

# Bilag H - Vægt

Asger Ajs Dam

2. juni 2023

Arbejdsfordeling			
Studienummer	Navn	Studieretning	Primær / Sekundær
202105139	Asger Ajs Dam	E	<i>Primær</i>
201705621	Jan Jakob Agricole Iversen	E	<i>Sekundær</i>
202110470	Rasmus Haughbølle Thomsen	E	<i>Ssekundær</i>

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Design</b>	<b>2</b>
2.1	Valg af vejecelle . . . . .	2
2.2	Valg af kredsløb . . . . .	2
2.2.1	Differensforstærker . . . . .	2
2.2.2	Instrumentationsforstærker . . . . .	3
2.3	Design af kredsløb . . . . .	4
2.3.1	Valg af operationsforstærker . . . . .	4
2.3.2	Forstærkning . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Implementering</b>	<b>8</b>
3.1	Stykliste . . . . .	8
3.2	Implementering på vero-board . . . . .	8
3.3	Implementering af vejecelle . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Modultest</b>	<b>10</b>
4.1	Indledende målinger . . . . .	10
4.2	Bestemmelse af præcision . . . . .	11
	<b>Litteraturliste</b>	<b>13</b>

# 1 Indledning

For at holde øje med plantens udvikling over tid, laves en vægt. På denne måde vil man få et overblik over plantens stykvisse ændring i masse. Dette bilag vil kigge nærmere på udviklingen af denne vægt, og herunder dens design, implementering og modultest.

## 2 Design

### 2.1 Valg af vejecelle

Vægtens design tager udgangspunkt i en vejecelle og vi har valgt at bruge vejecellen SPA 6 fra ESIT, da den først og fremmest kan holde til, hvad vi vurderer, er et godt område for en plante, nemlig 0-6kg, og den kan forsynes med 5V, så den passer ind i det tænkte forsyningssystem. Derudover er den tilgængelig i Embedded Stock - skolens lager af diverse komponenter. Slutteligt er det en vejecelle af platform type, hvilket vil sige, at den er i stand til at måle vægt fra et enkelt punkt. Derudover har vi også erfaring med denne type af vejecelle fra faget GFV, og dette er en hjælp, når vi skal designe selve huset vejecellen skal sidde i, og som kommer til at udgøre vægten.



Figur 1: ESIT SPA 6 [1]

En vejecelle fungerer som en transducer, altså en komponent, som omdanner en energiform til en anden. I dette tilfælde giver fysisk press på vejecellen proportionale ændringer på det elektriske signal. Dette fungerer ved, at materialet strækker sig, når belastning påføres, og denne strækning ændrer modstanden i de strain gauges, der sidder langs vejecellen. Strain gauges er små kobbertråde, der sidder i et gitter-mønster på vejecellen, og fungerer som en modstand hvis værdi, som tidligere forklaret, ændres når selve vejecellen tilføres press og dermed giver sig[9].

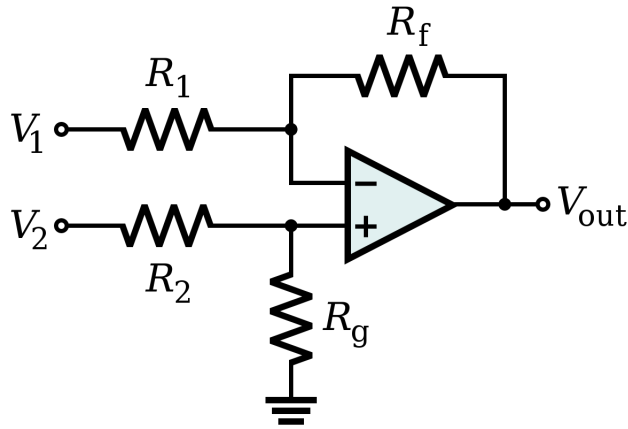
Vejecellens output kommer på to ledninger, som er mærket S+ og S-. SPA 6 har et rated output  $C_n$ , på 2mV/V  $\pm 1\%$ . Det vil sige, at vejecellen ved et maksimalt load på 6kg og en forsyning på 5V, vil give en output forskel mellem S+ og S- på 10mV  $\pm 1\%$ . Det her output skal forstærkes, så det giver et lineært analogt signal fra 0-5V, som et program på PSoC'en kan konvertere til en rigtig masse. Med denne rating og et stabilt arbejdsmiljø vil vejecellen give et lineært output, men dette testes også senere.

### 2.2 Valg af kredsløb

Vi ønsker, at designe et kredsløb, der kan forstærke outputtet af vejecellen til et lineært analogt signal fra 0-5V, som gennem en ADC i PSoC'en kan konverteres til en digital værdi, som repræsenterer massen af planten. Her er det vigtigt, at designe et kredsløb, som kan tage vejecellens output og korrekt forstærke spændingsforskellen mellem S+ og S-.

#### 2.2.1 Differensforstærker

Til at forstærke outputtet mellem vejecellens S+ og S-, er det oplagt at bruge en differensforstærker.



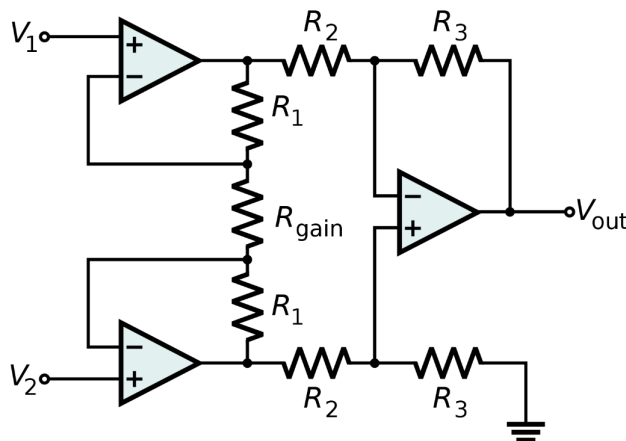
Figur 2: Differensforstærker[7]

Differensforstærkere tager som navnet antyder difference mellem to inputs og forstærker dette. Derfor er det muligt, at anvende en differensforstærker til forstærkning af signalet fra vejecellen, men der er også visse udfordringer og problemer ved brug af denne type forstærker.

Differensforstærkere har typisk en lav indgangsimpedans, og dette kan resultere i en belastning af signalet fra vejecellen, hvilket kan medføre unøjagtige målinger. Nøjagtigheden og præcisionen af målingerne kan også være udfordret på grund af højere offset-spænding og drift i sammenlignet med alternativer. I vejecelleapplikationer, hvor nøjagtighed er afgørende, kan dette være et betydeligt problem.[empty citation]

### 2.2.2 Instrumentationsforstærker

Til at modvirke differensforstærkerens mangler, kan et andet kredsløb bruges, nemlig en instrumentationsforstærker.



Figur 3: Instrumentationsforstærker[8]

Instrumentationsforstærken, som egentlig er en udbygning på en differensforstærker, har følgende fordele i forhold til den normale differensforstærkeren:

- Høj input impedans
- Lav DC offset og drift
- Høj common mode rejection ratio
- Nem og præcis sætning af gain
- Større nøjagtighed og linearitet

For det første har instrumentationsforstærkere typisk to differentielle indgange, hvilket betyder, at de kan måle forskellen mellem to inputsignaler, hvilket passer godt til det differentielle output fra vejecellen.

For det andet har instrumentationsforstærkere en høj indgangsimpedans, typisk i størrelsesordenen megaohm ( $M\Omega$ ). Vejeceller har normalt en høj udgangsimpedans, hvilket betyder, at de ikke kan levere meget strøm til en belastning. Den høje indgangsimpedans på instrumentationsforstærkeren betyder, at den trækker minimal strøm fra vejecellen og forårsager minimal forvrængning af signalet.

Derudover er instrumentationsforstærkere designet til at have lav indre støj og høj nøjagtighed. Dette er vigtigt, når man arbejder med præcise vægtopmålinger. De hjælper med at minimere uønsket støj og forvrængning, hvilket sikrer pålidelige og nøjagtige målinger[8].

## 2.3 Design af kredsløb

Ved valget af en instrumentationsforstærker til forstærkning og behandling af signalet fra vejecellen, skal denne nu designes. I den forbindelse vælges der først en egnet operationsforstærker og herefter bestemmes gain og kredsløbet analyseres.

### 2.3.1 Valg af operationsforstærker

Vi kigger først på valget af operationsforstærker til kredsløbet. Her er det vigtigt, at opstille nogle klare krav, på baggrund af måden signalet fra vejecellen skal behandles og det ønskede output. Dette kiggede vi på i afsnit 2.2.2. Vi leder efter en operationsforstærker, der:

- kan forsynes med 5V, da dette passer med den forsyning, vi bruger igennem hele systemet.
- har en høj indgangsimpedans og en lav udgangsimpedans, så signalet holder dets integritet og outputtet er stabilt og kompatibelt med PSoC'en.
- har en lav input offset spænding og en lav input offset temperatur drift, for at få det mest præcise output.
- har en høj CMRR, så eventuel støj og interferens ikke har stor betydning for signalet.

Vi starter ud med afgrænse os til de operationsforstærkere, der er tilgængelige i ECE lager, da der er et godt udvalg af forskellige slags. Herfra afgrænser vi det yderligere til de tre operationsforstærkere vi har mest erfaring med. På tabel 1 herunder kan både typiske og max-værdier for de tre operationsforstærkeres  $V_{OS}$ ,  $I_{OS}$  og  $I_B$  ses.

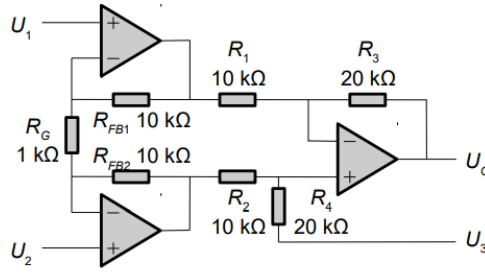
Stykliste						
Operationsforstærker	$V_{OS}$ typ	$I_{OS}$ typ	$I_B$ typ	$V_{OS}$ max	$I_{OS}$ max	$I_B$ max
MCP601[4]	0.7 mV	1 pA	1 pA	2 mV	1 pA	1 pA
OP27[5]	30 $\mu$ V	12 nA	15 nA	100 $\mu$ V	75 nA	80 nA
LM471[3]	1 mV	20 nA	80 nA	5 mV	200 nA	500 nA

Tabel 1: Information om de tre operationsforstærkere

Ud fra disse informationer kan vi allerede udelukke LM471, da den har dårligere værdier end begge de andre operationsforstærkere. De to andre kan begge bruges i en instrumentationsforstærker, da de begge har høje input impedanser, og høje CMRR-værdier. Ved netop CMRR-værdier har OP27 en lidt bedre værdi, men vi vælger alligevel, at gå med den billigere MCP601, da vi har mest erfaring med brug af denne.

### 2.3.2 Forstærkning

Instrumentationsforstærkerens forstærkning er bestemt af de forskellige modstande i kredsløbet. Instrumentationsforstærkerens kredsløb kan deles op i to dele. Her menes der den første del, som fungerer som en ikke inverterende buffer for begge input, og den anden del, som er differensforstærkeren.



Figur 4: Instrumentationsforstærker[6]

Ud fra figur 4 lægges der mærke til at de følgende værdier er ens:

$$R_{FB1} = R_{FB2}, \quad R_1 = R_2, \quad R_3 = R_4$$

For at finde et udtryk for forstærkningen over instrumentationsforstærkeren, finder vi frem til overføringsfunktionen. Den difference spænding, der kommer ind på differensforstærkeren er: Ved antagelse af virtuel kortslutning af de to buffer-operationsforstærkere, er der en nodespænding ved deres negative input tilsvarende til det positive, altså  $(V_2 - V_1)$ , og da der er det ved begge noder, er der ingen strøm over modstanden  $R_G$ , ligesåvel som modstandene  $R_{FB1}$  og  $R_{FB2}$ . Dette betyder, at der ved output af  $U_1$  og  $U_2$ , altså  $V_{out1}$  og  $V_{out2}$  også er en spænding på  $(V_2 - V_1)$ . Vi finder nu et udtryk for  $V_{out2} - V_{out1}$ , som er den differens spænding, der kommer ind på differensforstærkeren. Vi kender udtryk for spændingsfaldet over  $R_{FB1}$  og  $R_{FB2}$ , samt  $R_G$

$$\begin{aligned} V_{out2} - V_{out1} &= R_{FB} \cdot \frac{(V_2 - V_1)}{R_G} + (V_2 - V_1) + R_{FB} \cdot \frac{(V_2 - V_1)}{R_G} \\ &= (V_2 - V_1) \left( 1 + \frac{2R_{FB}}{R_G} \right) \end{aligned}$$

Differensforstærkerens gain er:

$$A_d = \frac{R_3}{R_1}$$

Derfor vil  $V_{out}$  være:

$$\begin{aligned} V_{out} &= (V_{out2} - V_{out1}) \cdot A_d \\ &= (V_2 - V_1) \left( 1 + \frac{2R_{FB}}{R_G} \right) \frac{R_3}{R_1} \end{aligned}$$

Instrumentationsforstærkerens totale forstærkning er givet ved:

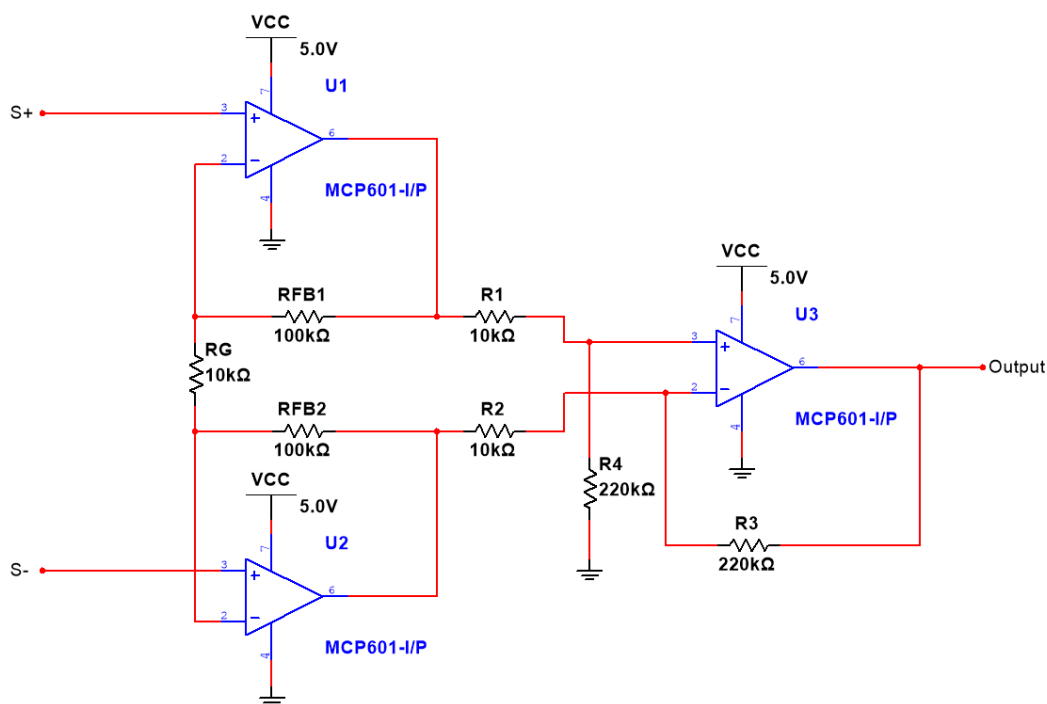
$$A_d = \left( 1 + \frac{2R_{FB}}{R_G} \right) \frac{R_3}{R_1}$$

Vi vælger en række modstandsværdier, som giver en forstærkning vi kan bruge:

$$R_G = 10 \text{ k}\Omega, \quad R_{FB} = 100 \text{ k}\Omega, \quad R_1 = 10 \text{ k}\Omega, \quad R_3 = 220 \text{ k}\Omega$$

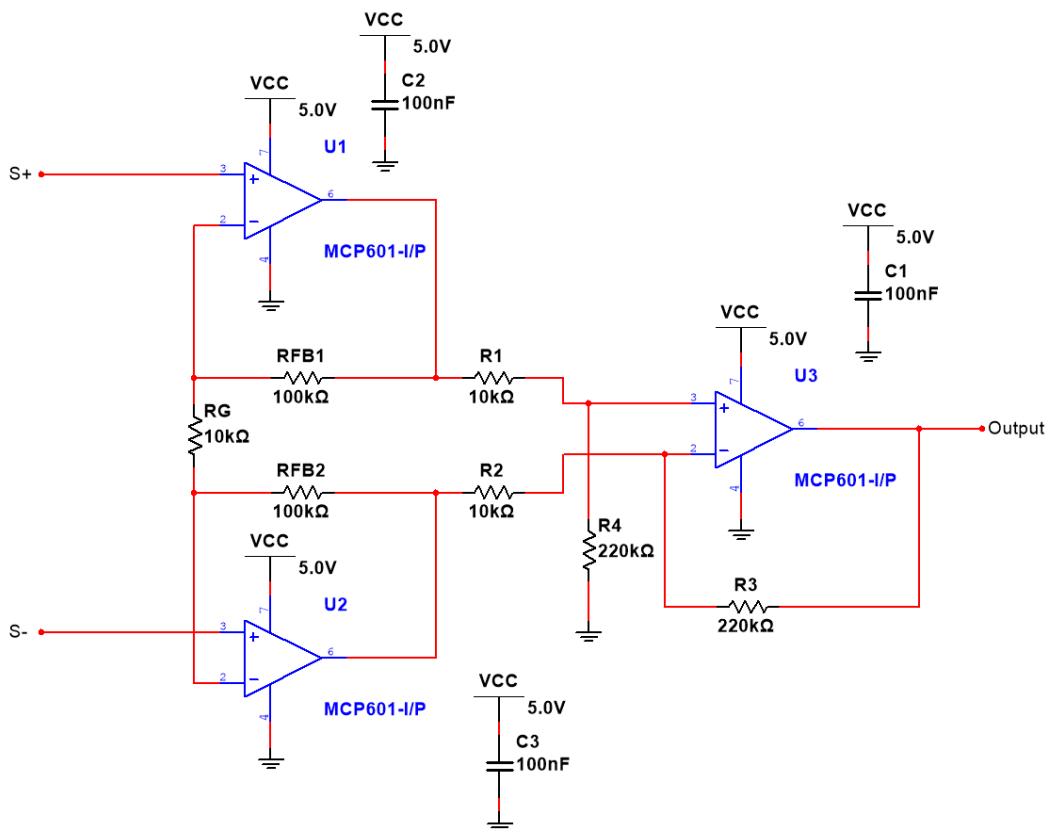
$$A_d = \left( 1 + \frac{2 \cdot 100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} \right) \frac{220 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 462$$

Med de valgte modstande er en forstærkning på 462 nu etableret. Det vil sige, at med en forsyning på 5V og et maksimalt load på vejecellen på 6kg, vil instrumentationsforstærkerens output være 4,62V. Det nuværende kredsløb kan ses herunder i figur 5



Figur 5: Instrumentationsforstærker med bestemte op amps og modstande

Kredsløbet kommer til at lægge tæt med andet elektronik, så for at beskytte mod støj på operationsforstærkernes forsyning tilføjes en decoupling capacitor fra VCC til ground. Her vælges en capacitor på 100nF, og dette skulle gerne være rigeligt. Tilføjelsen af decoupling capacitoren til kredsløbet kan ses på figur 6



Figur 6: Færdigt vægtekredsløb

Denne tilføjelse sikrer stabil forsyning, hvor eventuelt højfrekvent støj fra nettet også bliver sorteret fra.



## 3 Implementering

### 3.1 Stykliste

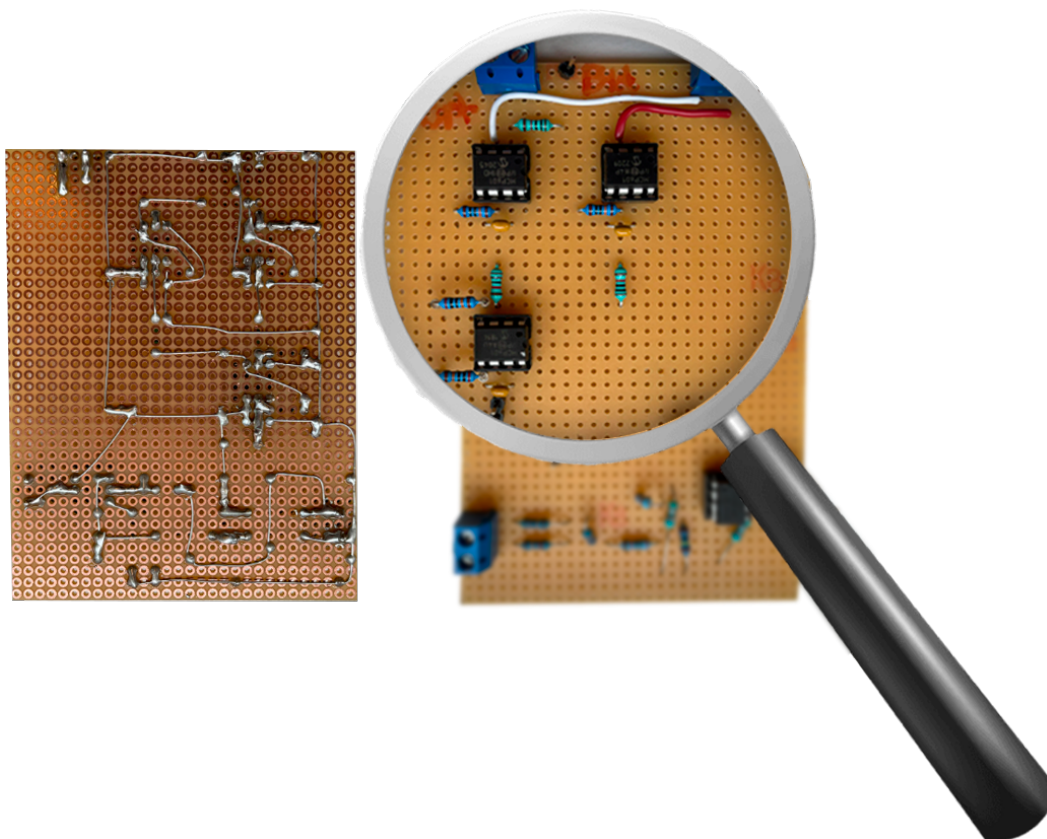
På tabel 2 vises en oversigt over de forskellige komponenter, der er brugt, samt prisen for den enkelte komponent.

Stykliste						
Nr	Qty	Navn	Enhed	Beskrivelse	Pris	Enhed
1	3	10	k $\Omega$	Modstand	0.5	kr
2	2	100	k $\Omega$	Modstand	0.5	kr
3	2	200	k $\Omega$	Modstand	0.5	kr
4	3	100	nF	Kapacitor	1.44	Kr
5	3	MCP601*		Operationsforstærker	2.83	kr
6	1	SPA 6*		Vejecelle	~650	kr
total: 665.81 kr ekskl. fragt						

Tabel 2: Stykliste

### 3.2 Implementering på vero-board

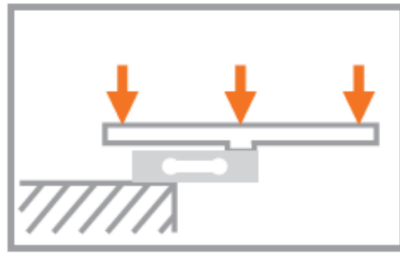
Efter at have testet kredsløbet igennem med gode resultater implementeres det på vero-board, så det kan indgå i potten. Herunder på figur 7 kan implementeringen på vero-board ses.



Figur 7: Implementering af instrumentationsforstærker på vero-board

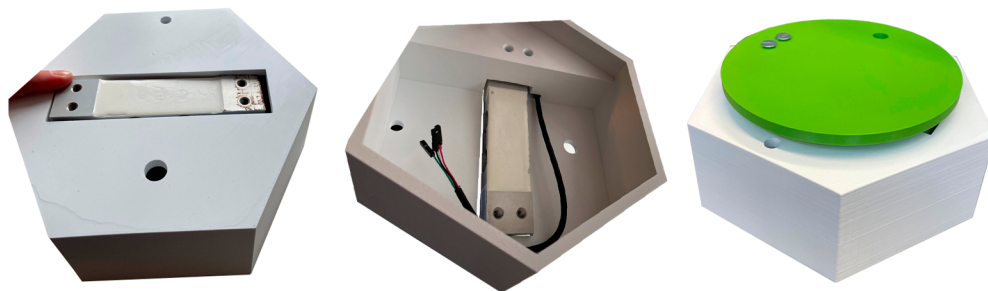
### 3.3 Implementering af vejecelle

Selve vejecellens placering i produktet er afgørende for hvordan den virker. Da vejecellen er af platform-typen, skal den opstilles som vist i figur 8.



Figur 8: Opstilling af platform-type vejecelle

Den opstilling af vejecellen realiseres gennem et 3D-printet hus, som er vist på figur 9. For mere information omkring 3D-printet se bilag U.



Figur 9: Implementering af vejecellen i 3D-printet hus

## 4 Modultest

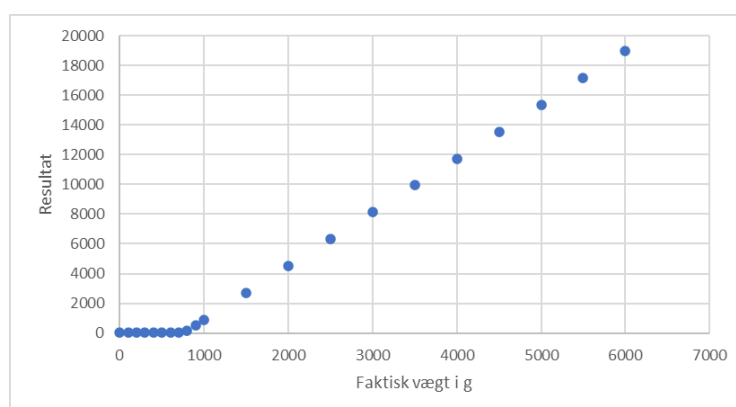
### 4.1 Indledende målinger

For at teste om vægten lever op til kravspecifikationen, laves en række tests, som analyserer dens ydeevne. Først laves der dog regression over en række indledende målinger, hvor vægtens output på ADC'en og den faktiske vægt placeret på vægten noteres, for at finde et udtryk for sammenhængen. I tabel 4.2 herunder ses resultatet af disse indledende målinger.

Måling	Resultat	Faktisk vægt i gram
1	10	0
2	11	100
3	12	200
4	12	300
5	13	400
6	14	500
7	15	600
8	16	700
9	181	800
10	540	900
11	904	1000
12	2718	1500
13	4521	2000
14	6330	2500
15	8140	3000
16	9935	3500
17	11738	4000
18	13544	4500
19	17150	5000
20	18970	5500

Tabel 3: 20 indledende målinger

De indledende målinger plottes for at få et overblik over sammenhængen mellem vægten placeret på vægten og outputtet:



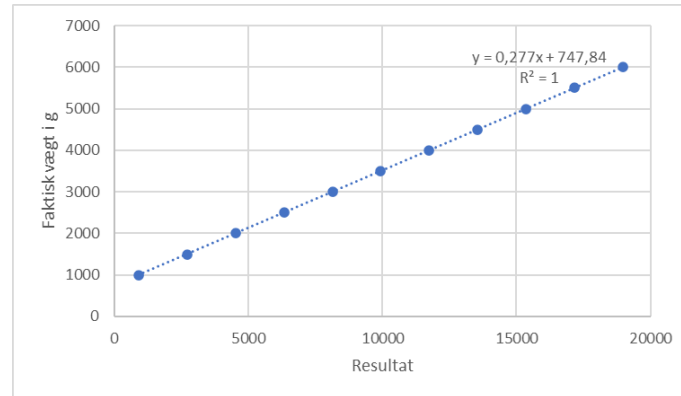
Figur 10: Plot af indledende målinger

Som det tydeligt kan ses af figur 10 starter vægtens lineære område ikke, før der er tilført en vægt på omkring 1000 gram. Dette kommer dog ikke til at blive et problem, da selve potten vejer 1200 gram, og da vi kun er interesserede i at få selve plantens masse, sættes outputtet af vægten inden planten er tilført til nulpunktet. Dette betyder selvfølgelig at planten inklusiv jorden den sidder i, ikke må veje over omkring 4800 gram, men vi vurderer, at dette er rigeligt til en potteplante, og at vejecellens maksimalbelastning på 6kg altså næppe vil overstiges.

Ved disse indledende målinger lægges der mærke til, at vægten er meget følsom over for bevægelser på bordet den står på, og vi vurderer derudover, at materialet vægtens 3D-printede hus er lavet af,

altså PLA filament, giver sig mere end forventet, og dette får den til at "hoppe" hvis testlodderne ikke placeres nænsomt. Vi mener dog, at denne fejl ikke kommer til at ødelægge plantens vægt-data, først og fremmest fordi, at potten i brug gerne skulle stå stille, for eksempel i en vindueskarm, og derudover da meningen er, at der bliver taget data fra vægten hvert 5. minut, så billedet på plantens masse skulle gerne blive præcist over tid.

For at konvertere outputtet fra ADC'en til en masse laver vi regression på målingen af vægte i det lineære område. Her er x-værdien outputtet af ADC'en og y-værdien er den faktiske vægt. På den måde vil vi få en formel for konverteringen.



Figur 11: Regression på det lineære område af vægten

Det viser sig altså, at sammenhængen mellem outputtet på ADC'en og den faktiske vægt kan beskrives med følgende udtryk:

$$y = 0,277x + 747,84$$

Vi kan desuden se af regressionen, at tendenslinjen har en  $R^2$ -værdi på 1, som peger på udtrykkets og dermed outputtets linearitet, idet de målte punkter ligger tæt på grafen.

## 4.2 Bestemmelse af præcision

For at bestemme vægtens nøjagtighed tages 10 målinger med vægten. Her noteres det konverterede output i kg, den faktiske vægt og differensen mellem de to.

Måling	Output i kg	Faktisk vægt i gram	Differens
1	996,636	1000	3,3645
2	1499,21	1500	0,791
3	2001,78	2000	-1,7825
4	2499,93	2500	0,0744
5	3001,39	3000	-1,3915
6	3495,66	3500	4,342
7	3996,85	4000	3,153
8	4502,19	4500	2,1895
9	4998,95	5000	1,0519
10	5497,65	5500	2,355

Tabel 4: 10 målinger til bestemmelse af nøjagtighed

For at finde vægtens præcision, bestemmes først middelværdien og herefter standardafvigelsen for differensen af den faktiske vægt og den målte vægt, ved de 10 målinger. Middelværdien findes ved at lægge den absolutte sum af differenserne og dividere det med antallet:

$$\frac{3,3645 + 0,791 + 1,7825 + 0,0744 + 1,3915 + 4,342 + 3,153 + 2,1895 + 1,0519 + 2,355}{10} = 2,04953$$

Da vi nu kender middelværdien for differensen, kan standardafvigelsen findes med følgende formel:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

hvor  $x$  er den enkelte måling og  $n$  er antallet af målinger, altså 10.  
Værdierne indsættes, og standardafvigelsen bestemmes til:

$$\sigma(x) = 1,23692$$

Nu kan et 95%-konfidensinterval findes, ved at bruge formlen:

$$95\% - \text{konfidensinterval} = \left[ \bar{x} - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{x} + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

Værdierne indsættes:

$$\begin{aligned} 95\% - \text{konfidensinterval} &= \left[ 2,04953 - 1,96 \cdot \frac{1,23692}{\sqrt{10}}; 2,04953 + 1,96 \cdot \frac{1,23692}{\sqrt{10}} \right] \\ &= [1,28288; 2,81618] \end{aligned}$$

Vægtens præcision kan altså beskrives ved konfidensintervallet, hvilket vil sige, at en given måling med vægten vil have en differens fra den faktiske vægt med 95% sandsynlighed ligger indenfor intervallet  $[1,28288; 2,81618]$ . Eller vi kan sige at nøjagtigheden med 95% konfidens er  $2,04953g \pm 0,767g$ , hvilket overholder punkt 3.6 fra de ikke funktionelle krav om en præcision på  $\pm 5g$  95% af tiden.

Dette afsnit tog udgangspunkt i GFV lektion 7.2, derfor vil jeg gerne henvise til denne lektion[2].

## Litteratur

- [1] ESIT. *Type SPA*. URL: [https://esit-scale.com/uploads//pdf\\_products/SPA\\_3\\_50\\_Technical\\_Specs\\_and\\_Dim.pdf](https://esit-scale.com/uploads//pdf_products/SPA_3_50_Technical_Specs_and_Dim.pdf). (accessed: 30.05.2023).
- [2] Flemming Bjerre Frederiksen. "Systematic and random errors". I: *Journal of Measurements* 7.2 (2023). URL: <https://brightspace.au.dk/d2l/le/lessons/90355/units/1245237>.
- [3] Microchip. *LM471 Op Amp Datablad*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>. Hentet fra Microchip hjemmeside. N/A.
- [4] Microchip. *MCP601 Op Amp Datablad*. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21314g.pdf>. Hentet fra Microchip hjemmeside. N/A.
- [5] Microchip. *OP27 Op Amp Datablad*. [https://www.farnell.com/datasheets/2254521.pdf?\\_ga=2.193460845.1396614530.1537263236-1466402061.1525071283](https://www.farnell.com/datasheets/2254521.pdf?_ga=2.193460845.1396614530.1537263236-1466402061.1525071283). Hentet fra Microchip hjemmeside. N/A.
- [6] Tore Skogberg. "Analogteknik". I: Addison-Wesley, 2017. Kap. 3.3.8, s. 160.
- [7] Wikipedia. *Differential amplifier*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_amplifier](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_amplifier). (accessed: 30.05.2023).
- [8] Wikipedia. *Instrumentation amplifier*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Instrumentation\\_amplifier#](https://en.wikipedia.org/wiki/Instrumentation_amplifier#). (accessed: 30.05.2023).
- [9] Wikipedia. *Load cell*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Load\\_cell#](https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell#). (accessed: 30.05.2023).