar zwischen 0 und 1 k Ω und R_{V3} zwischen 0 und 10 k Ω , realisiert.²

Wird der Nullabgleich mit dieser Schaltung durchgeführt, so muss gelten:

$$\frac{R_1 + R_A}{R_3 + R_V} = \frac{R_2}{R_4}$$

Die Veränderung des Widerstandes der DMS bei Belastung wird anhand der Abweichung von U_{AB} von Null bestimmt. Mit Hilfe einer Kalibrierung, also der Zuordnung von Spannungswerten von U_{AB} zur Belastung des Systems mit bekannten Massen, kann der Aufbau als Waage genutzt werden.

Versuchsaufbau und -durchführung

Aufbau und Kalibrierung der Waage

Zum Aufbau der Waage steht Ihnen ein, in einem Stativhalter einseitig eingespannter, Biegebalken mit jeweils zwei auf der Ober- und der Unterseite aufgeklebten DMS zur Verfügung. Am freien Ende des Biegebalkens ist eine Waagschale befestigt.

Zum Aufbau der Brückenschaltung nutzen Sie das Steckbrett, entsprechende Verbinder, ein 10 Ω - und ein 11 Ω -Festwiderstand, ein Messmodul sowie ein 1 k Ω - und ein 10 k Ω -Potentiometer (veränderbarer Widerstand). Die Schaltung ist in Abb. 6 gezeigt.

Das Messmodul besteht aus verschiedenen Einzelmodulen, dessen Verwaltung und Verarbeitung ein auf dem Messmodul befindlicher, programmierter Microcontroller (Arduino-Nano) übernimmt.

Die Betriebsspannung U_0 der Brückenschaltung wird vom Messmodul selbst erzeugt und liegt bei etwa 3,5 V. Die relativ kleinen Widerstandswerte können bereits bei dieser Spannung eine nicht zu vernachlässigende joulesche Wärme abgeben, 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 U_{AB} zwischen den Punkten A bzw. B liegt im μ V-Bereich und wird direkt an den Eingang des Messmoduls angeschlossen.

Nach Durchführung des Nullabgleichs der Brückenschaltung erfolgt die Kalibrierung der Waage. Der Mikrocontroller verarbeitet das Spannungssignal U_{AB} derart, dass es um einen Faktor verstärkt wird. Dieser Verstärkungsfaktor kann am Mikrocontroller so eingestellt werden, dass bei einer Belastung mit z. B. 100 g die Maßzahl 100 angezeigt wird. Diesen Faktor könnte man jedoch auch so einstellen, dass Anstelle des Gewichts die Gewichtskraft mit $m \cdot g = 9,81$ als Maßzahl am Mikrocontroller ausgegeben wird und dann nicht die Einheit Gramm, sondern Newton besitzt.

² Für den Gesamtwiderstand R_V gilt bei Parallelschaltung von Widerständen: $\frac{1}{R_V} = \frac{1}{R_{V1}} + \frac{1}{R_{V2}} + \frac{1}{R_{V3}}$

R_{V2} in kOhm	R_{V3} in kOhm	R_V in Ohm
0,01	0,1	4,98
0,1	1	9,81
0,5	5	10,74
1	10	10,87

Tabelle 1: Beispieltabelle zum sich ergebenden Gesamtwiderstand

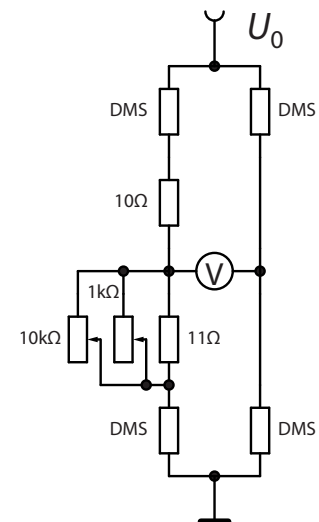


Abbildung 6: Schaltplan für die vier DMS mit Offsetkompensation

Aufgabenstellung

1. Bauen Sie die Brückenschaltung mit den vier DMS auf und führen Sie sorgfältig den Nullabgleich durch.
2. Kalibrieren Sie die Waage mit Hilfe des Mikrocontrollers und einem 100 g Massestück. Überprüfen Sie die Linearität der Kalibrierung mit Massestücken aus dem Wägesatz im Bereich von 1 g bis 10 g in 1 g-Schritten und bis 20 g in 5 g Schritten (Massestücke vorsichtig mit der Pinzette auf die Wägeschale legen), sowie für 50 g und 100 g durch Bestimmung der Maßzahl des Mikrocontrollers. 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.

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.