

Øving 7

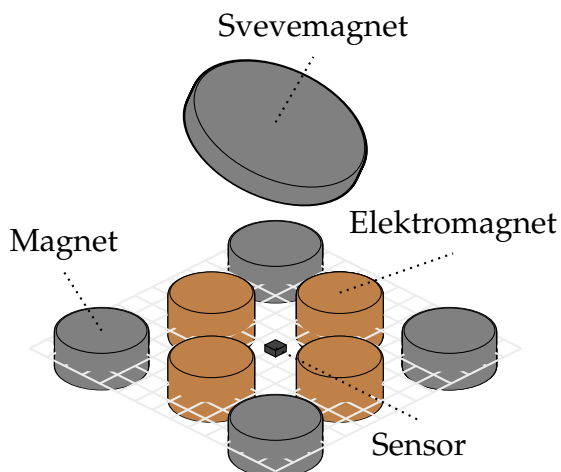
Utlevert: Mandag uke 13
Innleveringsfrist: Mandag uke 15

Problemstilling

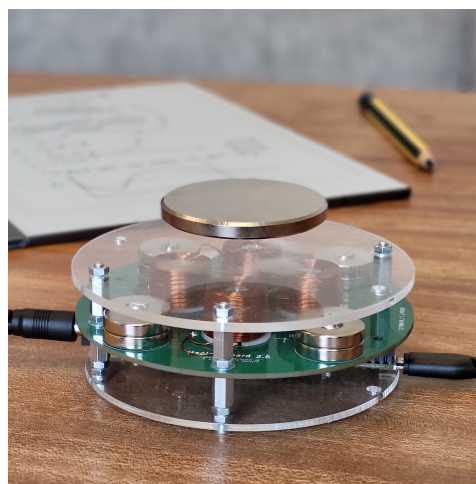
I forrige øving tok vi en titt på en modell av et elektromagnetisk system illustrert i Figur 1a. I denne øvingen skal få et gjensyn med dette systemet, men nå skal vi også anvende teorien i praksis!

Øvingen er delt i to deler: en teoretisk del og en praktisk del. Disse to skal gjennomføres separat, på forskjellige dager.

I denne øvingen skal vi anvende denne teorien i praksis, på systemet vist i Figur 1b.



(a) Illustrasjon med komponentnavn.



(b) Fysisk implementasjon (V2.6).

Fig. 1: Elektromagnetisk maglev system.

1 Del 1: Teoretisk innstilling av regulator

La oss betrakte systemet vist i Figur 1a. Dette systemet er symmetrisk langs aksene i planet, og vi kan derfor fint designe regulatorer langs én planretning av gangen. Vi betrakter derfor systemet i 2D, slik som illustrert i Figur 2.

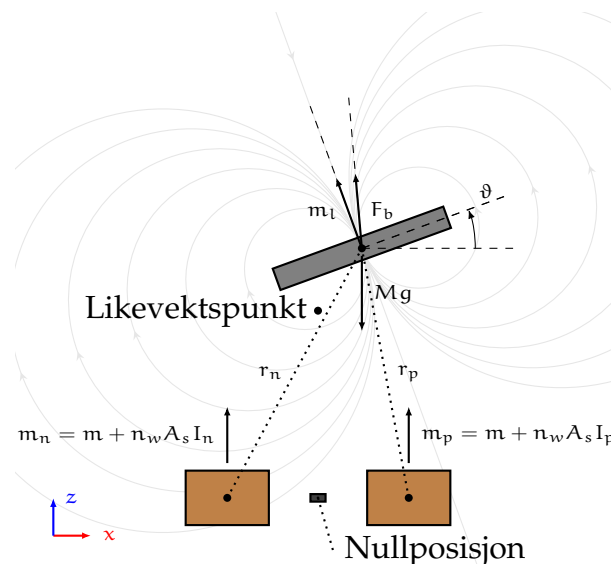


Fig. 2: Forenklet 2D-modell av det magnetiske systemet.

Systemet i Figur 1a består av en base med permanentmagneter, elektromagneter og en sensor, og en svevende magnet. Permanentmagnetene gir løftekraft, mens elektromagnetene stabiliserer systemet. Sensoren måler magnetfeltet fra den svevende magneten, men også det som produseres av de andre magnetene og elektromagnetene.

For enkelthets skyld antar vi at magnetene og elektromagnetene er *punktdipoler*, m.a.o., at størrelsen på magnetene ikke har noe å si, og at magnetene og elektromagnetene er *magnetisk identiske*, hvor strømmen i elektromagnetene kan omregnes til en ekvivalent magnetisering. Dermed kan vi gjøre enda en forenkling; vi antar at permanentmagnetene og elektromagnetene kan "plasseres" på samme sted, slik at vi får to "hybridmagneter", som vist i Figur 2.

Med antagelsene over kan vi sette sammen en relativt kompakt modell av systemet ved å ta utgangspunkt i det *magnetiske skalarpotensialet* av magnetfeltet til hybridmagnetene i basen. Dette er en verdi som beskriver energien i et magnetfelt, og vi kan bruke skalarpotensialet til den svevende magneten til å regne ut både magnetisk kraft og moment. Det totale skalarpotensialet i posisjonen til den svevende magneten er gitt av

$$\psi = \psi_p + \psi_n = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\mathbf{m}_p \cdot \mathbf{r}_p}{\|\mathbf{r}_p\|^3} + \frac{\mathbf{m}_n \cdot \mathbf{r}_n}{\|\mathbf{r}_n\|^3} \right),$$

hvor p og n beskriver magnetene på henholdsvis positiv og negativ side av nullposisjonen, \mathbf{r} er avstandsvektorer fra svevemagnetten til de to i basen, \mathbf{m} er det magnetiske

momentet til de to hybridmagnetene, og μ_0 er permeabiliteten til luft.

Fra skalarpotensialet finner vi magnetfeltet, kraften og momentet på den svevende magneten som

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \nabla \psi \implies \mathbf{F}_b = -\nabla (\mathbf{m}_l \cdot \mathbf{B}), \quad \tau_b = \mathbf{m}_l \times \mathbf{B}.$$

Kombinerer vi dette med Newtons lover og løser litt opp, får vi at bevegelsen til den svevende magneten kan beskrives av

$$M\ddot{x} = -m_l \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z}, \quad (1a)$$

$$M\ddot{z} = -m_l \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - Mg, \quad (1b)$$

$$J\ddot{\vartheta} = -m_l \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (1c)$$

hvor vi for enkelthets skyld har skrevet $\|\mathbf{m}_l\| = m_l$.

I denne oppgaven skal vi ta utgangspunkt i (1) for design av en regulator. I de utdelte kodefilene er det implementert en mer omfattende *tilstandsrommodell* av systemet. For testingens og sammenlignings skyld, vil vi anse den implementerte modellen som det "ekte" systemet.

- a) Det kan være lurt å ikke anvende strømmene I_p og I_n direkte som pådrag, men heller nettostrømmene u_x og u_z :

$$u_x := I_p - I_n, \quad u_z := I_p + I_n.$$

Bestem I_p og I_n som funksjoner av u_x og u_z . Tegn et blokkdiagram som viser transformasjonen fra u_x og u_z til I_p og I_n .

- b) Modellen i (1) er ulineær. Dersom vi lineariserer den rundt likevektspunktet vist i Figur 2 (hvor z_{eq} er gitt, og $x_{eq} = 0, \vartheta_{eq} = 0$) får vi at

$$\frac{2\pi}{\mu_0 m_l m} M\ddot{x} = 3 \frac{p_1}{q^{9/2}} x + 3 \frac{p_2}{q^{9/2}} \vartheta - 3 \frac{n_w A_s}{m} \frac{p_3}{q^{7/2}} u_x, \quad (2a)$$

$$\frac{2\pi}{\mu_0 m_l m} M\ddot{z} = -3 \frac{p_4}{q^{9/2}} (z - z_{eq}) - 3 \frac{n_w A_s}{m} \frac{p_5}{q^{7/2}} u_z, \quad (2b)$$

$$\frac{2\pi}{\mu_0 m_l m} J\ddot{\vartheta} = 3 \frac{p_6}{q^{7/2}} x - \frac{p_7}{q^{7/2}} \vartheta + 3 \frac{n_w A_s}{m} \frac{p_8}{q^{5/2}} u_x. \quad (2c)$$

hvor p_i og q er (positive) polynomer av R og z_{eq} . Her er $m := \|\mathbf{m}_p\| = \|\mathbf{m}_n\|$ magnituden til det magnetiske momentet til permanentmagnetene, og A_s og n_w tverrsnittarealet og antall viklinger i en solenoide.

Bruk den utdelte kodefilen "*numerisk.linearisering.m*", og utfør en numerisk linearisering av den mer avanserte modellen, og sammenlign resultatet med (2). Stemmer resultatet du får med (2)?¹

¹Merk: Likning (2) er ikke på tilstandsromform.

- c) Sensoren måler magnetfeltet i origo i både x og z retning. En lineær modell av disse målingene er gitt av

$$y_x = \frac{3m_l\mu_0}{4\pi z_{eq}^4}x + \frac{m_l\mu_0}{4\pi z_{eq}^3}\vartheta, \quad (3a)$$

$$y_z = -\frac{3m_l\mu_0}{2\pi z_{eq}^4}z + \frac{n_w A_s \mu_0}{2\pi z_{eq}^3}(u_x + u_z). \quad (3b)$$

Bruk Matlab til å vurder observerbarheten og kontrollerbarheten til systemet. Hva skjer dersom vi ikke har tilgang til y_z ? Modellparametrene er oppgitt i "*numerisk_linearisering.m*".

- d) Anta nå at det ikke er noen direkte kobling av input på måling, altså at $D = 0$ (i en tilstandsrommodell). Med (2) og (3), vis at overføringsfunksjonene $\hat{y}_x(s) = G_x(s)\hat{u}_x$ og $\hat{y}_z(s) = G_z(s)\hat{u}_z$ ² kan beskrives som³

$$G_x(s) = \frac{a_0 s^2 + a_1}{s^4 + b_1 s^2 - b_2}, \quad G_z(s) = \frac{a_2}{s^2 + b_3},$$

hvor

$$\begin{aligned} a_0 &= 80, & a_1 &= 2.4 \cdot 10^5, & a_2 &= 1.8, \\ b_1 &= 6.0 \cdot 10^5, & b_2 &= 1.2 \cdot 10^9, & b_3 &= 4.0 \cdot 10^9. \end{aligned}$$

Hva sier disse oss om stabiliteten til systemet?

- e) La oss nå kun betrakte systemet i x-retning. Det viser seg at en PD-regulator kan brukes til å stabilisere $G_x(s)$. Routh-Hurwitz kriteriet tilsier at følgende må være oppfylt for at systemet skal bli stabilt

$$k_p > \frac{b_2}{a_1}, \quad k_d > 0.$$

Finn regulatorparametre som gjør systemet praktisk stabilt.

- f) Verifiser valget av regulatorparametre med Nyquist kriteriet.
- g) Implementer regulatoren for det "ekte" systemet i Simulink filen "*maglev_2d.slx*", hvor parametre og initialbetingelser er gitt. La $u_z = 0$. Fungerer regulatoren som forventet?
- h) Test regulatoren på 3D modellen i Simulink filen "*maglev_3d.slx*".⁴

²Symbolet " $\hat{\cdot}$ " beskriver Laplacetransformerte signaler.

³**Hint:** Her kan det være lurt å starte med å bytte ut alle koeffisientene i ligning (2) med positive konstanter.

⁴**Hint:** Vi må implementere én regulator for hver retning i planet.

2 Del 2: Eksperimentell innstilling av regulator

Systembeskrivelse

Systemet vist i Figur 1b heter Maggy V2.6, og er det samme systemet du har fått utdelt. Maggy er 10 cm i diameter, og består av et kretskort med påmonterte komponenter, og en svevemagnet. Målet med Maggy er å få svevemagneten til å sveve.

OBS: Vær forsiktig med svevemagneten! Det er en veldig sterk magnet, men den er skjør og kan knuse. Unngå å holde den i nærheten av noe magnetisk (som PC, mobil og andre magneter), og hold godt på den i nærheten av Maggy.

Sveving muliggjøres av fire par N38 neodym magneter og fire kobberspoler. Svevemagneten er en stor N38 neodym-magnet på 5 cm i diameter, og den stabiliseres i et likevektspunkt over basen ved hjelp av tilbakekobling fra en digital Hall-effekt sensorer, synlig på midten av brettet⁵. Sensoren måler magnetfeltet i tre retninger (x , y , z), med en maksimal samplingsfrekvens på 5 kHz.

Data fra sensoren mates til en Teensy 4.1 mikrokontroller. Denne drives av en ARM-Cortex M7 mikroprosessor på 600 MHz. Teensyen er montert på kretskortet sammen med andre viktige elektroniske komponenter, inkludert spenningsomformere, motordrivere og en rekke passive komponenter.

Teensy 4.1 kan programmeres direkte igjennom Arduino IDE – et programmeringsverktøy som lar oss skrive C-kode for kjøring på mikrokontrollere. Maggy programmeres og sensordata kan leses kun med strøm fra USB kabelen på Teensy 4.1. Maggy har derimot også en dedikert strøminngang som gir strøm til elektromagnetene.

⁵Det er to andre Hall-effekt sensorer på Maggy, men i denne oppgaven skal vi bare bruke en av de.

Utfordringer ved fysisk implementasjon

Når vi bruker en modell for å designe regulatorer for fysiske systemer er det mange praktiske problemer som ignoreres/utsettes til fordel for ryddigere teori. Dette er det viktig å være klar over når vi skal implementere regulatorer. De vanligste utfordringene vi møter er:

- **Diskretisering:** I praksis måles og styres alle signaler i diskret tid, da vi bruker digitale datamaskiner for regulering. Dette kan føre til en rekke utfordringer med blant annet tidsforsinkelsen, samt gjøre det vanskelig å utføre numerisk differensiering.
- **Samplingsfrekvens:** Høyere samplingsfrekvenser kan forbedre ytelsen, men krever mer prosesseringskraft og kan introdusere mer støy. Å velge en passende frekvens er en viktig avveining mellom presisjon og systemkompleksitet, da for høy frekvens kan overbelaste prosessoren, mens for lav kan føre til unøyaktigheter i responsen.
- **Målestøy:** Målingene fra sensorer vil alltid inneholde en viss grad av støy. Dette kan påvirke ytelsen på regulatoren, og er særlig kritisk når vi er nødt til å utføre numeriske beregninger av tidsderivat.
- **Umodellert dynamikk:** I den fysiske verden vil det ofte være dynamiske krefter og påvirkninger som modellen ikke har tatt høyde for, slik som friksjon, vibrasjoner, eller små variasjoner i komponenter. Disse kan påvirke systemets oppførsel og gjøre det vanskeligere å få stabil kontroll basert på en idealisert modell.
- **Transportforsinkelse:** I mange systemer er det en forsinkelse mellom måling, prosessering, og handling, som ikke alltid er modellert (lav samplingsfrekvens er et opphav til dette). Slike forsinkelser kan føre til ustabilitet og må tas høyde for i regulatordesign, spesielt for systemer hvor det oppstår raske endringer.
- **Begrensninger i aktuatorer:** I praksis har aktuatorer, som motorer og elektromagneter, fysiske begrensninger på kraft, hastighet, og respons. Disse begrensningene kan føre til metningseffekter der systemet ikke kan reagere så raskt eller sterkt som ønsket, noe som kan føre til ustabilitet eller redusert kontrollpresisjon.
- **Sensoroppløsning og kalibrering:** Sensorer har begrenset oppløsning og må ofte kalibreres nøyaktig for å sikre riktige målinger. Lav oppløsning eller dårlig kalibrering kan føre til unøyaktige målinger, som kan påvirke regulatorens ytelse og systemets stabilitet.

Samtlige av de ovennevnte utfordringene finnes også i Maggy, og det kan være nyttig å tenke over hvordan disse påvirker regulatortuningsprosessen. Noen av disse vil vi også ta direkte hånd om senere i øvingen.

Oppgave 1: System & oppsett

Arduino er et kjent verktøy for enkel C-kode programmering og kompilering til mikrokontrollere. I denne oppgaven skal vi sette opp Arduino for å kunne kjøre vår egen kode på Maggy.

- a) Installer siste versjon av [Arduino IDE](#).
- b) Når du starter Arduino IDE vil du se en tom Arduino sketch. Gå til "File >> Preferences" (WINDOWS) eller "ARDUINO IDE >> Settings" (MAC), og lokaliser "Additional boards manager URLs"-feltet på bunnen av vinduet, slik som vist i Figur 3. Kopier følgende lenke inn i feltet:

https://www.pjrc.com/teensy/package_teensy_index.json

Bruk komma for separasjon dersom det allerede står noe skrevet i feltet.

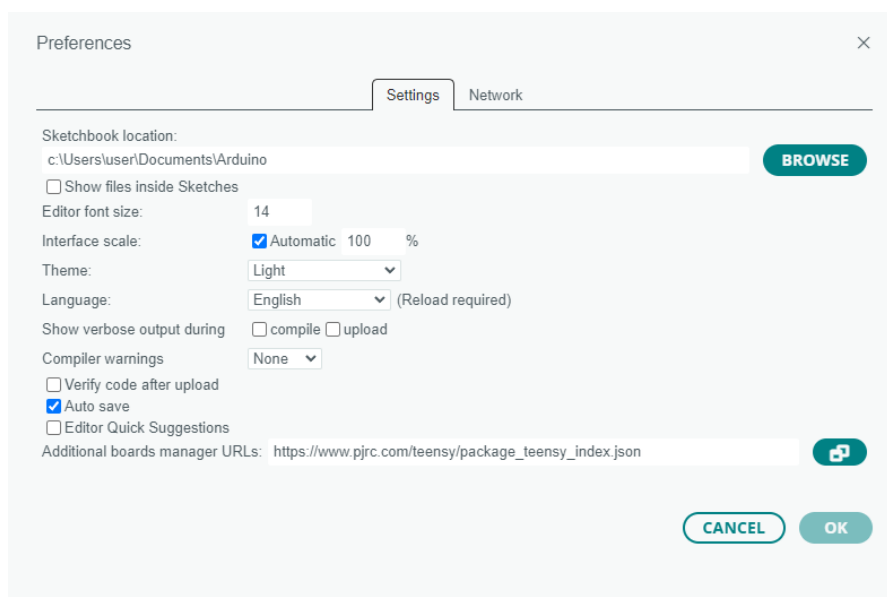


Fig. 3: Arduino IDE preferanser.

- c) Trykk på "boards manager" i verktøylinjen til venstre på forsiden på Arduino IDE. Søk "Teensy" og installer Teensy pakken av Paul Stoffregen, slik som vist i Figur 4.
- d) Trykk på "library manager" på verktøylinjen til venstre og søk "TLE493D" i søkefeltet og installer pakken fra "Infineon Technologies", som vist i Figur 5.

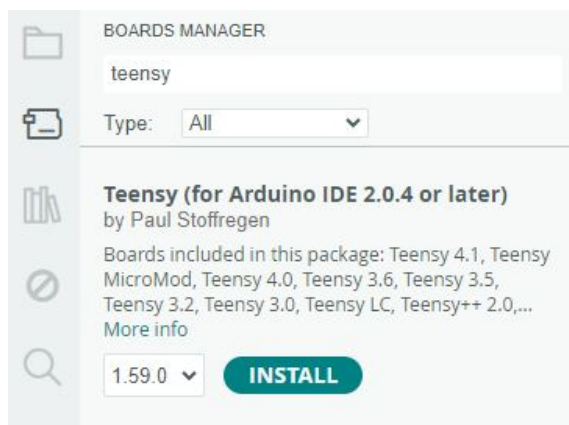


Fig. 4: Arduino IDE boards manager.

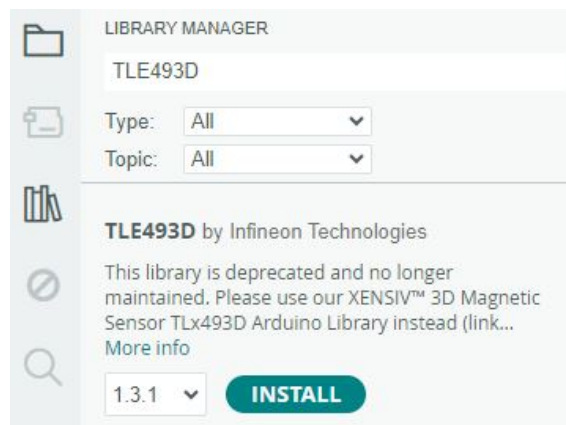


Fig. 5: Arduino IDE library manager

OBS: Før du setter strøm på Maggy, fjern den store diskmagneten fra systemet. Skriptene vi skal kjøre senere vil kjøre rutiner for fjerning av bias i målingene, og vi ønsker ikke å fjerne effekten av svevemagnetten.

- e) Koble Maggy og Teensy til PCen med en micro-USB kabel.⁶ Sjekk at du er i stand til å laste opp en blank sketch ved å velge COM-porten til Teensy 4.1 fra "Select board" drop-down menyen på toppen av vinduet. Trykk "Upload" for å kompilere og laste sketchen til Teensy 4.1. Du vil se mye rød tekst i konsollvinduet under kompilering og opplasting, men det skal ha gått fint dersom de siste tekstlinjene er slik som vist i Figur 6.

```
Memory Usage on Teensy 4.1:
FLASH: code:17120, data:5304, headers:8292  free for files:8095748
RAM1: variables:6464, code:14040, padding:18728  free for local variables:485056
RAM2: variables:12416  free for malloc/new:511872
```

Fig. 6: Melding i Arduino IDE kommandovindu ved vellykket kompilering.

⁶Dersom Teensyen ikke blir gjenkjent av PC-en, koble til ekstern strøm til Maggy ved å plugge inn strømkabelen på motsatt side av USB-porten.

Oppgave 2: Systemtesting & Kalibrering

Før vi lager en regulator burde vi teste at systemet fungerer som forventet. Vi ønsker også å kalibrere sensoren ved å fjerne uønskede effekter fra målingene. Siden ingen systemer er helt like, kan asymmetrier og andre forstyrrelser skape utfordringer ved regulering.

- a) Kompiler og last opp skriptet "sensortest.ino" til Maggy.
- b) Trykk på "serial plotter" i høyre hjørne. Du skal nå se et plot med måledata som sendes fra magnetsensoren i Maggy. B_x , B_y og B_z er hhv. magnetfeltet målt i x , y og z retning. Hvordan ser målesignalene ut? Flytt litt rundt på Maggy. Endrer signalene seg?
- c) Hold svevemagneten i nærheten av Maggy for å se hvordan den påvirker signalene. Hvordan endrer signalene seg når du flytter på svevemagneten?

OBS: Elektromagnetene blir varme om de står på for lenge. Trekk ut strømkabelen når Maggy ikke er i bruk, for å unngå at elektromagnetene blir overopphetet.

- d) Last opp skriptet "elektromagnettest.ino" til Maggy. Seriel plotteren vil nå vise kontrollsignal til elektromagnetene, samt sensormålingene fra tidligere. Hvordan endrer sensormålingene seg med endring i strøm i elektromagnetene? Pass på at strømkabelen er koblet i slik at elektromagnetene får strøm.

De foregående oppgavene viser hvordan sensorene plukker opp målinger fra permanentmagnetene, elektromagnetene og svevemagneten. Vi ønsker kun å måle magnetfeltet til svevemagneten. Vi kan heldigvis kvitte oss med mesteparten av effektene fra de andre komponentene ved å måle hva de er når svevemagneten ikke er til stede, og deretter kompensere for disse i koden.

- e) Last opp sketchen "beregning_direkte_foroverkobling.ino". Denne filen beregner verdier for hvordan målingene blir påvirket av elektromagnetene. La skriptet kjøre uten svevemagneten i nærheten og les av verdiene for kompensasjon for de ulike elektromagnetene fra "serial monitor".
- f) Legg disse verdiene inn i toppen av "elektromagnettest.ino" og velg "remove_mean = True" og "remove_direct_feedthrough = True". Kompiler på nytt. Har vi klart å kvitte oss med effekten av permanentmagneten og elektromagnetene i målingene? Test om målingene endrer seg når du beveger svevemagneten rundt Maggy.

Oppgave 3: Eksperimentell innstilling av regulator

Ta utgangspunkt i den utleverte filen "PD_control.ino".⁷ Filen inneholder riktig oppsett av Teensy, samt filter for fjerning av støy og andre forstyrrelser, og en halvferdig PD-regulator. I denne oppgaven skal du justere k_p og k_d i filen slik at magneten til slutt svever.

Det er verdt å merke seg at verdiene for k_p og k_d for Maggy har en annen skalering enn i simulering – da inngangssignalene ikke er strøm, og utgangssignalene er oppgitt i mT og ikke T –, men at forholdet mellom de to kontrollparametrene burde være noenlunde likt. Som en pekepinn burde verdiene være omtrent

$$k_p \in [100, 600],$$

$$k_d \in [0, 2].$$

- a) Åpne "PD_regulator.ino" og sett kalibreringsverdiene slik som i forrige oppgave.
- b) Juster verdiene for k_p og k_d for å oppnå stabil sveving. Start med små verdier og øk gradvis. Du skal kunne føle at svevemagnetten vil naturlig legge seg i en "grop" over midten av Maggy når regulatoren er tunet.

⁷Denne filen inneholder en terskel som gjør at det ikke går strøm i elektromagnetene med mindre svevemagnetten er nærme nok. Du vil kunne se dette som et "hopp" i dataen og merke at det rykker litt i magneten.