

EN ELEKTRONISK VÆGT

ARDUINOBASERET ØVELSE

UNDERVISNINGSELEMENT

#01

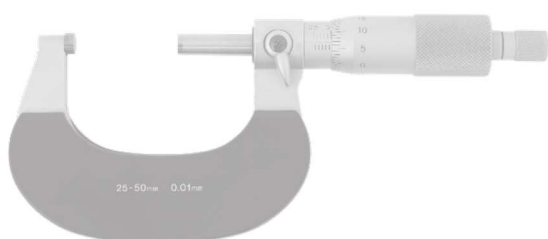
—
UNDERVISNING
I MÅLETEKNIK



EN ELEKTRONISK VÆGT

Jesper Bjerger Christensen & Jacob Larsen, DFM A/S

1. udgave – Juni 2020



Copyright © 2020 metrologi.dk – Materialet må ikke anvendes til kommercielt brug, uden tilladelse fra metrologi.dk.

Metrologi.dk er finansieret af Styrelsen for Forskning og Innovation i perioden 2016 – 2020. Materiale er udarbejdet i et samarbejde mellem GTS-institutterne DFM A/S, FORCE Technology og DELTA - a part of FORCE Technology.

Læs mere om projektet på www.metrologi.dk.

Parterne i Metrologi.dk kan ikke gøres ansvarlig for fejl og mangler i indholdet af undervisnings materialet eller i indholdet på websitet, samt indholdet i de eksterne dokumenter og websites, der linkes til, medmindre andet følger af dansk rets almindelige regler.

Grafisk design af: Henriette Schäfer Høyrup og David Balslev-Harder.

Indholdsfortegnelse

1 Formål	1	5 Arduinokode	4
2 Udstyr og materialer	1	6 Vægtkalibrering	4
3 Baggrund og teori	1	7 Måling og usikkerhed	5
4 Opsætnings- og byggevejledning	2	8 Afrunding	6

1 Formål

Formålet med denne øvelse er at forstå hvordan en typisk køkkenvægt fungerer. Efter øvelsen bør man være i stand til at svare på følgende spørgsmål:

- Hvad måler vores vægt og hvordan omsættes dette mål til en masse?
- Hvad er en strækmåler og hvordan fungerer den?
- Hvad er en vejecelle og hvordan fungerer den?
- Hvordan foregår en flerpunktskalibrering?

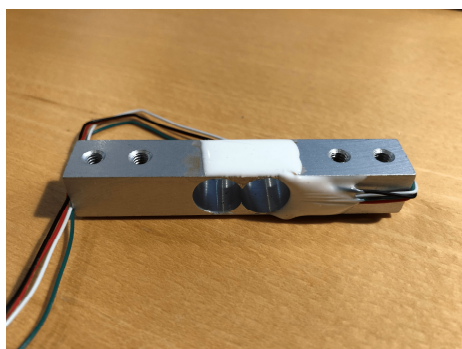
2 Udstyr og materialer

Til denne øvelse skal bruges følgende:

- 1x Arduino Uno
- 1x vejecelle (fx en 1-kg vejecelle)
- 1x vejecelleforstærker (HX711)
- Loddeudstyr
- Afstandsklodser og to stykker træ, eller andet materiale, til at danne vægtens fundament
- Masselodder til kalibrering

3 Baggrund og teori

Elektroniske vægte findes i vidt forskellige størrelser og varianter: fra den du har derhjemme i køkkenskabet til dem som bruges til at sikre at en lastvogn ikke er overlastet. Princippet bag dem er dog ofte det samme, og afhænger af en komponent som kaldes en vejecelle (eng., load cell), som der ses et af mange eksempler på i Figur 1. En vejecelle fungerer ved at omdanne en mekanisk belastning (en kraft) til



Figur 1: Billede af 1-kg vejecelle.

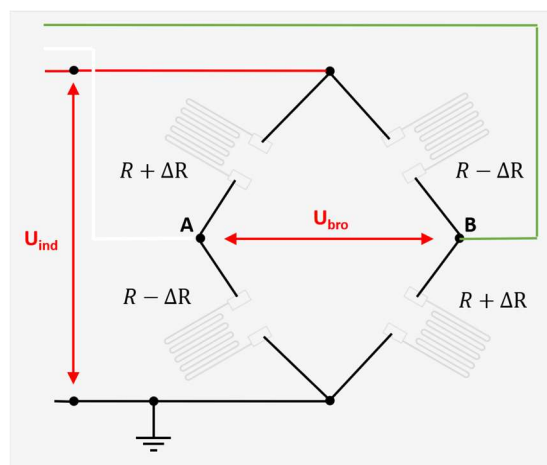
et elektrisk signal, som, via en kalibreringskurve, direkte omsættes til en bestemt masse.

Vejecellen er altså en mekanisk-elektrisk transducer, men hvordan fungerer den egentlig? For at besvare dette spørgsmål må vi tage et kig på vejecellens elektriske diagram som ses på Figur 2. Som det fremgår af skitsen, indeholder vejecellen fire strækmålere (se Boks 1) i en såkaldt fuld Wheatstone broforbindelse (se Projekt 6: "Wheatstonebroen" på www.metrologi.dk/arduino/). Kort fortalt er en strækmåler en elektrisk komponent, hvis elektriske modstand stiger (dvs. $R \rightarrow R + \Delta R$) når den bliver strukket, og falder (dvs. $R \rightarrow R - \Delta R$) når den bliver komprimeret. Der er placeret to strækmålere på hver side af vejecellen, således at når denne flexes, vil modstanden stige/falde parvist i strækmålerne som er placeret på samme side af vejecellen. Disse modstandsændringer forårsager en ændring i spændingsforskellen mellem Wheatstonebroens to midterpunkter (punkterne A og B) der er givet ved

Ligning 1

$$U_{bro} = U_B - U_A = \frac{\Delta R}{R} U_{ind},$$

hvor U_{ind} er den påførte spændingsforskel henover Wheatstonebroen, R er den elektriske modstand af hver strækmåler i hvile og ΔR er strækmålerens modstandsændring grundet en påvirkning.



Figur 2: Elektrisk diagram over en vejecelle bestående af en fuld Wheatstone broforbindelse med 4 strækmålere.

Boks 1: Strækmåleren

På billedet til højre ses en typisk kommerciel strækmåler. Den består af en elektrisk ledende tyndfilm, som er kemisk bundet til en fleksibel bund af polymer. Lederen spænder mange gange på langs af underlaget, og kan antages at have samlet længde, L , og tværsnitsareal, A . En strøm der løber igennem strækmålerens vil således opleve en elektrisk modstand, R , der er givet ved:

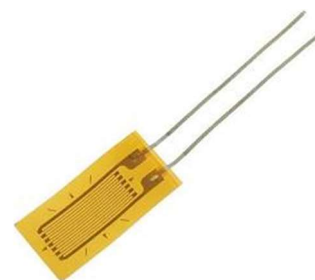
$$R = \rho L/A,$$

hvor ρ er en materialeafhængig parameter der kaldes den elektriske resistivitet. Den elektriske resistivitet har enheden ($\Omega \cdot \text{m}$), og er ved stuetemperatur fx ca. $16.8 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ (dvs. $1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) for et godt ledende materiale som kobber, mens den for gummi er i størrelsesordenen $10 \text{ T}\Omega \cdot \text{m}$ (dvs. $10^{13} \Omega \cdot \text{m}$).

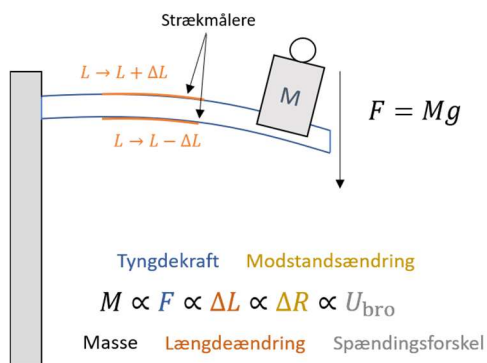
Strækmåleren virker ved at omsætte et stræk, dvs. en ændring i lederens længde på ΔL , til en ændring i den elektriske modstand på ΔR . Sammenhængen mellem disse to størrelser er givet ved formlen:

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \frac{\Delta L}{L},$$

hvor konstanten GF (for Gaugefaktor) afhænger af strækmålerens konstruktion, og har for typiske konstantantyndfilm en værdi på omkring 2. Strækmålere bruges fx til at stredsteste, verificere og monitorere broer, flyvinger og togskiner. Derudover bruges de også i en vejecelle!



Der er altså (indenfor vejecellens specifikationer) en lineær sammenhæng mellem strækmålerens modstandsændringen ΔR og den målte spændingsforskel U_{bro} . Modstandsændringen ΔR er forårsaget af en længdeændring ΔL af den elektriske leder (se Boks 1), som endvidere er et resultat af den belastning som der er på strækmåleren. I forbindelse med en vægt kommer belastningen fra tyngdekraften på det objekt som man gerne vil veje. Tyngdekraft er lineært afhængig af masse, hvilket fuldfører proportionalitetskæden som er skitseret i Figur 3.



Figur 3. Proportionalitetskæden der viser hvorfor en spændingsforskel målt med en Wheatstonebro er lineært afhængig af massen som påvirker vejecellen.

Da vi er interesserede i at finde massen ud fra en målt spænding, formulerer vi sammenhængen mellem disse (vores modelfunktion) som

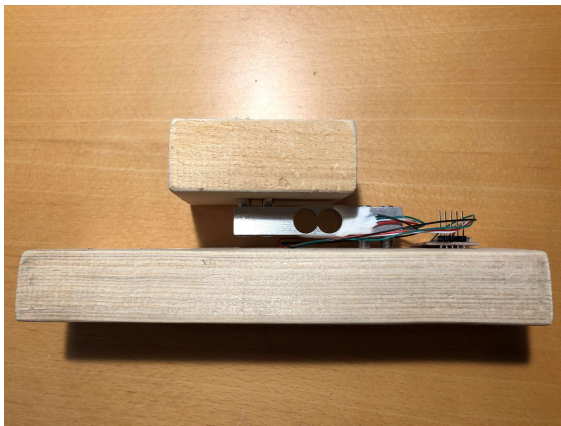
Ligning 2

$$M = \alpha U_{\text{bro}} + \beta,$$

hvor α og β angiver henholdsvis hældning målt i kg/V og skæringspunktet målt i. De to parametre, α og β , vil variere fra vejecelle til vejecelle (og fra konstruktion til konstruktion), og det er derfor nødvendigt at lave en kalibrering. En kalibrering består i denne sammenhæng af en række målinger på kendte referencemasser som tillader os at bestemme parametrene α og β for en specifik vægt. Dette gøres ved brug af en lineær regression, hvilket fx kan foretages med regneark A2a: "Introduktion til usikkerhedsbudgetter, regneark", se afsnit 6.

4 Opsætnings- og byggevejledning

Mekanisk konstruktion:



Figur 4. Billede af færdigbygget vægt. Det nederste træstykke bruges som fundament og det øverste bruges som vægtskål.

For at lave den mekaniske konstruktion af vægten kan man fx gøre som vist på Figur 4.

Her er to stykker træ brugt som henholds vægtens fundament og vægtskål. Hvert stykke træ er fæstnet til vejecellen med to skruer og et sæt afstandsklodser som tillader tilstrækkelig luft imellem træstykkerne og vejecellen så denne har mulighed for at flexe som resultat af en belastning.

Elektrisk opsætning:

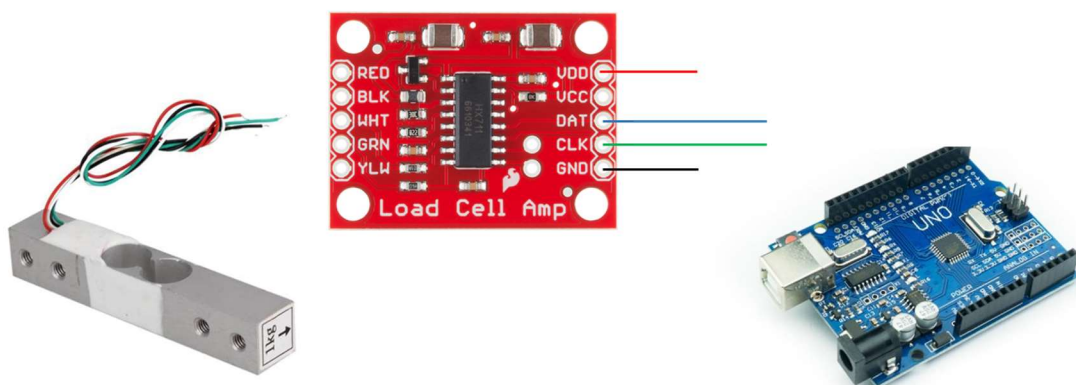
Figur 5 viser de elektriske komponenter der bruges til opsætningen af vægten. Til venstre ses vejecellen som har fire elektriske udgange. Disse svarer (farvekodet) til forbindelserne skitseret i Figur 2, og skal forbindes til en vejecelleforstærker (eng., load cell amplifier). På de nyere modeller (fx Sparkfun,

HX711) er farverne angivet på modulet så de svarer til ledningernes farve fra typiske vejeceller. Den nederste forbindelse "YLW" bruges til elektromagnetisk afskærmning og kan i vores tilfælde efterlades uden at blive forbundet. Vejecelleforstærkeren bruges til at forstærke det ellers meget svage differenssignal mellem de to spændingsniveauer i vejecellens Wheatstonebro (hvid og grøn). Efter forstærkningen følger en 24-bit analog-til-digital konverter (ADC) som omformer den forstærkede analoge spændingsforskel til et digitalt signal.

Udgangssiden af vejecelleforstærkeren forbindes til Arduinoen på følgende måde:

- VDD -> 5 V
- GND -> GND
- DAT/DT -> D5
- CLK/SCK -> D6

Arduinos forsyning på 5 V driver både vejecelleforstærkermodulet og Wheatstonebroen i selve vejecellen. DAT/DT indeholder det digitale spændingssignal fra ADC'en og forbindes til en digital indgangsport på Arduinoen (fx port 5). Ligeledes forbindes CLK/SCK, som indeholder timingsignaler for dataen, til en digital port på Arduinoen (fx port 6). Denne form for kommunikation bestående af to ledninger: en ledning til dataen og en ledning til synkronisering, er kendt som en "I²C" kommunikationsprotokol.



Figur 5. Elektrisk skitse over forbindelse mellem 1-kg vejecelle, HX711 vejecelleforstærkeren og en Arduino Uno.

```

#include "HX711.h" // Først indhentes et bibliotek

// HX711 pins
const int DOUT = 5;
const int CLK = 6;

long zero; // Definition af global variabel
HX711 scale; // Initialiserer det indhentede bibliotek ("HX711.h")

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Kommunikations hastighed mellem PC og Arduino
  scale.begin(DOUT, CLK); // Opstart
  zero = scale.read_average(); // Laver en nulmåling som evt. bruges senere
  Serial.print("HX711 nulmåling: ");
  Serial.println(zero);
  delay(100); // Ventetid på 100 milisekunder
}

void loop() {
  if (scale.is_ready()) {
    long reading = scale.read_average(); // Laver måling
    Serial.print("HX711 måling: ");
    Serial.println(reading);
  } else {
    Serial.println("HX711 not found.");
  }
  delay(500); // Ventetid på 500 milisekunder
}

```

5 Arduinokode

Ovenfor ses et eksempel på en Arduinokode som kan bruges til at styre og aflæse en selvbygget vægt bestående af en vejecelle og en HX711 vejecelleforstærker. Koden starter med at indlæse et Arduino-bibliotek som er skrevet for at gøre det nemmere at interface med HX711 modulet. Før man kan gøre brug af biblioteket skal det installeres. Dette gøres i "Tools" -> "Manage Libraries...", hvilket åbner "Library Manager". Her søges efter HX711 og det øverste bibliotek "HX711 Arduino Library" installeres ved at trykke "Install".

Arduinokoden kan nu køres ved at trykke "Verify" -> "Upload", og de digitale spændingsaflæsninger kan findes i "Tools" -> "Serial Monitor" eller i "Tools" -> "Serial Plotter".

Note om digitalt output

Som nævnt sidst i afsnit 4, er outputtet fra HX711 modulet et 24-bit digitalt signal. Dette betyder at de aflæste værdier er heltal i intervallet $\left[-\frac{2^{24}}{2}, \frac{2^{24}}{2} - 1\right]$. Hvis man er interesseret i at omdanne det digitale signal til en egentlig spænding, kan man gøre brug af omskrivningen $U_{bro} \approx \frac{2 \times 2.5 \text{ V}}{2^{24}} \times U_{Dig}$, hvor U_{bro} er (det

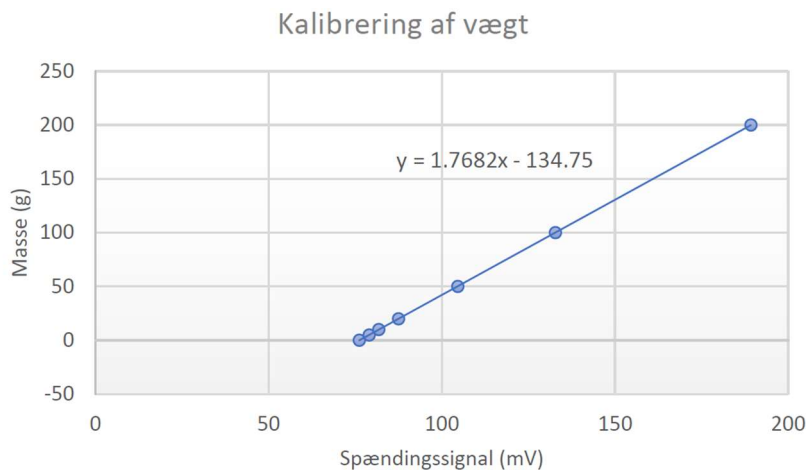
forstærkede) spændingssignal i volt og U_{Dig} er talrepræsentationen af det digitale spændingssignal. Da sammenhængen mellem U_{bro} og U_{Dig} er lineær, er det dog ikke som sådan nødvendigt at foretage denne omskrivning for at fuldføre kalibreringen, se næste afsnit.

6 Vægtkalibrering

Et kritisk element i en kalibrering er brugen af et passende referencemateriale. Til at kalibrere en vægt kan man bruge referencelodder som har kendt masse



Figur 6. Sæt af kalibreringslodder fra Frederiksen Scientific.



Figur 7. Kalibreringsgraf for Arduinovægt baseret på målinger af kalibreringslodder fra Figur 6.

med en vis præcision. Når vi baserer kalibreringen af vores vægt på et sæt målinger af referencelodder vil nøjagtigheden af vores vægt aldrig kunne blive mere præcis en den specificerede nøjagtighed af referencen (se undervisningsmateriale "A8-Sporbarhedskæden"). Til vores kalibrering brugtes sættet af kalibreringslodderne set på Figur 6.

Figur 7 viser et eksempel på en flerpunktskalibrering udført på kalibreringslodderne ved brug af undervisningsmateriale A2a: "Introduktion til usikkerhedsbudgetter, regneark". Kalibreringen bruges til at estimere de to parametre α og β ved brug af en lineær regression. I vores tilfælde fås $\alpha = 1.768 \text{ g/mV}$ og $\beta = -134.75 \text{ g}$ med usikkerheder på henholdsvis $u(\alpha) = 0.0013 \text{ g/mV}$ og $u(\beta) = 0.15 \text{ g}$. Disse kalibreringsusikkerheder skal medregnes når vægten senere bruges til at måle ukendte masser.

Jeres egne kalibreringskonstanter og deres tilhørende usikkerheder kan indskrives i nedenstående tabel.

Parameter	Værdi fundet ved lineær regression
α	
β	
$u(\alpha)$	
$u(\beta)$	

7 Måling og usikkerhed

Efter endt kalibrering er det muligt at bruge den konstruerede vægt til til at måle massen på ukendte objekter. Lad os tage et eksempel:

Vi lavede en måling på et sæt af lodder med en massesum på 120 g. Vi foretog i alt 10 målinger, der resulterede i en gennemsnitsværdi på $U_{bro} = 144.1 \text{ mV}$ med tilhørende standardusikkerhed på $u(U_{bro}) = 0.008 \text{ mV}$.

Ud fra dette resultat kan vi ved brug af kalibreringen udregne vægten til $M = 1.768 \frac{\text{g}}{\text{mV}} \times 144.1 \text{ mV} - 134.75 \text{ mV} = 120.10 \text{ g}$.

Dette resultat har dog ingen egentlig værdi uden en forbundet usikkerhed, som kan udregnes baseret på undervisningsmateriale "A2 -- Introduktion til usikkerhedsbudgetter". Med modelfunktionen, Ligning 2, udregnes standardusikkerheden til

$$u(M) = \sqrt{(u(U_{bro})\alpha)^2 + (u(\alpha)U_{bro})^2 + u(\beta)^2} \\ = \sqrt{(0.015 \text{ g})^2 + (0.18 \text{ g})^2 + (0.15 \text{ g})^2} = 0.24 \text{ g}$$

Fra dette kan vi beregne den ekspanderede usikkerhed ($k = 2$) til at være $U(M) = 2 \times u(M) = 0.48 \text{ g}$, og dermed angive vores resultat, som med 95% sandsynlighed dækker den sande værdi for massen af testgenstanden,

$$M = (120.10 \pm 0.48) \text{ g}$$

8 Afrunding

- Som det ses på de beregnede usikkerhedsbidrag i vores eksempel i afsnit 7, kommer langt størstedelen af den samlede usikkerhed fra selve kalibreringen. Dette betyder at det, i dette tilfælde, ikke giver meget mening at tage gennemsnit af et større antal målinger. Et naturligt spørgsmål er så om man kan forbedre sin kalibrering for at øge vægtens præcision?
- Med en vægt konstrueret på denne måde vil den pålagte genstand påvirke vejecellen med et kraftmoment som afhænger af hvordan genstanden placeres på vægtskålen. Kan I observere en forskel i det aflæste spændingssignal alt efter *hvor* I lægger en genstand oven på jeres vægt? Dette er et

eksempel på et usikkerhedsbidrag der er forbundet med operatøren - det er vigtigt at genstande der skal vejes på vægten altid placeres samme sted.

- Forsøg at undersøge om jeres vægt ændrer sit respons over *tid*. Med andre ord - er der brug for en ny kalibrering hver gang vægten skal bruges?
- Endelig kan I undersøge *lineariteten* af jeres vægt. Kan I observere en afvigelse fra et lineært respons? Hvor i proportionalitetskæden (se Figur 3), tror I at lineariteten bliver sat på prøve?
- Gå nu tilbage til afsnit 1 "Formål". Har I opfyldt læringsmålene for øvelsen?