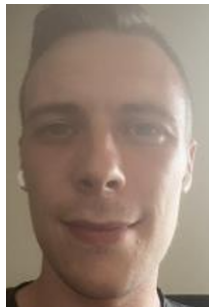


Metaldetektor projekt

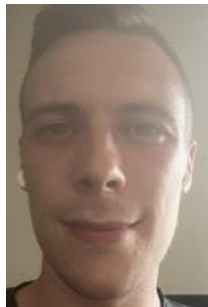
Gruppe 1

34621

Electromagnetic sensors and digital signal processing
Danmarks Tekniske Universitet



Sebastian Sørensen,
s233986



Oliver Holm,
s233988



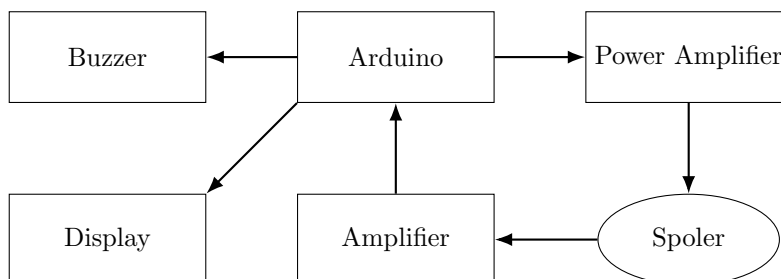
Bilal Alali,
s171678

January 18, 2026

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	2
2	Analyse	2
3	Design	2
3.1	Analogt design	2
3.1.1	Energiberegninger	2
3.1.2	Spoleberegninger	2
3.1.3	Power Amplifier	4
3.1.4	Filtrering af spoesignal	5
3.1.5	Forstærkning af spoesignalet	6
3.2	Digitalt design	7
3.2.1	Moduldiagram og introduktion	7
3.2.2	Brugerinteraktion	8
3.2.3	DFT algoritme og sampling	8
3.2.4	Tilstandsmaskine	8
3.2.5	Digital signal behandling	8
4	Implementering og test	8
5	Ansvarsområder (hvem har lavet hvad)	8
6	Konklusion	9
7	Appendix	9
7.1	Gantt kort	9
7.2	Mødereferater	9

1 Introduktion



Figur 1: Overordnet moduliagram af systemet

2 Analyse

3 Design

3.1 Analogt design

3.1.1 Energiberegninger

Vi undersøgte os frem til at batteriet har en kapacitet på 550mAh. Da batteriet aflades fra 9V til 6V, har vi lavet udregningen:

$$E_{tot} = V \cdot I \cdot 3600 \iff E_{tot} = \frac{9V + 6V}{2} \cdot 0.55A \cdot 3600s = 14850J$$

Ved måling af strømforbruget finder vi at OLED-display og Arduinoen forbruger $\approx 76.2mA$. Dette giver os

$$E_{MCU} = 5V \cdot 76.2 \cdot 10^{-3}A \cdot 3600s = 1371.6J$$

Vi reserverer 15% af batteriet som buffer, for at være sikker på at overholde kravene. Resten af energien kan bruges til TX-spolen.

$$E_{TX} = E_{tot} \cdot (1 - 0.15) - E_{MCU} = 11250.9J$$

3.1.2 Spoleberegninger

TX-spole

Ved resonans kan spændingen gennem spolen approksimeres ved grundtonen i fourierrækken

$$a_n \approx 2 \left(\frac{A}{n\pi} \right) \sin \left(\frac{n\pi}{2} \right) = 2 \left(\frac{9V}{\pi} \right) \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) = 5.73V$$

Hvorved RMS-spændingen kan bestemmes

$$V_{RMS} = \frac{a_n}{\sqrt{2}} = 4.05V$$

Derved kan vi nu beregne strømmen vi kan sende igennem spolen

$$I_{TX} = \frac{E_{TX}}{t \cdot V_{RMS}} = \frac{11250.9J}{3600s \cdot 4.05V} = 0.4628A$$

Radiussen på TX-spolen vælges til $r_{TX} = 10cm$, med $D_{TX} = \emptyset 0.4mm$. Derved kan antallet af viklinger beregnes ved

$$R_{TX} = \frac{V_{RMS}}{I_{TX}} = 8.754\Omega$$

$$N_{TX} = \frac{R_{TX} \cdot \left(\frac{D_{TX}}{2}\right)^2}{2 \cdot r_{TX} \cdot \rho_{cu}} = \frac{8.754\Omega \cdot \left(\frac{0.4mm}{2}\right)^2}{2 \cdot 10cm \cdot 1.77 \cdot 10^{-8}\Omega \cdot m} = 98.9$$

hvilket afrundes til $N_{TX} = 99$.

Selvinduktansen i spolen findes ved

$$L = \frac{0.394 \cdot r^2 \cdot N^2}{9 \cdot r + 10A} = \frac{0.394 \cdot 10^2 \cdot 99^2}{9 \cdot 10 + 10} = 3.855mH$$

For at kunne lave Arduino'ens firkantsignal til en sinuskurve anvendes et resonanskredsløb, som har resonansfrekvens på 2kHz. Størrelsen af kondensatoren findes ved at løse ligningen

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \iff 2kHz = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.855mH \cdot C}} \implies C = 1.642\mu F \quad (1)$$

Magnetfeltet fra TX-spolen beregnes, da bucking-spolen skal udligne B-feltet fra TX-spolen, for på den måde at tilsikre at vi kun måler på magnetfeltet fra metallet i detektoren.

$$|B| = \frac{\mu_0 I_{TX} N_{TX}}{2r_{TX}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \cdot 0.4628A \cdot 99}{2 \cdot 10cm} = 287.6\mu T$$

Bucking-spole

Derved kan Bucking-spolen beregnes. Vi vælger en radius på $r_{Buck} = 5cm$, og antallet af viklinger beregnes ved

$$|B| = \frac{\mu_0 \cdot I_{TX} \cdot N_{Buck}}{2 \cdot r_{Buck}} \iff 287.6\mu T = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.4628A \cdot N_{Buck}}{2 \cdot 5cm} \implies N_{Buck} = 49.458$$

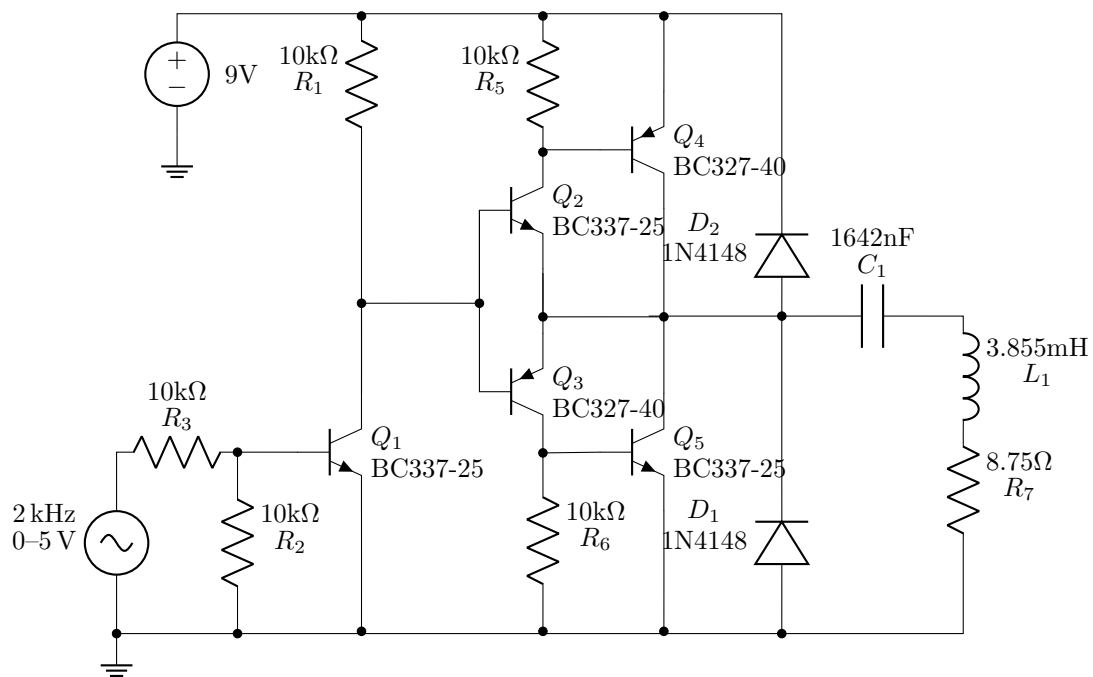
hvilket afrundes til $N_{Buck} = 50$.

RX-spole

For at opnå en god følsomhed på sensoren, er vi opmærksomme på at induktansen i RX-spolen skal være minimum $L_{RX} = 10mH$. Derved beregnes antallet af viklinger ved

$$10 \cdot 10^3 = \frac{0.394 \cdot r_{RX}^2 \cdot N_{RX}^2}{9r_{RX} + 10A_{RX}} = \frac{0.394 \cdot 5^2 \cdot N_{RX}^2}{9 \cdot 5 + 10} \implies N_{RX} = 236$$

3.1.3 Power Amplifier

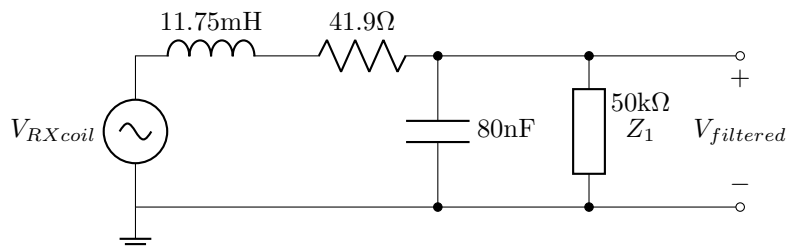


Figur 2: Power amplifier kredsløb til at øge strømmen gennem TX-spolen.

Ovenfor ses vores design af effektforstærkeren, som bruges til at forstærke signalet fra Arduino'en til at kunne drive TX-spolen. Kredsløbet virker ved:

- Firkantsignalet sendes ind i forstærkeren gennem en modstand som beskytter Arduino'en og styrer strømmen ind i transistoren Q_1 .
- Transistor-konfigurationen fungerer som en forstærker som via. en styrestrøm kontrollerer en større strøm fra batteriforsyningen (9V batteriet), som driver TX-spolen.
- TX-spolen (L_1) genererer et magnetfelt ved resonansfrekvensen
- Kondensatoren (C_1) er beregnet (Ligning 1) således at der opstår resonans ved detektionsfrekvensen på 2kHz
- Modstanden R_7 repræsenterer den ohmske modstand i TX-spolen.
- Dioderne D_1 og D_2 beskytter kredsløbet fra den inducerede spænding i spolen.

3.1.4 Filtrering af spolesignal



Figur 3: Kredsløb til at filtrere støj væk ($\approx \frac{F_s}{2} = 4\text{kHz}$) inden signalet bliver forstærket (som vist i Figur 5). Modstanden på $50\text{k}\Omega$ repræsenterer indgangsimpedansen i operationsforstærkerkredsløbet.

Som det ses i figuren, er $V_{filtered} = V_{Z_1}$. Filterets overføringsfunktion kan opstilles ved almindelig spændingsdeling, dvs.

$$H(\omega) = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R_1 + Z_1 + R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C}}$$

hvorefter fasen kan analyseres ved

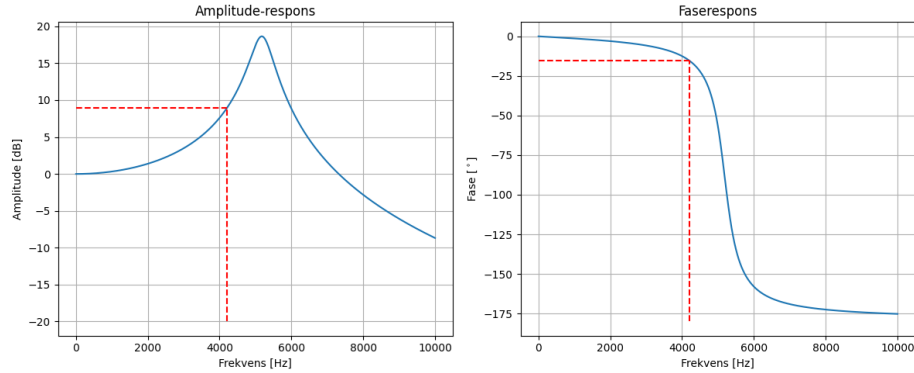
$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im\{H\}}{\Re\{H\}} \right)$$

og amplitude responset ved

$$H_{dB} = 20 \log 10(H)$$

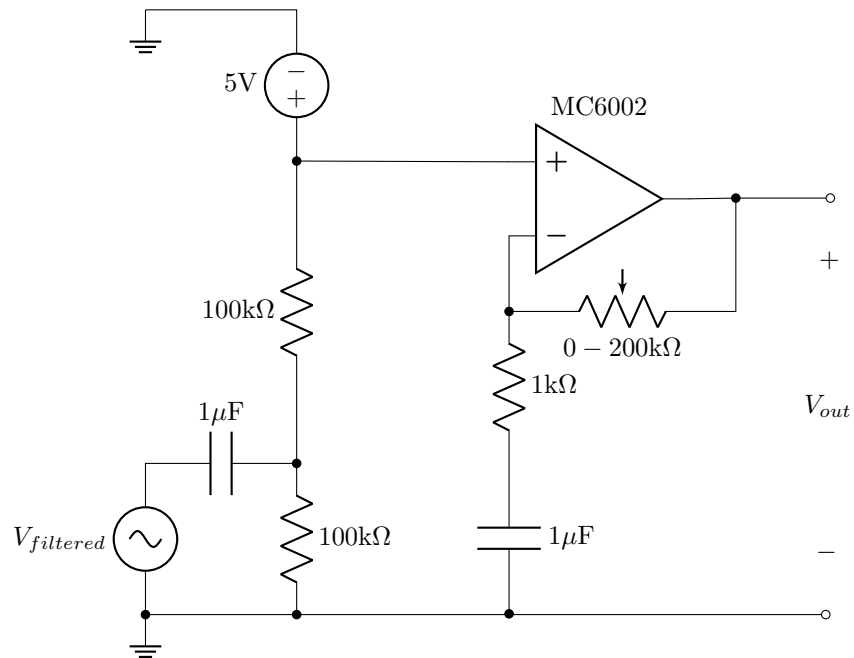
Ifølge Shannon's sampling teorem ved vi at $F_{max} < \frac{F_s}{2}$. Da vi ikke har noget signal som ligger over $\frac{F_s}{2} = 4\text{kHz}$ anvender vi dette filter, for at undgå problemer med aliaseringer. Filteret er designet således at fasen bliver påvirket mindst muligt, da det netop er fasen vi bruger til at skelne mellem materialer.

Figur 4: RX-filterets fase- og magnitude respons, med markering af 4.2kHz



Da metaldetektorens følsomhed overfor frekvenser afhænger af bl.a temperatur, har vi valgt at designe filteret efter et udgangspunkt på 4.2kHz. Som det ses i plottet får vi dæmpet det værste af eventuelt højfrekvent støj, samtidigt med at vi aflæser fasen nogenlunde præcist med udgangspunkt i 4.2kHz.

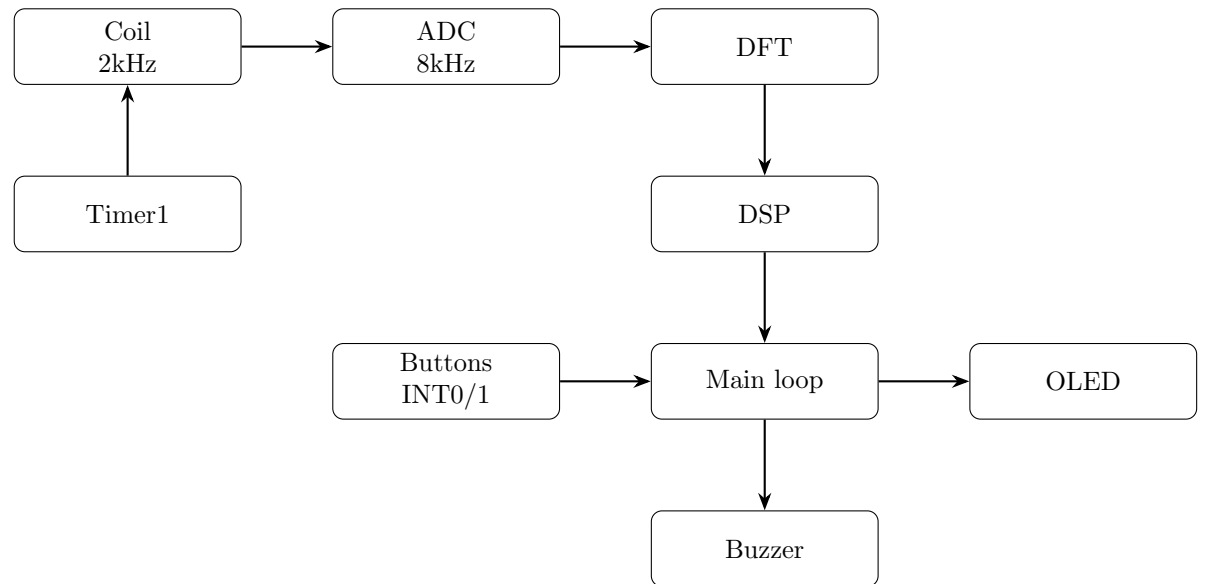
3.1.5 Forstærkning af spolesignalet



Figur 5: Kredsløb til at forstærke den filterede spænding fra RX-spolen op, inden det læses ind i MCU ADC'en.

3.2 Digitalt design

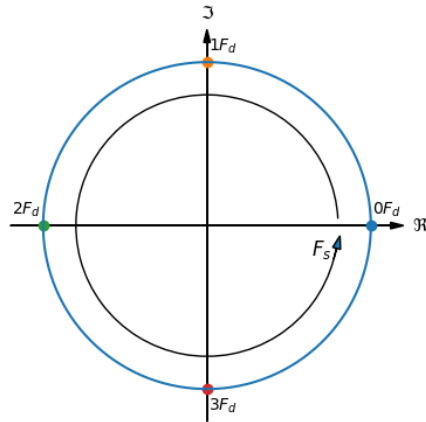
3.2.1 Moduldiagram og introduktion



Figur 6: Overordnet moduldiagram af systemet

3.2.2 Brugerinteraktion

3.2.3 DFT algoritme og sampling



Figur 7: Grafisk illustration over princippet bag DFT-algoritmen. Ved at vælge $F_d = \frac{F_s}{4}$, undgår vi at lave komplicerede komplekse beregninger.

3.2.4 Tilstandsmaskine

3.2.5 Digital signal behandling

4 Implementering og test

5 Ansvarsområder (hvem har lavet hvad)

Fælles

- Vikling af spoler
- Implementering af kredsløb

Bilal

- 3D-print
- Power Amplifier
- Spoleberegninger
- Energiberegninger

Sebastian

- C-programmering
- RX-filter
- Grafik til rapport (plots, kredsløbstegninger, indskrivning af rapport)
-

Oliver

- C-programmering
-

6 Konklusion

7 Appendix

7.1 Gantt kort

7.2 Mødereferater