



# Labor Embedded Systems

## Digitalwaage

Fachbereich Ingenieurwissenschaften

Alexander Dörr

Stand: 21. Januar 2021

### Warnhinweise



Zur Sicherheit sollten Sie immer die USB-Verbindung zwischen dem Arduino-Board und Ihrem Rechner trennen, bevor Sie an den Buchsenleisten externe Bauteile anschließen.



Die verwendete Wägezelle hat eine maximal zulässige Belastung von 2 kg. Achten Sie darauf, die Wägezelle im Versuch nicht zu überlasten.



Beachten Sie, dass dieser Versuchsaufbau Bauelemente enthält, die durch elektrostatische Aufladung zerstört werden können. Berühren Sie niemals Teile der Schaltung ohne ESD-Schutz.

## 1 Ziel des Laborprojekts

Sie bauen eine digitale Waage auf, kalibrieren diese und untersuchen die Messergebnisse auf ihre Genauigkeit.

Zur Verfügung stehen Ihnen eine Wägezelle auf DMS-Basis, ein A/D-Umsetzer mit einer Auflösung von 24 Bit, ein LC-Display sowie ein Arduino-Board. Weiterhin erhalten Sie zur Kalibrierung der Waage einen Prüfgewichtesatz.

## 2 Theorie

Eine Wägezelle besteht aus vier Dehnungsmessstreifen (DMS), die auf einen Grundkörper aufgeklebt sind, der bei einer Belastung verformt wird. Die vier DMS sind in einer Vollbrücke verschaltet und die Brückendifferenzspannungen werden mit einem Instrumentenverstärker verstärkt und mit einem hochauflösenden A/D-Umsetzer digitalisiert. Der Instrumentenverstärker und der A/D-Umsetzer sind im Baustein HX711 vereint. Das Wandlungsergebnis wird seriell synchron an den Mikrocontroller übertragen. Über die Anzahl der gesendeten Takte kann die Verstärkung des Instrumentenverstärkers sowie der Kanal eingestellt werden.

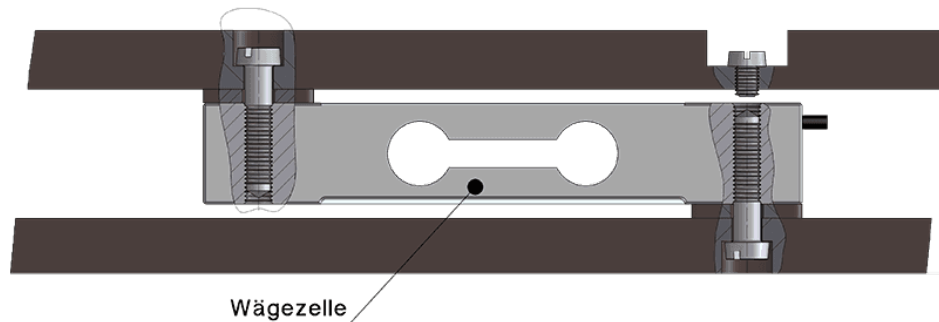


Abbildung 1: Ansicht einer montierten Wägezelle, Quelle: [bosche.eu](http://bosche.eu)

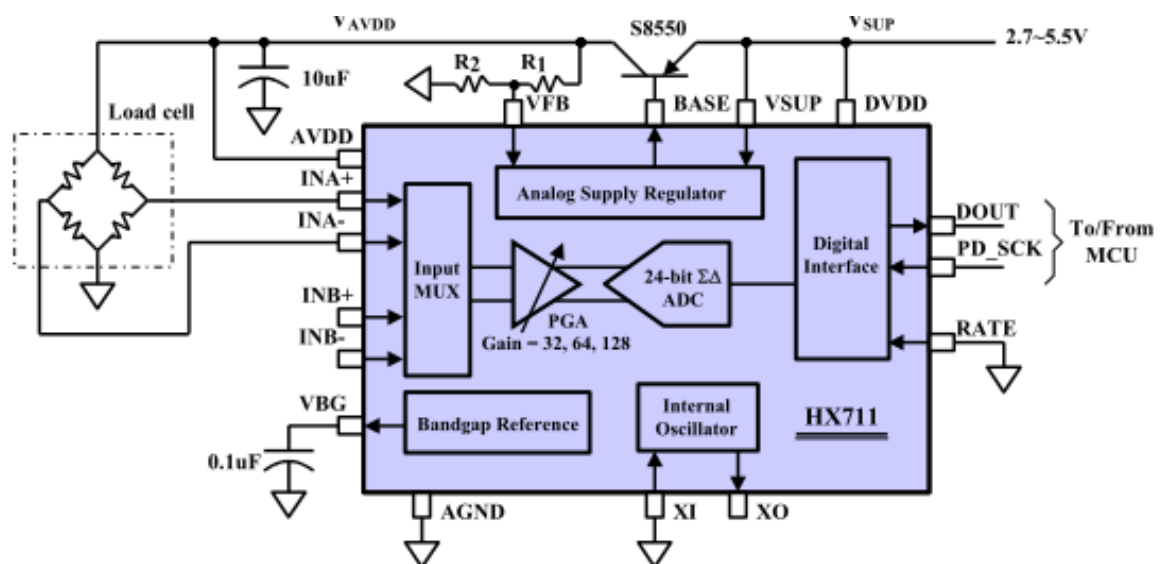


Abbildung 2: Schaltung des A/D-Umsetzers mit Brückenverstärker, Quelle: Datenblatt HX711 [Avia Semiconductor](http://Avia Semiconductor)

## 3 Vorbereitung

Die Vorbereitung zum Laborprojekt muss schriftlich erfolgen und zum Labortermin vorgelegt werden. Eine Teilnahme am Labor ohne ausreichende Vorbereitung ist nicht möglich.

### 3.1 Dokumente

Zur Vorbereitung müssen Sie folgende Dokumente herunterladen und bearbeiten:

1. Dokumentation zum LCD ([Link](#))
2. Datenblatt HX711 ([Link](#))
3. Wikipedia-Artikel zur Wägezelle ([Link](#))
4. Wikipedia-Artikel zu Dehnungsmessstreifen ([Link](#))
5. Wikipedia-Artikel zum Zweierkomplement ([Link](#))

Weiterhin müssen Sie sich folgenden Anweisungen und Strukturen vertraut machen:

1. Serielle Daten einlesen `shiftIn()` ([Link](#))
2. Bitweise links schieben `<<` ([Link](#))
3. Bitweise Exklusiv-Oder-Verknüpfung `^` ([Link](#))

### 3.2 Aufgaben zur Vorbereitung

1. Der Baustein HX711 hat eine Auflösung von 24 Bit. Das Wandlungsergebnis kann mit der Anweisung `shiftIn()` jedoch nur byteweise eingelesen werden. Überlegen Sie, wie Sie die drei nacheinander gelesenen Bytes zu einem Ergebnis vom Typ `unsigned long` umwandeln können.
2. Im Wandlungsergebnis des HX711 ist ein Vorzeichen enthalten. Dieses wird durch das höchstwertige Bit im Ergebnis festgelegt. Überlegen Sie, wie Sie den korrekten Wert errechnen können.

### 3.3 Logikanalysator

In diesem Versuch setzen Sie einen Logikanalysator ein, um die Datenübertragung über die SPI-Schnittstelle zu untersuchen. Der Logikanalysator wird über einen freien USB-Port mit dem Rechner verbunden. Zur Auswertung der Daten wird die Software PulseView benötigt, die Sie kostenlos von der folgenden Adresse herunterladen können: [sigrok.org](http://sigrok.org). Wählen Sie Ihr Betriebssystem aus und installieren Sie die Software auf Ihrem Rechner.

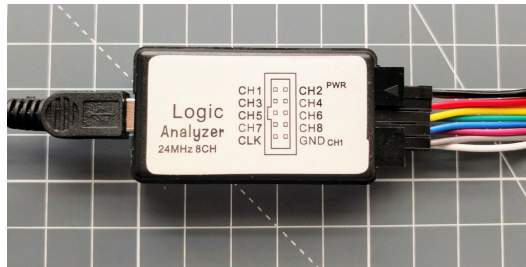


Abbildung 3: Logikanalysator mit 8 Digitalkanälen, Quelle: [sigrok.org](http://sigrok.org)



Abbildung 4: Kommunikation über den SPI-Bus mit PulseView aufgezeichnet und mit dem Protokolldekor ausgewertet

## 4 Versuchsaufbau

Die Wägezelle ist zwischen zwei Plexiglasplatten so montiert, dass die Gewichtskraft eines auf die obere Plexiglasplatte aufgelegten Gewichts als eine Änderung der von der Wägezelle abgegebenen Brückenspannung gemessen werden kann.

Der A/D-Umsetzer HX711 befindet sich auf eine kleinen Leiterplatte, an die die Wägezelle fest angeschlossen ist. Die Messung der Brückenspannung erfolgt über die Eingänge A+ und A- des Bausteins HX711. Über die 4-polige Stiftleiste wird die Leiterplatte mit dem Arduino-Board verbunden.

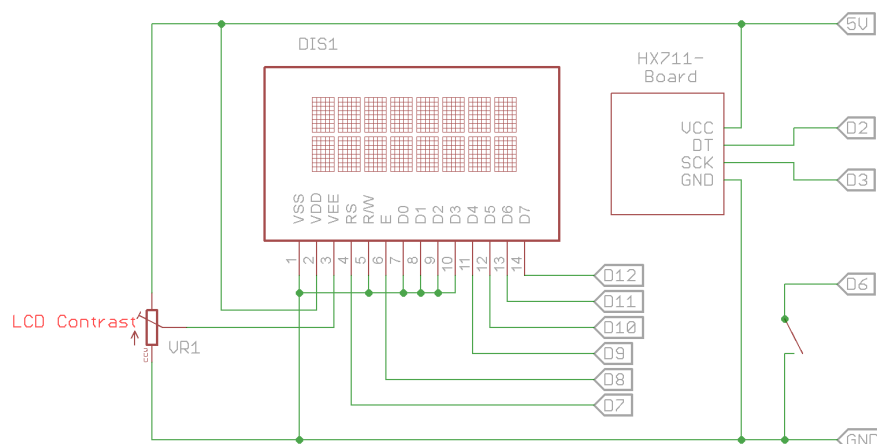


Abbildung 5: Schaltung des Versuchsaufbaus


## 5 Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau ist wie in Abb. 5 fest verdrahtet. Sie können daher direkt mit der Programmierung beginnen.

1. Öffnen Sie das Beispiel `Datei→Beispiele→LiquidCrystal→HelloWorld`. Speichern Sie die Datei unter einem anderen Namen und passen Sie die Anschlussbelegung an das LCD and Keypad Shield an. Kompilieren Sie den Sketch und laden Sie ihn auf das Arduino-Board hoch.
2. Erweitern Sie den Sketch, so dass Sie die Taste einlesen können. Senden Sie die gedrückte Taste über den UART an den PC. Im seriellen Monitor der Arduino-IDE können Sie die gesendeten Zeichenketten empfangen.
3. Verfassen Sie einen Sketch, mit dem Sie das aktuelle Wandlungsergebnis des A/D-Umsetzers HX711 lesen und das Ergebnis über die serielle Schnittstelle an den PC senden. Beachten Sie die Abb. 2 im Datenblatt des HX711. Ein neuer Wert darf erst dann eingelesen werden, wenn der A/D-Wandler bereit ist.

Das Wandlungsergebnis umfasst 24 Bit, daher muss die Anweisung `shiftIn()` dreimal nacheinander ausgeführt werden. Beachten Sie, dass die Betriebsart des HX711 über die Anzahl der CLK-Pulse eingestellt wird. Deswegen müssen Sie noch eine passende Anzahl an Pulsen zusätzlich erzeugen.

Das Wandlungsergebnis wird mit einem Vorzeichen ausgegeben. Den korrekten Wert erhalten Sie, indem Sie das Zweierkomplement des gelesenen 24 Bit Werts bilden.


Untersuchen Sie die Signale DT und SCK mit dem Logikanalysator. Klicken Sie auf die Schaltfläche , um einen Protokolldekoder hinzuzufügen und wählen Sie `Embedded/Industrial→SPI`. Ordnen Sie die Signale CLK und MISO den entsprechenden Kanälen zu. Nehmen Sie Bildschirmfotos der Kommunikation auf und speichern Sie die Messwerte in einer \*.sr-Datei ab.

4. Zur Kalibrierung des Versuchsaufbaus erhalten Sie einen Prüfgewichtesatz, der folgende Einzelgewichte enthält:

1x 10 g, 2x 20 g, 1x 50 g, 2x 100 g, 1x 200 g, 1x 500 g.

Legen Sie die Prüfgewichte in sinnvollen Kombinationen auf die Waage und notieren Sie das jeweilige Wandlungsergebnis.

5. Mit dem ermittelten Achsenabschnitt und der Steigung können Sie das Wandlungsergebnis des A/D-Umsetzers in Gramm umrechnen. Ändern Sie Ihren Sketch so ab, dass die Messwerte in Gramm über die serielle Schnittstelle an den Rechner gesendet werden.

Untersuchen Sie die Kommunikation über den UART mit dem Logikanalysator. Klicken Sie auf die Schaltfläche , um einen Protokolldekoder hinzuzufügen und wählen Sie `Embedded/Industrial→UART`. Ordnen Sie das Signal TX dem entsprechenden Kanal zu und geben Sie die Baudrate ein. Nehmen Sie Bildschirmfotos der Kommunikation auf und speichern Sie die Messwerte in einer \*.sr-Datei ab.

6. Legen Sie ein Gewichtsstück auf die Waage und nehmen Sie die Ergebnisse über einen Zeitraum von ca. 5 min über den seriellen Monitor auf. Kopieren Sie die Ergebnisse in eine Textdatei.
7. Untersuchen Sie die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, indem Sie abwechselnd Gewichte auflegen und entfernen.
8. Fügen Sie in Ihren Sketch eine Mittelwertbildung über 10 Messungen ein. Legen Sie ein Gewicht auf und nehmen Sie die Ergebnisse über einen Zeitraum von ca. 1 min über den seriellen Monitor auf. Kopieren Sie die Ergebnisse in eine Textdatei.
9. Fügen Sie in Ihren Sketch eine exponentielle Glättung ein und untersuchen Sie die Auswirkung der Glättung bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren  $\alpha$  auf die Standardabweichung. Legen Sie ein Gewicht auf und nehmen Sie die Ergebnisse über einen Zeitraum von ca. 1 min über den seriellen Monitor auf. Kopieren Sie die Ergebnisse in eine Textdatei.
10. Beobachten Sie die Auswirkung von Luftströmungen oder Temperaturschwankungen auf das Messergebnis und diskutieren Sie eine Lösungsmöglichkeit.
11. Erweitern Sie Ihren Sketch, so dass das Messergebnis in Gramm auf dem LCD angezeigt wird. Durch Drücken der Taste wird der Nullpunkt neu gesetzt (Tarierrung).
12. Erweitern Sie Ihren Sketch, so dass sich die Waage nach einer Zeit von 1 Minute nach dem Einschalten automatisch abschaltet. Nutzen Sie die Power Down Funktion des HX711. Durch Drücken der Taste muss die Waage wieder eingeschaltet werden.

## 6 Auswertung der Messdaten

1. Untersuchen Sie die im Abschnitt 3 aufgezeichnete Kommunikation über den SPI-Bus. Wie lange dauert die Übertragung eines Ergebnisses? Welche Zeit benötigt der A/D-Wandler, um einen Wandlungsvorgang durchzuführen? Welche maximale Abtastrate kann erzielt werden? Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Angabe im Datenblatt.
2. Zur Kalibrierung haben Sie im Abschnitt 4 der Projektdurchführung eine Messreihe aufgenommen. Stellen Sie diese Messreihe mit SciDAVis grafisch dar, indem Sie die Wandlungsergebnisse in die Spalte x und das aufgelegte Gewicht in Gramm in die Spalte y eintragen. Lassen Sie sich über die lineare Anpassung die Gleichung der Kennlinie angeben. Welche Unsicherheit gibt SciDAVis für die Steigung an?  
  
Was folgt aus der Steigung und der Unsicherheit für die minimal messbare Massenänderung  $m_{LSB}$ ?
3. Im Abschnitt 5 haben Sie die Kommunikation über den UART untersucht. Wie lange dauert die Übermittlung eines Messwerts?

4. Untersuchen Sie die zeitliche Stabilität (Driftverhalten), indem Sie die Messreihe aus dem Abschnitt 6 als Streudiagramm in SciDAVis darstellen. Ermitteln Sie die Standardabweichung der Messergebnisse und geben Sie eine Abschätzung, wie sich diese beiden Größen auf die Genauigkeit des Messergebnisses auswirken. Stellen Sie die Messreihe in einem Histogramm dar.
5. Untersuchen Sie die Auswirkung der Mittelwertbildung im Abschnitt 8 auf die Standardabweichung. Vergleichen Sie die Standardabweichungen mit und ohne Mittelwertbildung.
6. Untersuchen Sie die Auswirkung der exponentiellen Glättung im Abschnitt 9 auf die Standardabweichung. Vergleichen Sie die Standardabweichungen mit und ohne exponentielle Glättung.
7. Durch welche Effekte wird die im Abschnitt 10 beobachtete Temperaturabhängigkeit hervorgerufen? Welche Maßnahmen können ergriffen werden, um die Temperaturabhängigkeit zu verringern?