



# Anleitung zum Versuch Dehnungsmessung

5. Oktober 2023

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	1
2.1. Verformung infolge Querkraftbiegung . . . . .	2
2.1.1. Biegespannung . . . . .	2
2.1.2. Querkraftschubspannung . . . . .	2
2.2. Dehnungsmessstreifen . . . . .	3
2.3. Wheatstone'sche Messbrücke . . . . .	4
2.4. Analog-Digital-Wandler/Messverstärker . . . . .	6
3. Versuchsaufbau	7
4. Versuchsanleitung	10
4.1. Theoretisches Referenz-Modell . . . . .	10
4.2. Charakterisierung der DMS ohne Belastung . . . . .	10
4.3. Vergleich von Viertel- und Voll-Messbrücke bei Belastung . . . . .	11
4.4. Temperaturkompensation . . . . .	11
A. Technische Zeichnung	13
B. Datenblatt Verstärker HX711	14
C. Datenblatt Dehnungsmessstreifen	15
D. Datenblatt Blechstreifen (AlMg3)	16

## 1. Einleitung

Dehnung wird meist gemessen, um den Grad der Beanspruchung eines Bauteils zu bestimmen. Eine etablierte Möglichkeit die Messung vorzunehmen, ist der Einsatz von Dehnungsmessstreifen (DMS), die die Dehnung des Bauteils zerstörungsfrei aufnehmen können. DMS sind somit Teil unzähliger strukturellen Test- und Überwachungsanwendungen. Dazu zählt nicht nur die Lebensdauerprüfung von Strukturkomponenten beispielsweise in der Automobil- und Schienenfahrzeugindustrie, sondern auch Statik- und Ermüdungstests. In der erneuerbaren Energiebranche werden DMS zur Prüfung der strukturellen Leistung von Windturbinenblättern und -lagern sowie zu deren Zustandsüberwachung eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete finden sich unter anderem in der Überwachung von Bauwerken (Brücken, Tunnel, Dämme) und größeren Anlagen (Öl- und Gaspipelines, Kernkraftwerke) sowie der Medizintechnik (präzise Bewegung von CT-Bildverarbeitungssystemen, Patientenliftsysteme, medizinische Wägetechnik). Im Alltag können DMS bspw. in Küchen- oder Personenwaagen gefunden werden <sup>1</sup>.

In den Bauteilen und Anlagen werden die DMS als Sensoren verbaut. Dabei kann nicht nur die Dehnung ermittelt, sondern auch Größen wie Kraft, Masse, Drücke und Drehmomente bestimmt werden. Aus den so erhaltenen Daten kann wiederum die mechanische Spannung im Bauteil berechnet werden, sodass Rückschlüsse auf dessen Beanspruchung möglich sind. Aus diesem Grund sind DMS in der Spannungsanalyse von großer Bedeutung. Durch ihren Einsatz können die Ergebnisse numerischer Simulationen überprüft und die Beanspruchung von Bauteilen in Echtzeit überwacht werden. Das ermöglicht es die Gestaltung von Bauteilen zu optimieren und diese sowie ganze Prozesse sicherer zu gestalten.

In diesem Praktikum lernen Sie, wie man mit DMS und unter Verwendung einer Wheatstone'schen Messbrücke, sowie dem Arduino die Dehnung eines Bauteils misst. Damit Sie die Ergebnisse der experimentellen Versuche beurteilen können, benötigen Sie Referenzwerte, die im ersten Schritt (Kapitel 4.1) anhand eines theoretischen Modells berechnet werden. Als nächstes charakterisieren Sie das Messsystem im unbelasteten Zustand (Kapitel 4.2). Dies ist notwendig, da in der Realität nie perfekte Bedingungen vorliegen. Die Wheatstone'sche Messbrücke wird voraussichtlich auch im undeformierten Zustand nicht abgeglichen sein, sondern bereits ein Messsignal  $U_d \neq 0$  liefern. Durch die Charakterisierung erhalten Sie die Information darüber, wie groß der Offset ist. Anschließend führen Sie eine Messreihe durch, bei der das Bauteil definiert belastet wird (Kapitel 4.3) und berechnen daraus die im Bauteil wirkende Spannung. In den letzten beiden Aufgaben (Kapitel ?? und 4.4) werden Störeinflüsse identifiziert und deren Auswirkungen auf die Messung untersucht.

## 2. Theoretische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln sind alle Grundlagen zusammengefasst, die für die erfolgreiche Bearbeitung des Praktikums notwendig sind. Dabei geht es einerseits um die theoretische Berechnung des Spannungszustands eines Bauteils, aber auch um den Aufbau von DMS und der Wheatstone'schen Messbrücke sowie der Funktionsweise des einzusetzenden Analog-Digital-Wandlers.

---

<sup>1</sup>Mit dem Arduino kann sehr einfach eine eigene Waage nachgebaut werden. Anleitungen findet man frei verfügbar bei Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=sxzoAGf1k0o> oder auf diversen Blogs <https://makersportal.com/blog/2019/5/12/smartphone-arduino-weighing-scale-with-load-cell-and-hx711>.

## 2.1. Verformung infolge Querkraftbiegung

Im Praktikum soll ein Bauteil untersucht werden, das mit einer Querkraft, einer Kraft senkrecht zur Achse, belastet wird. Aus dieser Belastung resultieren Spannungen, die berechnet werden müssen, um den theoretischen Spannungszustand bzw. die Dehnung im Bauteil zu bestimmen. Den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung liefert das Hook'sche Gesetz  $\sigma = E\varepsilon$ .

### 2.1.1. Biegespannung

Wird ein Balken<sup>2</sup> mit einer Querkraft belastet, resultiert daraus eine in Balkenachsenrichtung  $z$  orientierte Normalspannung, die sogenannte Biegespannung (vgl. Abbildung 2.1).

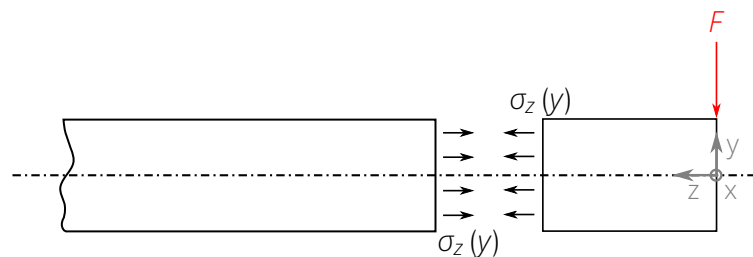


Abbildung 2.1: Biegespannung

Bei einer geraden Biegung um die  $x$ -Achse kann die Biegespannung mit dem Biegemoment  $M_b$ , dem Flächenträgheitsmoment  $I_{xx}$  und der Koordinate  $y$  berechnet werden:

$$\sigma_z = \frac{M_b}{I_{xx}} \cdot y \quad (2.1)$$

In Gleichung 2.1 ist zu erkennen, dass der Betrag der Biegespannung in  $y$ -Richtung nicht konstant über den Querschnitt wirkt. Aufgrund der Biegebeanspruchung erfährt der Balken auf einer Seite Zugspannung und auf der anderen Druckspannung. Der Verlauf der Biegespannung läuft, unter den gewählten Voraussetzungen, linear von der maximalen Zug- zur maximalen Druckspannung. Die spannungsfreie Linie, an der die Zugspannung in die Druckspannung übergeht heißt neutrale Faser. Wirken keine zusätzlichen Normalspannungen auf den Balken, liegt die neutrale Faser in der Balkenmitte und die Zug- sowie Druckspannungen haben denselben Betrag.

### 2.1.2. Querkraftschubspannung

Schubspannungen werden in Balken nicht nur durch Querkräfte sondern auch durch Torsionsmomente hervorgerufen. Da in diesem Praktikum der Lastfall Torsion jedoch nicht vorliegt, wird in der Anleitung nicht darauf eingegangen. Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass der Querschnitt des Balkens in Längsrichtung konstant ist. Die Querkraftschubspannung ist eine im Querschnitt, in Richtung der Belastung wirkende Spannung (vgl. Abbildung 2.2).

<sup>2</sup>Es wird vorausgesetzt, dass Balken schlank sind. Die Querschnittsabmessungen müssen wesentlich kleiner sein, als die Balkenlänge. Der Balkentheorie liegen außerdem vereinfachende Annahmen, die sogenannten Bernoulli-Hypothesen, zugrunde: 1. Senkrecht bleiben der Querschnitte – Balkenquerschnitte die vor der Biegung senkrecht zur Balkenachse standen, stehen auch senkrecht auf der deformierten Balkenachse. 2. Ebenbleiben der Querschnitte – die Querschnitte bleiben auch nach der Deformation eben und verwölben sich nicht.

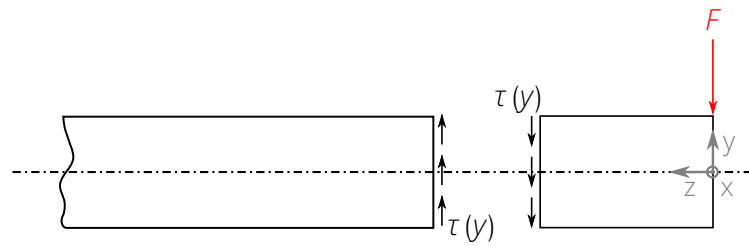


Abbildung 2.2: Schubspannung

Die Schubspannung  $\tau(y)$  kann wie folgt berechnet werden:

$$\tau(y) = \frac{Q_y S_x(y)}{I_{xx} b(y)} \quad (2.2)$$

Dabei ist  $Q_y$  die Querkraft,  $S_x(y)$  das statische Moment,  $I_{xx}$  das Flächenträgheitsmoment bzgl.  $x$  und  $b(y)$  die Breite. Das statische Moment ist als Integral über die Querschnittsfläche definiert:

$$S_x(y) = \int_{y_0}^{\tilde{y}} y \, dA \quad (2.3)$$

Wobei  $y_0$  die  $y$ -Koordinate des unteren Rands beschreibt und  $\tilde{y}$  die Laufkoordinate in  $y$ -Richtung.

Bei einem rechteckigen Querschnitt gilt  $b(y) = b$ , da die Breite hier über  $y$  konstant ist. Außerdem vereinfacht sich das Flächenintegral zu

$$S_x(y) = \int_{y_0}^{\tilde{y}} y b \, dy. \quad (2.4)$$

## 2.2. Dehnungsmessstreifen

In Abbildung 2.3a ist ein klassischer, linearer Folien-Dehnungsmessstreifen abgebildet, wie er auch auf dem im Praktikum verwendeten Bauteil angebracht ist. Dieser ist darauf ausgelegt die mechanische Dehnung, die in Längsrichtung seines Messgitters auftritt, zu messen. Neben den Linear-DMS gibt es inzwischen eine Vielzahl von Messgitterformen. So könne beispielsweise mehrdimensionale Spannungszustände erfasst (vgl. Abbildung 2.3b) und Scherspannungen direkt aufgenommen werden (vgl. Abbildung 2.3c).

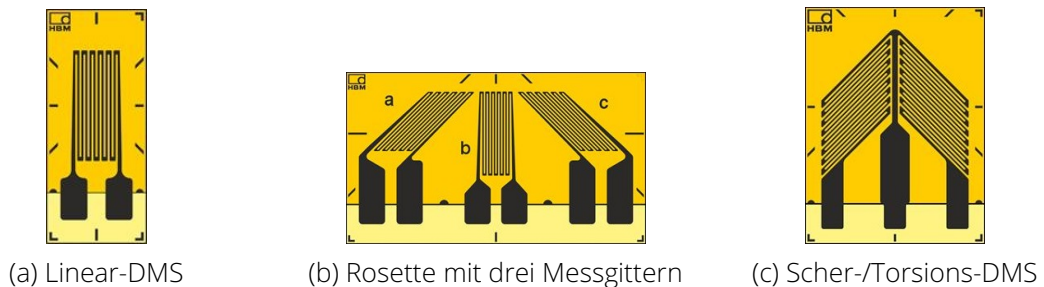


Abbildung 2.3: Verschiedene Geometrien von Dehnungsmessstreifen

Das Prinzip der DMS besteht darin, dass ein elektrischer Leiter auf der Oberfläche des Messobjekts befestigt wird. Bei Verformung, erfährt der Leiter nun dieselbe Dehnung wie die Oberfläche des Objekts. Der Widerstand eines Leiters ist über den spezifischen Widerstand  $\rho$ , die Länge  $l$  und die Querschnittsfläche  $A$  definiert. Für kreisförmige Querschnitte folgt daraus:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi} \quad (2.5)$$

Wird der Leiter gedehnt, vergrößert sich die Länge des Leiters, während der Durchmesser  $D$  kleiner wird. Folglich erhöht sich dessen Widerstand<sup>3</sup>.

DMS wandeln somit die mechanische Größe ‚Dehnung‘, in ein elektrisches Signal um. Um den Effekt zu verstärken, wird der Leiter in mehreren Windungen (Mäander-Gitter) auf einer Messgitterfolie aufgebracht. Der Widerstand, den ein DMS in nicht deformiertem Zustand besitzt, wird Nennwiderstand genannt.

### 2.3. Wheatstone'sche Messbrücke

Ein Widerstand bzw. die Änderung eines Widerstands kann nicht direkt gemessen werden. Die Widerstandsbestimmung erfolgt stattdessen über die Messung des Stroms oder der Spannung. Mittels der Wheatstone-Brücke wird die Widerstandsänderung der DMS in eine Spannungsänderung überführt, die einfach gemessen werden kann. Dieses Messprinzip wird auch im Praktikum in verschiedenen Variationen angewendet.

In Abbildung 2.4 ist die übliche rhombusartige Darstellung der Wheatstone'schen Brückenschaltung zu sehen. Die beiden Zweige der Brückenschaltung werden durch die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ , sowie  $R_3$  und  $R_4$  gebildet. Die Eckpunkte 2 und 3 sind die Anschlüsse für die Versorgungsspannung  $U_0$ , während an den Punkten 1 und 4 die Diagonalspannung  $U_d$  gemessen wird.

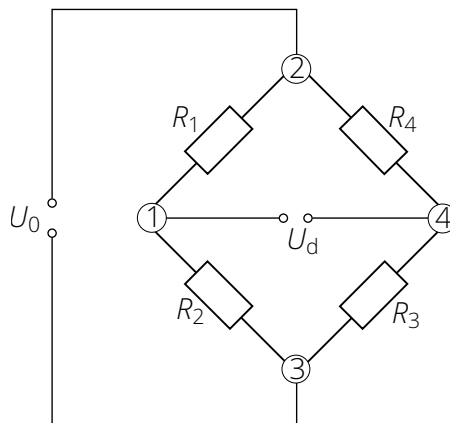


Abbildung 2.4: Schaltplan einer Wheatstone-Brücke

Wird die Wheatstone'sche Messbrücke zur Bestimmung eines unbekannten Widerstands verwendet, wird die Abgleichmethode angewandt. Dabei werden die bekannten Widerstände so lange angepasst, bis  $U_d = 0$  ist. Die Bedingungen für abgeglichene Brücken werden im Anschluss hergeleitet.

<sup>3</sup>Bei DMS mit metallischen Leitern (bspw. aus Konstantan) dominiert dieser Effekt. In Halbleiter-DMS (bspw. aus Silizium) ist die Änderung des elektrischen Widerstands aufgrund des piezoresistiven Effekts jedoch deutlich ausgeprägter als durch die Geometrieänderung (Faktor 4 bis 90). Der spezifische Widerstand ändert sich hier aufgrund der Verformung des Halbleiterkristalls. Dabei wird der Abstand zwischen den Atomen verändert, wodurch es abhängig von Material und Verformung einfacher bzw. schwieriger wird, Elektronen in das Leitungsband zu heben. Wegen dieses Effekts haben Halbleiter-DMS eine wesentlich höhere Empfindlichkeiten als Metall-DMS. Nachteilig ist jedoch die große Temperaturabhängigkeit der Halbleiter-DMS, sowie deren nicht-lineare Kennlinie. Deshalb ist der Messbereich von Halbleiter-DMS auf kleinere Dehnungen als bei Metall-DMS beschränkt.

## 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Versuch soll jedoch die vorliegende Dehnung der DMS bestimmt werden. Dafür wird statt der Abgleich- die Ausschlagsmethode verwendet, bei der über die Änderung der Diagonalspannung die Dehnung der DMS berechnet wird. Mit dem Maschensatz erhält man den Zusammenhang

$$U_d = U_1 - U_4. \quad (2.6)$$

$U_1$  und  $U_4$  können wiederum mit der Regel für Spannungsteiler bestimmt werden:

$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ und } U_4 = U_0 \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.7)$$

Setzt man die beiden Gleichungen aus 2.7 in Gleichung 2.6 ein, folgt daraus

$$\frac{U_d}{U_0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.8)$$

Aus Gleichung 2.8 können die Bedingungen für einen Brückenabgleich abgeleitet werden:

- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ,
- $R_1 = R_2$  und  $R_3 = R_4$  oder
- $R_1/R_2 = R_4/R_3$

Lässt man jedoch Widerstandsänderung  $\Delta R_i$ , wie sie beim Messen mit DMS auftreten, zu, kann Gleichung 2.8 in folgenden Ausdruck überführt werden:

$$\frac{U_d}{U_0} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.9)$$

Merkregel: In Wheatstone'schen Messbrücken werden Widerstandsänderungen „benachbarter“ Widerstände subtrahiert und „diagonal gegenüberliegende“ Widerstände addiert.

Die Dehnung der DMS setzt sich aus der Längsverformung  $\varepsilon = \Delta l/l$ , der Querverformung  $-\nu\varepsilon = \Delta d/d$  und der relativen Änderung des spezifischen Widerstands  $\pi_l E \varepsilon = \Delta \rho/\rho$  zusammen:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.10)$$

Dabei bezeichnet  $d$  den Durchmesser des Leiters,  $\rho$  dessen spezifischen Widerstand,  $\nu$  die Querkontraktionszahl,  $\pi_l$  den Piezoresistiven Koeffizienten und  $E$  den Elastizitätsmodul. Somit gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon + 2\nu\varepsilon + \pi_l E \varepsilon = \varepsilon (1 + 2\nu + \pi_l E) \quad (2.11)$$

Aus Gleichung 2.11 wird der  $k$ -Faktor  $k = 1 + 2\nu + \pi_l E$  (engl.: „gauge factor“ oder „sensitivity coefficient“) abgeleitet. Der  $k$ -Faktor ist ein Proportionalitätsfaktor zwischen der gemessenen Dehnung und der relativen Änderung der Spannung in der Wheatstone-Brücke. Ein hoher  $k$ -Faktor erhöht das Ausgangssignal, während ein niedriger  $k$ -Faktor das Signal verkleinert. Der  $k$ -Faktor hängt vom Messgitterwerkstoff ab und liegt für Metalle bei etwa 2,0. Damit ergibt sich die Brückengleichung:

$$\frac{U_d}{U_0} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.12)$$

## 2.4. Analog-Digital-Wandler/Messverstärker

Um eine analoge Größe digital zu erfassen, weiter zu verarbeiten und auszuwerten, müssen die Messwerte diskretisiert werden. Dabei wird das kontinuierliche analoge Signal in eine zeit- und wertdiskrete Folge von Werten umgewandelt.

Der Arduino Uno besitzt einen eingebauten 10 Bit (1024 digit) Analog-Digital-Wandler (analog-digital-converter, ADC). Das bedeutet, dass der Arduino Uno die Werte in einem Messbereich von 0 V bis 5 V mit einer Genauigkeit von  $5\text{ V}/1024\text{ digit}$  auflösen kann. Der kleinste auflösbare Schritt beträgt somit  $4,9\text{ mV digit}^{-1}$ . Kleinere Änderungen werden durch diesen ADC nicht abgebildet. Da die Änderungen der Diagonalspannung in der Wheatstone'schen Messbrücke jedoch häufig in der Größenordnung von 0,1 mV liegen, muss ein Messverstärker mit einem höher auflösenden ADC verwendet werden, um diese Signale zu erfassen.

Im Praktikum wird das Bauteil HX711 genutzt, das das Analogsignal gleichzeitig diskretisiert und verstärkt. Ein Auszug aus dem Datenblatt, sowie der Link zur vollständigen Dokumentation sind in Anhang B zu finden. Der HX711, der in Abbildung 2.5 zu sehen ist, bietet einen 24 Bit ADC im Messbereich  $\pm 20\text{ mV}$ . Damit liegt die maximale Auflösung bei  $40\text{ mV}/2^{24}\text{ digit}$  bzw.  $2,3842 \cdot 10^{-6}\text{ mV digit}^{-1}$  und ist somit ausreichend genau. Im Folgenden werden die Funktionen der einzelnen Anschlüsse näher erläutert.

Über GND wird der Anschluss zur Vergleichsspannung „Masse“ (engl. „ground“) sichergestellt. Der DT-Pin (Data-Pin) überträgt die diskretisierten Messdaten - in diesem Fall - an den Arduino. Über die Verbindung mit der SCK Schnittstelle werden sogenannte „clock signals“ an den Arduino gesandt. Das clock signal oszilliert zwischen den Werten „high“ und „low“. Es kann als eine Art Metronom verstanden werden, dessen Takt die Digitalschaltung folgt und so den Ablauf der einzelnen Operationen koordiniert. Der VCC-Pin (voltage at the common collector) dient der Spannungsversorgung.

Die Anschlüsse auf der linken Seite bilden die Schnittstelle zur Wheatstone-Brücke. In Abbildung 2.6 ist zu erkennen, wie die Eckpunkte der Brücke angeschlossen werden müssen. Über E+ und E- liegt die Versorgungsspannung an. Das E steht dabei für „excitation“. Bei anderen Herstellern können auch die Bezeichnungen VCC für E+ und GND für E- auftreten. Die Diagonalspannung fällt über die Anschlüsse A- und A+ ab. A steht hierbei für „amplifier“. Alternativ werden auch die Bezeichnungen  $O_{\pm}$  (output) oder  $S_{\pm}$  (signal) verwendet.

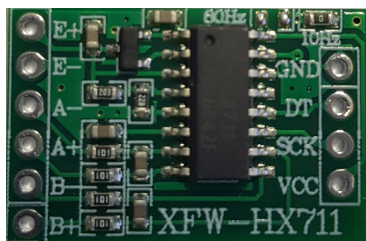


Abbildung 2.5: HX711  
Messverstärker

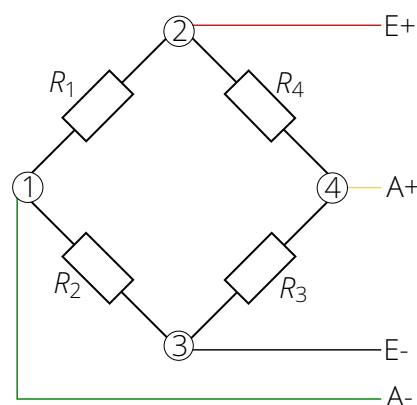


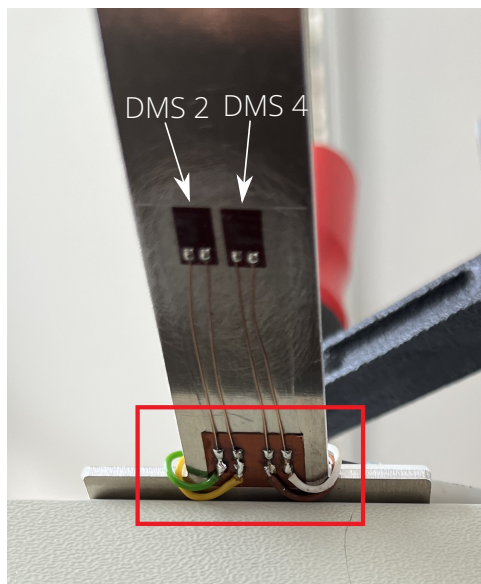
Abbildung 2.6: Anschluss der  
Wheatstone-Brücke an den Messverstärker

Werden die Kabel zwischen E+ und E- oder A+ und A- vertauscht, kehrt sich lediglich das Vorzeichen um.

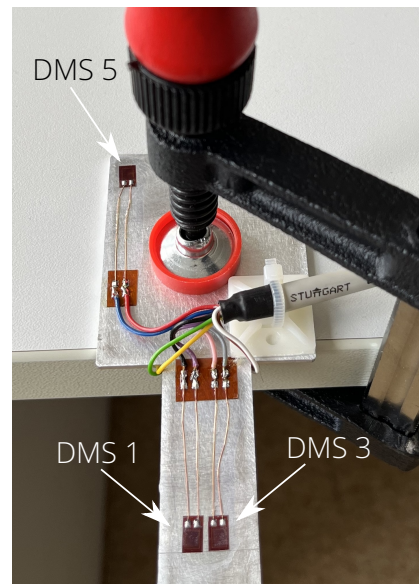
## 3. Versuchsaufbau

Für die Durchführung des Praktikums müssen die DMS über das Breadboard mit dem Verstärker und dem Arduino verbunden werden. Im ersten Schritt wird das Bauteil richtig positioniert und befestigt. Das Blech mit den aufgeklebten DMS wird so an die Tischkante angelegt, dass der Steg darüber hinausragt und das T-Stück annähernd bündig an der Tischkante abschließt. Achten Sie darauf, dass die Kabel auf der Unterseite des Blechs nicht eingeklemmt werden (vgl. Abbildung 3.1a). Das Blech wird mit der Schraubklemme fixiert. Lassen Sie dabei ausreichend viel Abstand zu den DMS, den Kabeln und den Lötstützstellen (vgl. Abbildung 3.1b). Jeder DMS besitzt zwei Kabel. Über die farbige Codierung kann der zugehörige Stecker zugeordnet werden:

- DMS 1: schwarz - lila
- DMS 2: grün - gelb
- DMS 3: rosa - grau
- DMS 4: braun - weiß
- DMS 5: blau - rot



(a) Ansicht von unten



(b) Ansicht von oben

Abbildung 3.1: Einspannung des Bauteils

Während der Messwerterfassung in Abhängigkeit unterschiedlicher Belastungen wird an der Bohrung ein Faden befestigt, über den mithilfe von Gewichten eine Kraft aufgebracht werden kann. Damit ist die Bohrung der Krafteinleitungspunkt.

Für die Durchführung des Praktikums benötigen Sie außerdem:

- Arduino (mit USB-Kabel)
- Breadboard
- Verstärker HX711
- 16 Kabel (MM)



### 3. Versuchsaufbau

Wie der Anschluss des Verstärkers an den Arduino und die Wheatstone'sche Messbrücke vorgenommen wird, wurde bereits in Kapitel 2.4 erläutert, kann jedoch noch einmal am Schaltplan in Abbildung 3.2 nachvollzogen werden. Dort ist der Aufbau einer Viertel-Brücke zu sehen, bei der nur eine der vier Positionen mit einem aktiven DMS besetzt ist. Beachten Sie, dass die dort abgebildeten Widerstände nicht den richtigen Wert für eine abgeglichene Brücke besitzen.

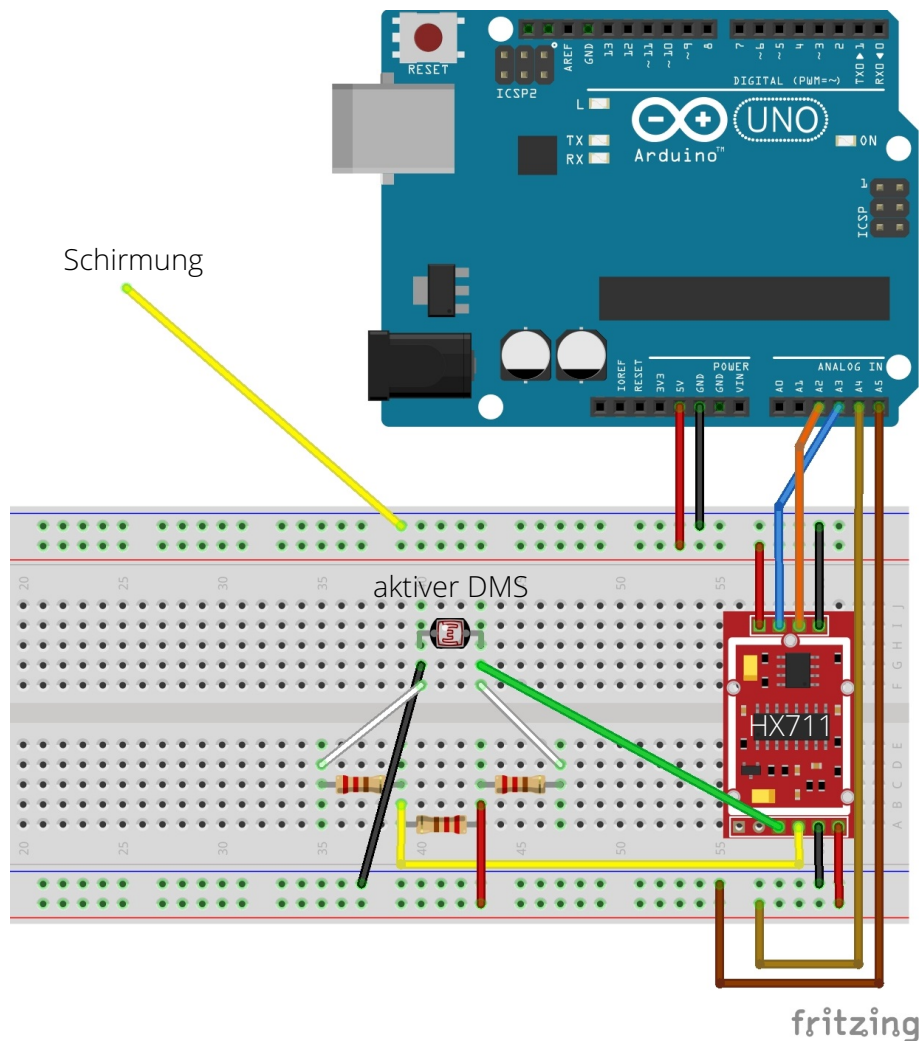


Abbildung 3.2: Schaltplan für eine Viertel-Brücke

Die Schirmung ist ein einzelnes Kabel, das auf Ground gelegt wird. Durch die Schirmung wird die Signalübertragung vor elektromagnetischen Einstreuungen und Interferenzen geschützt. Der Clock-Ausgang wird mit dem A3-Pin verbunden und der Data-Ausgang mit A2. Als Speisespannung wird am Arduino 5V gewählt. Über die analogen Eingänge A4 und A5 wird die tatsächlich an der Wheatstone'schen Brücke anliegende Versorgungsspannung gemessen. Um eine stabile Verbindung zu gewährleisten, wird der Verstärker über die Pins in der Breadboard gesteckt. Die Rückseite zeigt dabei nach oben. Der Korrekte Aufbau ist in Abbildung 3.3 zu sehen.

Soll eine Voll-Brücke aufgebaut werden, müssen lediglich die Widerstände durch die richtigen DMS ersetzt werden. Der Widerstandswert in Ohm kann über den darauf befindlichen Farbcode bestimmt werden. Dabei kann Tabelle 1 zu Hilfe genommen werden.

Bei Widerständen mit 4 Ringen bilden die ersten beiden Ringe den Wert und der dritte Ring ist der Multiplikator. Der vierte Ring kennzeichnet dabei die Toleranz. Bei Widerständen mit 5 Ringen sind die ersten drei Ringe der Wert, während der vierte Ring der Multiplikator und

### 3. Versuchsaufbau

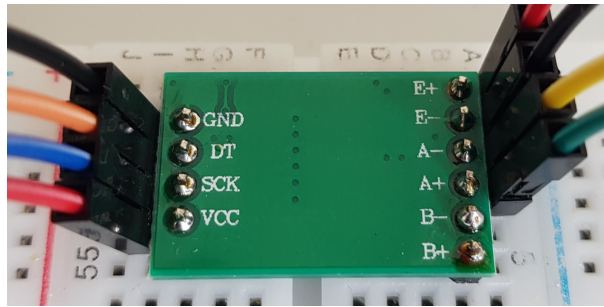


Abbildung 3.3: Verstärker auf dem Breadboard

Tabelle 1: Widerstandsbestimmung für Widerstände mit bis zu 5 Ringen

Ringfarbe	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring (Multiplikator)	5. Ring (Toleranz)
schwarz	0	0	0	-	-
braun	1	1	1	x 10	1,00 %
rot	2	2	2	x 100	2,00 %
orange	3	3	3	x 1.000	-
gelb	4	4	4	x 10.000	-
grün	5	5	5	x 100.000	0,50 %
blau	6	6	6	x 1.000.000	0,25 %
violett	7	7	7	x 10.000.000	0,10 %
grau	8	8	8	-	-
weiß	9	9	9	-	-
gold	-	-	-	x 0,1	5,00 %
silber	-	-	-	x 0,01	10,00 %

der fünfte Ringe die Toleranz angibt. Zu Beginn der Widerstandsbestimmung muss die Anzahl der Farbringe bestimmt werden. Kohleschichtwiderstände haben üblicherweise 4 Ringe, Metallschichtwiderstände meist 5 Ringe. Anschließend muss festgestellt werden, welcher Ring der erste ist. Häufig ist es dabei jedoch einfacher zu identifizieren, welcher Ring der letzte ist. Der letzte Ring ist der Toleranzring, welcher angibt, um wie viel Prozent der bestimmte Widerstandswert maximal vom tatsächlichen Widerstandswert abweichen darf. Der Toleranzring hat einen größeren Abstand zum Körperende. Anschließend kann der Widerstandswert zusammengesetzt werden. Am deutlichsten wird das Verfahren an einem Beispiel:

- Kohleschichtwiderstand (4 Ringe): braun - schwarz - rot - gold
- Metallschichtwiderstand (5 Ringe): rot - violett - schwarz - braun - braun

Für den Kohleschichtwiderstand ergibt sich ein Widerstand von  $1000 \Omega \pm 5 \%$ . Bei dem Metallschichtwiderstand kann ein Widerstandswert von  $2700 \Omega \pm 1 \%$  bestimmt werden.

Ihnen wird außerdem das Arduino-Script *Praktikum\_DM\_hx711.ino* über OPAL zur Verfügung gestellt. Darin wird die Bibliothek „HX711 Arduino Library“ von Bogdan Necula verwendet, mit der das Signal des HX711 ausgelesen werden kann. Bevor Sie das Script verwenden, müssen Sie diese Bibliothek installieren. Die Messdaten können über die Schnittstelle „Serieller Monitor“ ausgegeben und so in ein Auswertungsprogramm (Excel, Python etc.) überführt werden. Eine ausführliche Anleitung zur Verwendung des Arduinos und der Arduino IDE ist in dem Dokument „Anleitung\_Arduino.pdf“ zu finden.

## 4. Versuchsanleitung

### 4.1. Theoretisches Referenz-Modell

Ziel: Die theoretischen Werte werden ermittelt, um die experimentellen Ergebnisse aus Aufgabe 4.3 auf Plausibilität und mögliche Fehler zu überprüfen.

Aufgabenstellung:

1. Mit welchem einfachen, mechanischen Modell lässt sich dieser Aufbau beschreiben? Fertigen Sie eine Skizze des Modellsystems und des Querschnitts an. Tragen Sie alle notwendigen Maße und Lasten ein. Achten Sie dabei auf übereinstimmende Koordinatensysteme.
2. Fertigen Sie eine Skizze für den Freischnitt des Systems an und bestimmen Sie die Schnittgrößen bei einer Belastung mit der Kraft  $F$ .
3. Stellen Sie die Formel für die Biegespannung auf. Bestimmen Sie Ort und Betrag der maximalen Biegespannung. Zeichnen Sie den Biegemomentenverlauf, sowie den Verlauf der Biegespannung.
4. Stellen Sie die Formel für die Querkraftschubspannung auf. Bestimmen Sie Ort und Betrag der maximalen Querkraftschubspannung. Zeichnen Sie den Verlauf der Querkraft und Querkraftschubspannung.
5. Welche der beiden auftretenden Spannungen ist größer? Welche Dehnung kann folglich mit DMS gemessen werden und warum?
6. Berechnen Sie das maximale Gewicht, das Sie an das Bauteil hängen dürfen, bevor die Spannungen im Querschnitt so groß sind, dass es sich plastisch verformt. Verwenden Sie die Materialkennwerte aus dem Datenblatt im Anhang D. Belasten Sie das Bauteil, unabhängig von Ihrem Ergebnis, mit maximal 500g!

### 4.2. Charakterisierung der DMS ohne Belastung

Ziel: Der tatsächliche Widerstand der DMS weicht immer vom Nennwiderstand ab. Daraus folgt, dass die Wheatstone'sche Messbrücke selbst im unbelasteten Zustand nicht abgeglichen und die Diagonalspannung dementsprechend ungleich Null ist. Diese Verschiebung wird Offset oder auch Baseline genannt. Um die Verschiebung zu bestimmen, muss das Verhalten des Systems charakterisiert werden, indem die Messsignale der DMS ohne Belastung aufgenommen und verglichen werden.

Durchführung: Bauen Sie die Schaltung für eine Viertel-Messbrücke entsprechend dem Schaltplan in Abbildung 3.2 auf. Wählen Sie aus dem Koffer die passenden Widerstände für die Brückenschaltung aus. Der Nennwiderstand der DMS kann dem Datenblatt in Anhang C entnommen werden. Öffnen Sie anschließend das Programm *Praktikum\_DM\_hx711.ino* in der Arduino IDE und installieren Sie alle fehlenden Bibliotheken. Verbinden Sie nun den Arduino mit dem Computer und führen Sie das Programm aus. Messen Sie die Diagonalspannung des DMS für 60 s. – Führen Sie diesen Versuch für alle DMS durch.

Auswertung:

1. Stellen Sie alle zeitlichen Verläufe der relativen Diagonalspannung ( $U_d/U_0$  in mV/V) im selben Diagramm dar.

2. Bilden Sie den Mittelwert der relativen Diagonalspannung und berechnen Sie daraus den Widerstand der DMS.
3. Beschreiben und erklären Sie Ihre Beobachtungen.

### 4.3. Vergleich von Viertel- und Voll-Messbrücke bei Belastung

Ziel: In dieser Aufgabe wird die Stabilität des Ausgangssignals in Abhängigkeit der Belastung und der verwendeten Schaltung (Viertel- oder Vollmessbrücke) untersucht. Anschließend wird die Plausibilität der Ergebnisse, durch einen Vergleich der experimentell ermittelten Dehnung mit der theoretischen Dehnung, überprüft.

Durchführung: Befestigen Sie ein Behältnis an der Bohrung. Nehmen Sie zu Beginn des Experimentes die Baseline des (unbelasteten) Systems für 60 s auf. Geben Sie nun ein definiertes Gewicht in das Behältnis und messen die Diagonalspannung für 60 s. Erhöhen Sie das Gewicht schrittweise bis maximal 500 g. Wählen Sie eine geeignete Schrittweite  $X$  [g] (diese muss nicht konstant sein). Als Gewicht kann z.B. eine Wasserflasche aus Plastik verwendet werden, die zunehmend gefüllt wird. Beachten Sie dabei, dass die Wasserflasche ein Eigengewicht hat, das Sie wiegen und in Ihrer Rechnung berücksichtigen müssen. – Führen Sie das Experiment mit einer Viertel- und einer Voll-Messbrücke durch.

Verwenden Sie für die Messungen wieder das Script *Praktikum\_DM\_hx711.ino*.

Auswertung:

1. Berechnen Sie für jede Belastungs-Phase den Mittelwert der relativen Diagonalspannung  $U_d/U_0$  in mV/V. Achten Sie darauf die Messwerte aus den Übergängen der Belastung/Entlastung auszuschließen.
2. Entfernen Sie bei den Messreihen den offset, um diese vergleichen zu können. Füllen Sie die Tabelle im Protokoll vollständig aus, indem Sie die Dehnung  $\epsilon_{d,Viertel}$ ,  $\epsilon_{d,Voll}$ , die theoretische Dehnung  $\epsilon_{theo}$  in  $\mu m/m$  sowie die Messabweichung  $r_{Viertel}$  und  $r_{Voll}$  in % berechnen. Die benötigten Maße und Materialkennwerte sind in Anhang D zu finden. Geben Sie die von Ihnen verwendeten Formeln an.
3. Erstellen Sie ein Diagramm, in dem  $\epsilon_{d,Viertel}$ ,  $\epsilon_{d,Voll}$  und  $\epsilon_{theo}$  in Abhängigkeit der Masse aufgetragen sind.
4. Beschreiben und interpretieren Sie die Ergebnisse.

### 4.4. Temperaturkompensation

Ziel: In der Vorlesung haben Sie gelernt, wie man den Einfluss der Temperatur auf das Bauteil kompensiert. In der Aufgabe „Störungen des Messsignals“ haben Sie bereits eine mögliche Variante umgesetzt. An kleinen Bauteilen oder bspw. sehr dünnen Wellen haben Sie jedoch ggf. nicht ausreichend viel Platz für vier DMS. Für eine solche Anwendung müsste eine Brückenschaltung mit weniger DMS verwendet werden.

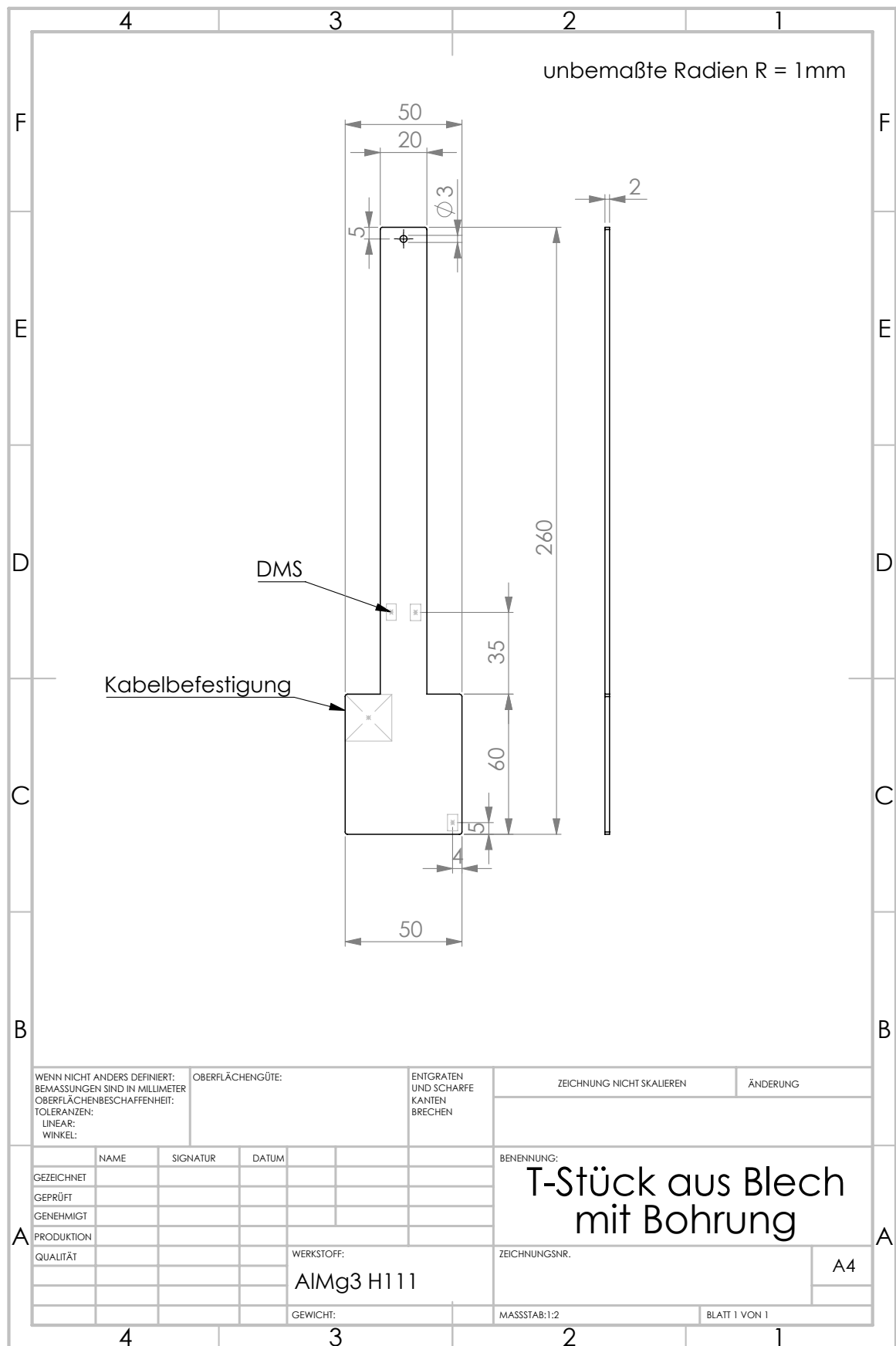
Durchführung: Überlegen Sie sich mit den vorhandenen DMS eine alternative Schaltung, um Temperatureinflüsse zu kompensieren. Zeigen Sie experimentell, dass Ihr Aufbau funktioniert. – Führen Sie den Versuch dazu zwei Mal durch. Einerseits mit einer Viertel- und andererseits mit der Messbrücke Ihrer Wahl.

Auswertung:

#### 4. Versuchsanleitung

1. Begründen Sie die Wahl der Schaltung und zeichnen Sie den Schaltplan. Machen Sie dabei kenntlich, welche DMS Sie an welcher Position eingesetzt haben.
2. Beschreiben Sie Ihre Vorgehensweise.
3. Stellen Sie die Ergebnisse in einem Diagramm dar. Entfernen Sie den offset, um sie vergleichbar zu machen.
4. Beschreiben und erklären Sie Ihre Beobachtungen.
5. Falls die Temperaturkompensation nicht funktioniert hat, versuchen Sie mögliche Ursachen zu identifizieren und zu erklären, warum der Aufbau nicht das erwartete Ergebnis liefert.

## A. Technische Zeichnung



## B. Datenblatt Verstärker HX711

[https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/5/4/6/hx711F\\_EN.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/5/4/6/hx711F_EN.pdf)



# HX711

### 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

#### DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of  $\pm 20\text{mV}$  or  $\pm 40\text{mV}$  respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

#### FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
  - normal operation  $< 1.5\text{mA}$ , power down  $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range:  $2.6 \sim 5.5\text{V}$
- Operation temperature range:  $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

#### APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

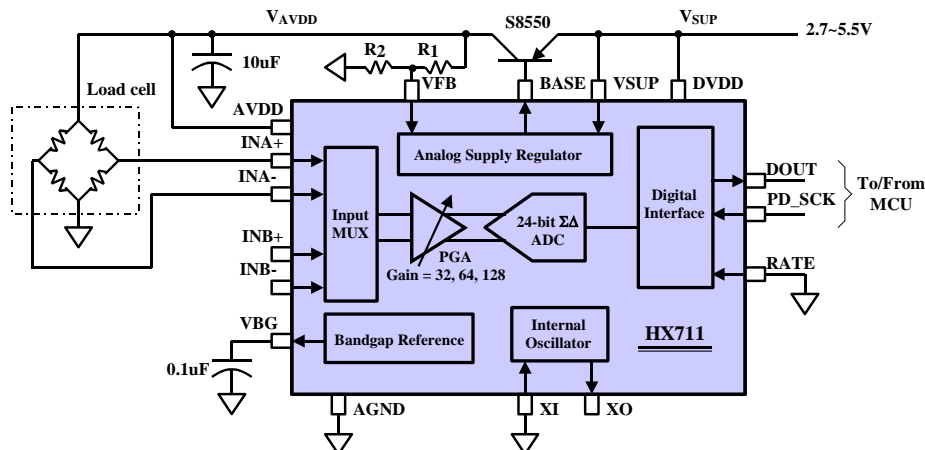


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

## C. Datenblatt Dehnungsmessstreifen

Model	BFH350-3AA		
Size	Basal size	mm	7,2 · 4,1
	Wire grid size	mm	3,2 · 3,1
The basal material			Phenolic-epoxy
Sensitive to grid material			Imported constantan
Transverse effect coefficient			0,40 %
Lead materials (enameled wire)		mm	30 ± 2
Resistance	The nominal value of tolerance	Ω	350 ± 1 Ω
	The average deviation	Ω	≤ 0,4 Ω
The use of temperature			-30 °C – 60 °C
Sensitivity coefficient and dispersion			2,0 ± 1 %



## D. Datenblatt Blechstreifen (AlMg3)

<https://batz-burgel.com/metallhandel/lieferant-aluminium/en-aw-5754/>

+ Batz  
Burgel

+ Metallbearbeitung  
Metallhandel

+ B  
B

**Werkstoffdatenblatt Aluminium: EN AW-5754 (Al Mg 3 – 3.3535)**

### 1. Chemische Zusammensetzung

nach DIN EN 573-3 (in % der Masse, Rest Al)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bemerkung	Andere Elemente
0,40	0,40	0,10	0,50	2,6 - 3,6	0,30	0,20	0,15		0,15

### 2. mechanische Eigenschaften

nach DIN EN 485-2 Bleche und Platten (gebräuchlicher Zustand)

Zustand	Neurndicke in mm	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> in MPa		Streckgrenze R <sub>p0,2</sub> in MPa		Bruchdehnung In % (mm)	Härte HBS
	über	bis	Min.	Max.	Min.	Max.	A <sub>50 mm</sub>
H0 / H111 (weich)	0,5	1,5	190	240	80		14
	1,5	3,0	190	240	80		16
	3,0	6,0	190	240	80		18
	6,0	12,5	190	240	80		18
	12,5	100	190	240	80		-
H22 / H32 (hh)	0,5	1,5	220	270	130		8
	1,5	3,0	220	270	130		10
	3,0	6,0	220	270	130		11
	6,0	12,5	220	270	130		10
	12,5	100	220	270	130		

Physikalischen Eigenschaften (Richtwerte bei 20°C)		Allgemeine Eigenschaften	
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	2,66	Beständigkeit gegen:	
Erstarrungsbereich °C	610-640	- Meerwasser	1-2
Elektr. Leitfähigkeit MS/m	20-23	- Witterung	1
Wärmeleitfähigkeit W/(mK)	140-160	Warmumformbarkeit:	
Therm. Längenausdehnungskoeffizient 10 <sup>-6</sup> /K	23,9	- Strangpressen	4
Elastizitätsmodul N/mm <sup>2</sup>	70.000	- Gesenkschmieden	3
		- Freiformschmieden	2
Schweißbarkeit		Oberflächenbehandlung	
Schmelzschweißen		Schutzanodisieren	1
- Gas	2	Dekorativ Anodisieren	2
- WIG	1	Beschichtung/Anstrich	3
- MIG	1		
Widerstandsschweißen	3	Kontakt mit Lebensmittel	Ja
Spanbarkeit:			
- H111	3	- H22	2

### 3. Hauptanwendung und Besonderheiten

für allgemeine Anwendungen im Maschinen- und Fahrzeugbau, Druckbehälterbau, Apparate und Behälter für Getränke und Lebensmittel

Sämtliche Angaben ohne Gewähr – Quelle: DIN EN 573-3 / EN 515 / DIN 17611:2011  
Bewertungen im Schulnotensystem 1-6 (1=sehr gut) Stand Juni 2020

[www.batz-burgel.com](http://www.batz-burgel.com)