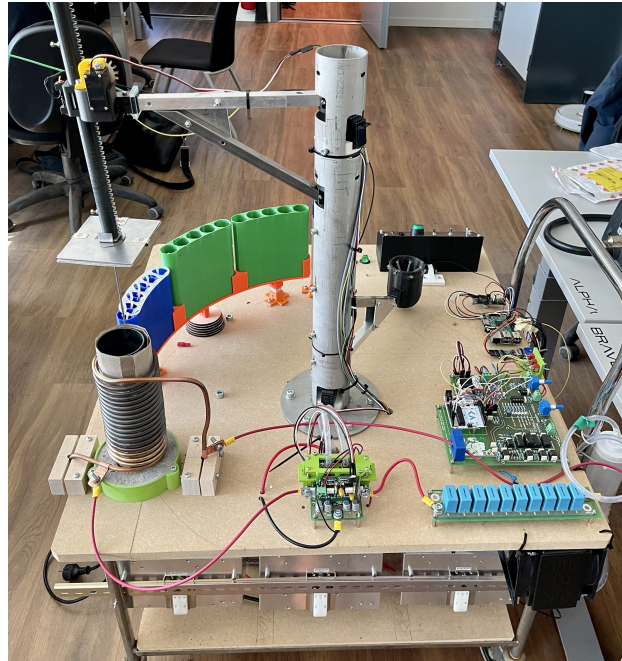




CHALMERS



Automatiserad induktionsgrill för beredning av french hot dog

Institutionen för Elektroteknik

Avdelningen för elkraftteknik

Lowé Blank
Gustav le Dous
Jakob Henningsson
Kristoffer Olsson
Otto Olsson
Andreas Åberg

Institutionen för Elektroteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2023

Automatiserad induktionsgrill för beredning av french hot dog

Lowe Blank
Gustav le Dous
Jakob Henningsson
Kristoffer Olsson
Otto Olsson
Andreas Åberg



CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik
Avdelningen för elkraftteknik
Kandidatarbetsgrupp EENX16-VT23-35
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2023

Automatiserad induktionsgrill för beredning av french hot dog

Lowe Blank

Gustav le Dous

Jakob Henningsson

Kristoffer Olsson

Otto Olsson

Andreas Åberg

© Lowe Blank, Gustav le Dous, Jakob Henningsson, Kristoffer Olsson, Otto Olsson, Andreas Åberg, 2023.

Handledare: Robert Karlsson, Avdelningen för Elkraftteknik

Examinator: Jimmy Ehnberg, Avdelningen för Elkraftteknik

Kandidatarbete 2023

Institutionen för Elektroteknik

Avdelningen för elkraftteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telephone +46 31 772 1000

Sammanfattning

Detta arbete är ett fortsättningsarbete på en prototyp som tillverkades i samband med ett kandidatarbete från år 2022 med samma frågeställning. Det föregående arbetet gick ut på att tillverka en helautomatiserad induktionsgrill med syfte att grilla french hot dogs på kort tid. Arbetet resulterade i en initial prototyp som visade mycket potential men som i slutändan inte fungerade. Genom att felanalysera och göra lämpliga förbättringsåtgärder så har årets projekt resulterat i en helautomatiserad induktionsgrill med högre effektutveckling i metallröret och därmed snabbare korvgrillning. Även det autonoma systemet är mer stabilt och har en högre grad av precision. Spolens höga resistans resulterade dock i en låg kvalitetsfaktor och därmed höga effektförluster. För att uppnå en kortare tillagningstid hade ytterligare strömtillförsel varit nödvändigt.

Nyckelord: Induktionsvärmare, automation, växelriktare, frekvensgenerering, vattenkylning, Raspberry Pi, Arduino.

Abstract

This work is a continuation of a prototype that was developed in connection with a similar bachelor's project in 2022. The previous work aimed to manufacture a fully automated french hot dog grill for quickly grilling French hot dogs. The work resulted in an initial prototype that showed great potential but ultimately did not function as intended. By analyzing the errors and implementing appropriate improvements, this year's project has resulted in a automated induction grill with improved power development in the metal tube, enabling faster hot dog grilling. Additionally the autonomous system has become more stable and hence can provide more precision while functioning. However, due to the high resistance of the coil a low quality factor was produced and consequently high power losses. To achieve a shorter cooking time, additional power supply would have been necessary.

Keywords: Induction heating, inverter circuit, autonomous system, water cooling, frequency generator, Raspberry Pi, Arduino.

Förord

Vi vill börja med att tacka vår handledare, Robert Karlsson, som med sin erfarenhet och goda råd hjälpt oss framåt i arbetet.

Vi vill också tacka Sonja Lundmark för all hjälp och stöd vi har fått genom feedback på språkbruket och strukturen i vår rapport.

Slutligen vill vi rikta ett stort tack till Albin Kjellberg, Erik Levin, Oscar Mark, Erik Olsson, Hannes Skoog och Robin Örtenfelt från föregående års kandidatarbetsgrupp. Erat gedigna arbete förra året lade grunden för att vi skulle kunna fortsätta utvecklingen av induktionsgrillen.

Förkortningar

Nedan är listan över akronymer som har använts under rapporten, listade i alfabetisk ordning:

AC	Växelström
DC	Likström
CAD	Computer Aided Design
emk	Elektromotorisk kraft
VCC	Voltage common collector
PA	Polyamidplast
ABS	Akrylnitril Butadien Styren, ABS-plast, en plast
PVC	Polyvinyl chloride, polyvinylklorid, en plast
PP	Polypropylene, polypropen, en plast
PC	Polycarbonate, polykarbonat, en plast
MOSFET	Metal Oxide Semi Conductor Field Effect Transistor, en fälteffekts-transistor.
VCC	Voltage Common Collector

Nomenklatur

Nedan följer en lista över de variabler och konstanter som har använts i rapporten.

Variabler

ρ	Resistivitet [Ωm]
\mathcal{E}	Elektromotorisk kraft [V]
Φ	Magnetisk fältstyrka [T]
μ_r	Relativ permeabilitet [-]
r	Radie [m]
$K(x)$	Nagaoka koefficienten [-]
δ	Strömpenetrationsdjup [m]
q	Total effekt [W]
T	Temperatur [K]
E_b	Maximal emitterad energi [J]
ϵ	Emitteringsfaktor[-]
F_{ij}	Synfaktor [-]
L	Induktans [H]
C	Kapacitans [F]
f	Frekvens [Hz]
ω	Vinkelfrekvens [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$]
Z	Impedans [Ω]
X	Reaktans [Ω]
Q	Kvalitetsfaktor [-]
Y	Admittans [Ω^{-1}]
P	Effekt [W]

Konstanter

μ_0	Permeabilitet i vakuum: $4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{\text{H}}{\text{m}}]$
σ	Stefann-Boltzmanns konstant: $5,6704 \cdot 10^{-8} [\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}]$



Innehåll

Förkortningar	ix
Nomenklatur	xi
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Induktionsgrill	3
2.1.1 Induktion	3
2.1.2 Spolinduktans	3
2.1.3 Skinneffekt	4
2.2 Beståndsdelar	4
2.2.1 Transistorer	4
2.2.2 LC-tank	5
2.2.3 Växelriktare	8
2.2.4 Drivkrets och bootstrapping	10
2.2.5 Galvanisk isolation	11
2.2.6 Mica	11
2.3 Precisionslikriktare	11
2.4 Autonomt system	12
2.4.1 Mikrokontroller	12
2.4.2 Drivmotorer	13
2.4.3 Styrning och autonoma sekvenser	13
2.5 Värmeöverföring	14
2.6 Kylning	17
3 Metod	19
3.1 Induktionsgrillen	19
3.1.1 Designprocess	19
3.1.2 Simuleringsmodeller i LTspice	20
3.1.3 LC-tanken	23
3.1.4 Konstruktion av kretskortet	23
3.1.5 Strömförsörjning	26
3.1.6 Kylning	27
3.1.7 Temperaturmätning	28
3.2 Automatiserade systemet	28
3.2.1 Problemområden	29
3.2.2 Arbetsgång/designprocess	30
3.2.3 Materialval	30
3.2.4 Hållfasthetsåtgärder	31
3.2.5 Tillverkning och konstruktion	33
3.2.6 Pucksystemet	33
3.2.7 Styrning av systemet	35

4	Resultat	41
4.1	Induktionsgrillen	41
4.1.1	Fördröjningskrets	41
4.1.2	Signalbehandling	42
4.1.3	Växelriktare	44
4.2	Funktionstester av systemet	45
4.2.1	Högeffektstest	45
4.3	Resultat av det autonoma systemet	47
4.3.1	Design och konstruktion	47
4.3.2	Autonom styrning	47
5	Diskussion	49
5.1	Utveckling av induktionsgrillen	49
5.1.1	Spolen	49
5.1.2	Test av induktionsgrill	49
5.1.3	Eliminera störningar	50
5.2	Utveckling av det autonoma systemet	50
5.2.1	Optimering av tillagningsprocessen	52
5.3	Samhälletiska och etiska perspektiv	52
5.3.1	Matsvinn	52
5.3.2	Samhällsnytta med systemet	52
6	Slutsats	53
	Referenser	55
A	Simuleringar	I
A.1	Fördröjningskrets	I
A.2	Växelriktare	II
A.3	Strömmätare	IV
A.4	Överströmsskydd	V
B	Ritningar	VII
B.1	Fläns	VII
B.2	Baspelare	VIII
B.3	Servopuck	IX
B.4	Stödpuck	X
B.5	Stödarm	XI
B.6	Vinkelpuck	XII
B.7	Kretsschema	XIII
C	Komponentlista	XV

1 Introduktion

Matsvinn är ett stort problem i Sverige och runtom i världen. Det beräknas att varje enskild svensk slänger cirka 15 kg ätbar mat varje år. Vilket motsvarar en total mängd på 155 000 ton mat som slängs per år i Sverige [1]. Matsvinnet har en stor påverkan på miljön då 25% av världens koldioxidutsläpp kommer från livsmedelsindustrin och endast 4,5% är från den bakomliggande infrastrukturen [2]. Detta innebär att den största delen av koldioxidutsläppen kommer från själva matproduktionen. När mat sedan slängs i onödan, genererar det onödiga koldioxidutsläpp som kan förhindras genom att mindre mat slängs.

För att minska matsvinnet kan en lösning vara att inte laga för mycket mat på en och samma gång, och istället laga en måttlig mängd mat för tillfället. Problemet uppstår däremot när det måste serveras stora mängder mat på kort tid och med obestämmd mängd, exempelvis på snabbmatsrestauranger, bensinmackar eller evenemang där det finns en hög efterfrågan på mat.

I det här projektet undersöktes möjligheten att lösa detta problem genom att utveckla en prototyp av en induktionsgrill som kan tillaga enskilda rätter på beställning och på mycket kort tid. En sådan grill kommer då kunna servera och tillaga mat direkt på förfrågan istället för att tillagning sker i bulk. Vilket potentiellt kan bidra till att minska matsvinnet.

Ett tidigare kandidatarbetet från 2022, utfört vid avdelningen för Elkraftteknik, har skapat en god grund för utvecklingen av en sådan prototyp [3]. Detta projekt fortsatte arbetet på den framtagna prototypen och genomförde en rad åtgärder och förbättringar i syfte att konstruera en fullt fungerande prototyp.

1.1 Bakgrund

Som tidigare nämnt så bygger detta arbete vidare på utvecklingen av en prototyp på ett autonomt system som kan grilla french hot dogs med hjälp av en induktionsgrill [3]. För att beskriva funktionen hos den initiala prototypen kan det delas in i två huvudsakliga delsystem. Det autonoma systemet som styr alla rörliga komponenter och hanterar korv, bröd och dressing och systemet som styr induktionsgrillen.

Det autonoma systemet består av en baspelare med två armar som kan röra sig oberoende av varandra i en cirkulär bana. Armarna drivs av vinkelservomotorer. På den ena armen sitter en korvhiss som möjliggör förflyttning av korven mellan startpositionen, korvmagasinet och induktionsgrillen. På den andra armen sitter en brödsropa som gör det möjligt att placera och flytta brödet mellan startpositionen och såsstationerna. Otillagade korvar förvaras i korvmagasinet och önskad dressing appliceras vid de två såsstationerna.

Systemet fungerar på så sätt att användaren interagerar med gränssnittet och kan välja mellan tre olika korvsorter och två sorters dressing. När valet är gjort rör sig korvhissen från startpositionen till korvmagasinet, plockar upp den valda korven och för den sedan vidare till induktionsgrillen. Där hålls korven kvar tills önskad innetemperatur uppnåtts, varpå den flyttas tillbaka till startpositionen och placeras

i korvbrödet. Samtidigt förflyttas brödskopan till en av såsstationerna där önskad dressing appliceras. Därefter återgår brödskopan till startpositionen, där den färdiga korven placeras i brödet. En korvavtagare används för att ta bort spettet som korvhissen använder utan att korven fastnar.

Det andra delsystemet som består av induktiongrillen fungerar på så sätt att en spole i koppar är lindad kring ett stålrör. När sedan en växelström rör sig igenom spolen så genereras ett magnetfält som hettar upp stålröret. Det här fenomenet kallas induktion. För att få en önskad strömnivå och frekvens som möjliggör induktion och maximal effektutveckling i röret, används en växelriktare.

Tillsammans bildar de två delsystemen en helhet som var tänkt att kunna producera en grillad french hot dog autonomt från otillagad till serverad med dressing. Prototypen visade sig ha goda möjligheter att fungera, men kunde i slutändan inte producera en färdig hot dog. Vidareutveckling skulle behöva göras för att uppnå detta.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att fortsätta utvecklingen av en automatiserad induktionsgrill genom att göra förbättringar på en redan existerande prototyp. Arbetet är tänkt att resultera i ett fullt fungerande system som kan grilla och servera färdiga french hot dogs på kort tid.

1.3 Avgränsningar

Tillgången till verktyg och utrustning begränsades till det som var tillgängligt på Chalmers tekniska högskola. Detta på grund av budgeten, som främst användes till inköp av komponenter istället för verktyg eller andra arbetslokaler.

Arbetet genomfördes som ett fortsättningsarbete. Därav beslutades det att inte göra en helt nya design på prototypen utan enbart att fortsätta utvecklingen på den redan konstruerade prototypen.

Delsystemet med de två såsstationerna integrerades inte i den nya prototypen och det valdes att inte heller utveckla något liknande system på den förbättrade prototypen.

2 Teori

I det här kapitlet presenteras den nödvändiga teorin som krävs för att kunna konstruera en autonom induktionsgrill. Först presenteras teorin kring en induktionsvärmare, sedan teorin bakom beståndsdelarna av en sådan, för att sedan avslutas med teori kring strömmätning, automatiseringen, värmeöverföring och kylning.

2.1 Induktionsgrill

En induktionsvärmare är en typ av värmare som värmer upp material genom att använda ett snabbt alternerande magnetfält [4],[5]. Grundprincipen är att ett ledande material placeras i mitten av en spole. Genom spolen flyter en högfrekvent alternerande ström som genererar ett starkt magnetfält. Det ledande materialet, som befinner sig i mitten av magnetfältet, påverkas av magnetfältets induktiva egenskaper. Detta inducerar en ström i materialet som, på grund av dess resistivitet (ρ), genererar en markant effektutveckling i materialet. Effektutvecklingen är i form av en temperaturökning i materialet, vilket leder till uppvärmning.

Induktionsvärmning har flera fördelar jämfört med traditionell ugnsvärme [6]. Värmeutvecklingen sker snabbare i materialet under induktionsvärmning. Dessutom kan uppvärmningsprocessen starta snabbare med en induktionsvärmare, eftersom det endast krävs ström till en kopparspole för att påbörja uppvärmningen. Detta innebär också att energi kan sparas genom att stänga av induktionsvärmaren mellan användningar.

2.1.1 Induktion

Elektromagnetisk induktion är ett fenomen som beskriver hur varierande magnetiska fält ger upphov till en drivande elektromotorisk kraft (emk) i en ledare som utsätts för ett varierande magnetfält. Riktningen på den emk som uppstår följer Lenz lag och ger därför upphov till ett magnetiskt fält som motverkar induktionen [4]. Faradays induktionslag beskriver hur stor emk som induceras i en sluten krets enligt följande:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (2.1)$$

där \mathcal{E} representerar den inducerade emk:n, N är antalet varv på spolen, $\frac{d\Phi}{dt}$ är den tidsderivatan av det magnetiska flödet genom spolens yta och Φ är den magnetiska flödestätheten.

2.1.2 Spolinduktans

Spolinduktansen är en parameter som kan användas för att kvantifiera spolens förmåga att inducera en elektrisk spänning när strömmen genom den varierar. Induktansen kan beräknas med hjälp av följande formel:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi r^2}{l} K(x) \quad (2.2)$$

Där μ_0 är den magnetiska permeabiliteten i vakuum, N är antalet varv på spolen, r är radien på spolen, l är längden på spolen och $K(x)$ är Nagaoka-koefficienten

[7]. Nagaoka-koefficienten används för att justera induktansen när spolens längd är liten jämfört med dess diameter och beräknas med hjälp av förhållandet $x = \frac{2r}{l}$. För spolar där $2r \leq l$ kan Nagaoka-koefficienten uppskattas till:

$$K(x) = \frac{1 + 0.383901x + 0.017197x^2}{1 + 0.258952x} - \frac{4}{3\pi} \cdot \sqrt{x} \quad (2.3)$$

2.1.3 Skinneffekt

Skinneffekten är en effekt som beskriver tendensen till en högre koncentrationen av virvelströmmar i ytan av ett arbetsstycke [8]. På grund av den cirkulära banan av virvelströmmar som induceras i en massiv cylinder finns det inget strömflöde vid dess center. Skinneffekten gör att cirka 86% av kraften koncentreras i ytlagret av ledaren, denna fördelning kallas även för referens- eller strömpenetrationsdjup δ [9]. Graden av skinneffekten beror på frekvensen, ledarens materialegenskaper så som elektrisk resistivitet ρ , relativ magnetisk permeabilitet μ_r och geometrin hos arbetsstycket. Skinneffekten uppstår när hög frekvens appliceras eller när radien på arbetsstycket är relativt stor jämfört med δ . Fördelningen av strömtätheten längs arbetsstyckets tjocklek (under antagande om homogena elektromagnetiska egenskaper) kan grovt beräknas med ekvationen:

$$I = I_0 e^{-y/\delta}$$

där I är strömmen vid avstånd y från ytan (A/m^2), I_0 är strömmen vid ytan på arbetsstycket (A/m^2), y är avståndet från ytan till centrum (m), och δ är penetrationsdjup (m) [9]. Penetrationsdjup kan beskrivas i meter som:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.4)$$

där ρ är elektrisk resistivitet, μ_r är relativ permeabilitet och f är frekvensen.

2.2 Beståndsdelar

En induktionsvärmare är uppbyggd av flera beståndsdelar. De två huvudsakliga beståndsdelarna är en växelriktare och en LC-tank. Nedan beskrivs teori för att bygga upp dessa beståndsdelar och skapa en effektiv induktionsvärmare.

2.2.1 Transistorer

I allmänhet är transistorer halvledarkomponenter som har ett flertal användningsområden inom kretskonstruktion [10]. De huvudsakliga funktionsområdena är förstärkning, styrning och kontroll av elektriska signaler i kretsar. Till en transistor finns oftast tre delar, en *gate*, en *source* och en *drain*. Strömmen genom en transistor flyter mellan *drain* och *source*, och strömstyrkan regleras av spänningen vid *gaten*. Detta gör att strömmen genom en transistor kan styras externt, vilket ger den en mångfald av tillämpningsområden. De två vanligaste transistorerna är bipolära transistorer (BJT) och fälteffektstransistorer (FET).

För en växelriktare används fyra *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*er (MOSFETs). MOSFETs är en typ av fälteffekttransistor [11]. En MOSFET har två arbetsområden; resistansområdet och strömmättnadsområdet. I resistansområdet fungerar transistorn som en spänningsstyrd resistor, medan den i strömmättnadsområdet fungerar som en strömkälla. Strömmen genom transistorn i resistansområdet kan beskrivas enligt följande ekvation:

$$I_d = K[2V_d(V_g - V_T) - V_d^2] \quad (2.5)$$

där I_d är drainströmmen, V_d är drainspänningen, V_g gatespänningen, V_T transistorns tröskelspänning och K är en transistorspecifik konstant i enheten $[A/V^2]$. I strömmättnadsområdet gäller följande ekvation:

$$I_d = K(V_g - V_T)^2 \quad (2.6)$$

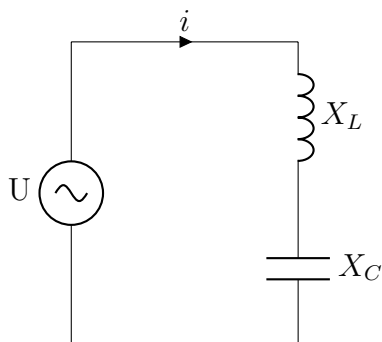
Utöver V_T och K har MOSFETs också en inre resistans mellan *drain* och *source* (R_{ds}), vilket gör att den utvecklade effekten i transistorn kan beräknas enligt följande ekvation:

$$P_{MOSFET} = R_{ds} \cdot I_d^2 \quad (2.7)$$

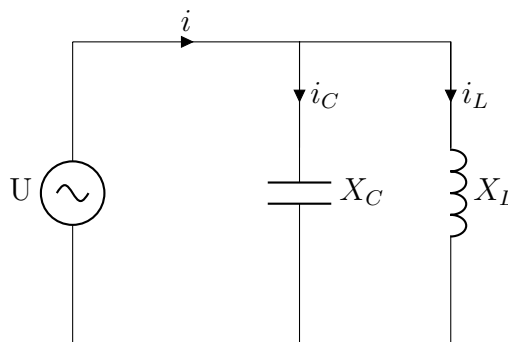
En stor fördel med MOSFET är att de inte påverkas lika mycket av temperaturförändringar jämfört med en BJT. Dessutom är MOSFETs mer responsiva, vilket gör dem lämpliga för snabba spänningsförändringar [11].

2.2.2 LC-tank

Resonans förekommer för induktiva och kapacitiva komponenter i en växelströmkrets. Denna kombination av komponenter kallas för en LC-tank [12]. De två fallen av resonanskretsar visas i figur 2.1 och 2.2. Denna typ av krets kan utnyttjas för att leverera maximal effekt till en last med hjälp av en resonansfrekvens som uppstår i kretsen. Vid den frekvensen kommer bara aktiv effekt överföras till lasten, detta då de reaktiva komponenterna tar ut varandra.



Figur 2.1: Seriekopplad LC-tank.



Figur 2.2: Parallellkopplad LC-tank.

Den induktiva och kapacitiva reaktansen, X_L respektive X_C , i de två fallen ovan ges av ekvationerna:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.8)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.9)$$

där f är frekvensen, L är induktansen och C kapacitansen. Resonansfrekvensen uppstår när båda impedanserna är lika med varandra. Denna frekvens visas i ekvationen nedan:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.10)$$

där f_0 är resonansfrekvensen och ω_0 är resonansvinkelfrekvensen.

2.2.2.1 Seriekopplad LC-tank

I en seriekopplad LC-tank är strömmen genom både kapacitansen och induktansen samma som strömmen som produceras i hela kretsen.

$$i = i_L = i_C \quad (2.11)$$

Den totala spänningen i kretsen är summan av spänningen över kapacitansen och spänningen över induktansen.

$$V = V_L + V_C \quad (2.12)$$

Den totala impedansen för en seriekopplad resonanskrets är summan av båda impedanserna och kan uttryckas enligt härledningen nedan.

$$\begin{aligned} Z &= Z_L + Z_C \\ &= j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \\ &= \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C} \quad \left(\text{Substituera } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right) \\ &= jL \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega} \right) \end{aligned}$$

Vid resonans är $\omega = \omega_0$ och därmed kommer den totala impedansen att vara noll. Det betyder att vid en seriekopplad LC-tank kommer impedansen att vara minimal och strömmen maximal vid resonansfrekvensen.

2.2.2.2 Parallellkopplad LC-tank

I en parallellkopplad LC-tank är strömmen i kretsen summan av strömmen genom kapacitansen och strömmen genom induktansen.

$$i = i_L + i_C \quad (2.13)$$

Den totala spänningen i kretsen är lika med spänningen över kapacitansen och spänningen över induktansen.

$$V = V_L = V_C \quad (2.14)$$

Den totala impedansen för en parallellkopplad resonanskrets kan uttryckas enligt härledningen nedan.

$$\begin{aligned}
Z &= \left(\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C} \right)^{-1} \\
&= \frac{Z_C Z_L}{Z_C + Z_L} \\
&= \frac{\frac{1}{j\omega C} j\omega L}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L} \\
&= \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad \left(\text{Substituera } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right) \\
&= \frac{j}{C} \left(\frac{\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right)
\end{aligned}$$

Vid resonans är $\omega = \omega_0$ och därmed kommer den totala impedansen nu gå mot oändligheten. Det betyder att vid en parallellkopplad LC-tank kommer nu impedansen att vara oändlig och strömmen vara minimal vid resonansfrekvensen.

2.2.2.3 Kvalitetsfaktor

Kvalitetsfaktorn, eller Q-faktorn, är en parameter som karakteriserar prestandan för en resonanskrets, i detta fall en LC-tank [13]. Q-faktorn definieras som förhållandet mellan upplagrade energi och den energi som dissiperas per cykel, och för en seriekopplad LC-tank representeras den av ekvationen:

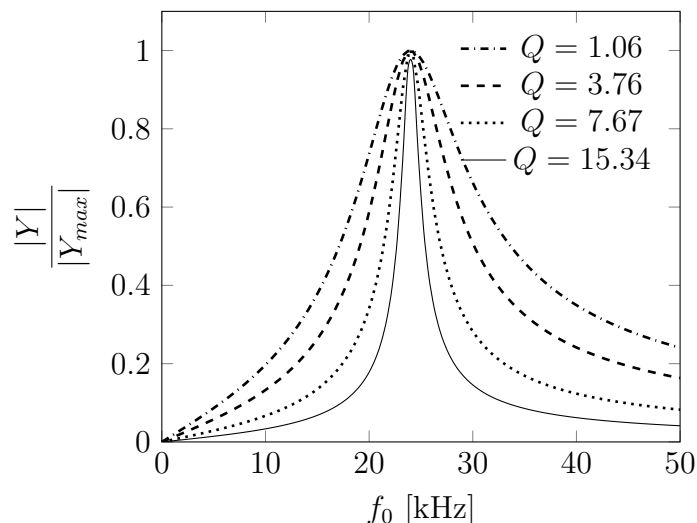
$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R}, \quad (2.15)$$

där Q är kvalitetsfaktorn och R är serieresistansen i kretsen. Serieresistansen beror på de ekvivalenta serieresistanserna för kapacitanserna och induktanserna i kretsen. I fallet med endast induktanser och kapacitanser i LC-tanken är induktansens ekvivalenta resistans dominerade då kapacitanserna som används har en försumbar dissipationsfaktor, som relaterat till ekvivalent resistans [14].

Q-faktorn är en parameter i resonanskretsar som påverkar selektiviteten, bandbredden och effektiviteten hos kretsen. Selektivitet syftar på förmågan hos kretsen att filtrera ut oönskade frekvenser och passera endast den önskade frekvensen. En hög Q-faktor indikerar en smalare bandbredd, vilket innebär att kretsen är mer selektiv. Bandbredden är det frekvensområde som kretsen kan passera utan signifikant dämpning. En låg Q-faktor resulterar i en bredare bandbredd, vilket innebär att kretsen är mindre selektiv. Effektivitet syftar på kretsens förmåga att överföra energi utan signifikant förlust. En hög Q-faktor indikerar en mer effektiv krets eftersom mindre energi går förlorad på grund av induktansens interna motstånd, se figur 2.3 för Q-faktorns inverkan.

Spänningen över spolen vid resonansfrekvensen för en seriekopplad LC-tank kan härledas genom spänningsdelning till följande ekvation, som visar att spänningen över spolen beror på Q-faktorn och matningsspänning [13]:

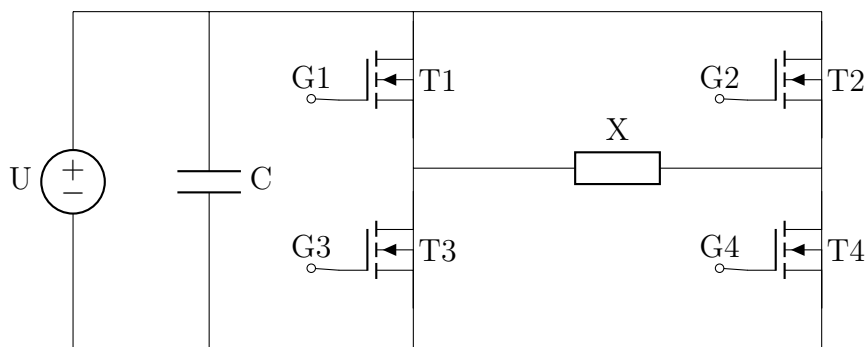
$$|U_L| = Q * |E|. \quad (2.16)$$



Figur 2.3: Normerad Admittans med $L=20 \mu\text{H}$, $C=2.2 \mu\text{F}$ för olika Q -värden. $|Y_{max}|$ är admittans vid resonans och endast beroende av serieresistansen.

2.2.3 Växelriktare

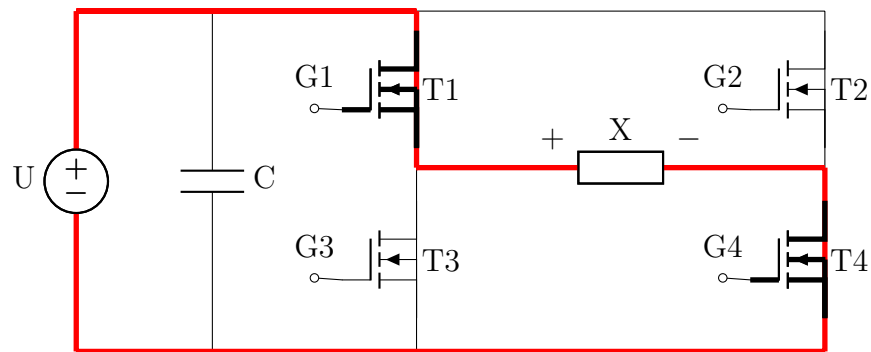
En växelriktare används för att omvandla likspänning till växelspanning. Detta sker genom transistorer som slås på och av i ett godtyckligt intervall. Det medför att en växelspanning med godtycklig frekvens kan erhållas. De vanligaste modellerna för en växelriktare är halvbryggan och helbryggan [15]. I figur 2.4 nedan så presenteras en helbrygga.



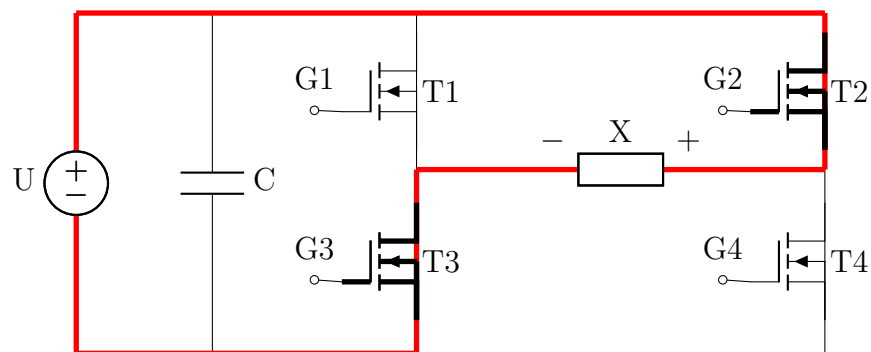
Figur 2.4: Kretsschema för en helbrygga bestående av fyra fälteffektstransistorer (MOSFET, T1-T4), en spänningskälla U och den last som ska styras.

I figur 2.4 är X lasten som ska drivas av en växelspanning. För att generera denna växelspanning så vill man växla polariteten över lasten genom att transistorerna T1-T4 slås på parvis. När T1 och T4 slås på kommer en positiv spänning lägga sig över lasten enligt figur 2.5 nedan. När T1 och T4 slås av och T2 och T3 slås på så kommer istället en negativ spänning att lägga sig över lasten enligt figur 2.6. Detta medför att spänningen över lasten X blir en fyrkantspuls med en positiv och en negativ spänningsnivå. Frekvensen på pulsen bestäms av styrsignalerna som skickas till *gate* G1-G4 på transistorerna. Kapacitansen C som sitter parallellt med spänningskällan

är till för att minska strömriplet som uppstår när transistorerna slås på och av [16].

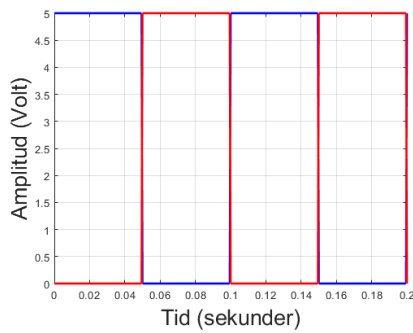


Figur 2.5: Helbryggan då transistorerna T1 och T4 leder.

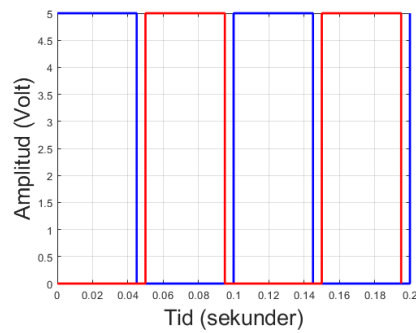


Figur 2.6: Helbryggan då transistorerna T2 och T3 leder.

För att få en optimal signal till lasten så strävar man efter en kontinuerlig utsignal från växelriktaren. Detta kan uppnås om styrsignalen till båda transistorparen har en arbetscykel på 50 % men där ena signalen är inverterad. Se figur 2.7 nedan. Denna arbetscykeln fungerar bara i teorin då man antar att transistorerna är ideala. I praktiken så har transistorerna en omkopplingstid som måste analyseras för att inte kortsluta helbryggan. Omkopplingstiden vill man ha så låg som möjligt för att inte förlora prestanda och minska effekten ut på lasten. En lösning på detta är att lägga in en dödtid som sträcker sig lite över omkopplingstiden på transistorerna. Detta kommer att minska arbetscykeln minimalt och förhindra att helbryggan kortsluts. En arbetscykel med dödtid visas i figur 2.8 nedan.



Figur 2.7: Två fyrkantssignaler med respektive arbetscykel på 50 % och ingen dödtid.

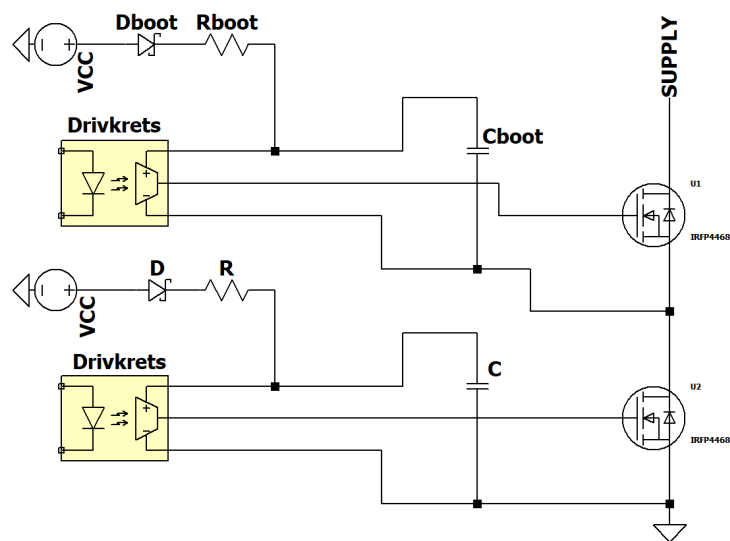


Figur 2.8: Två fyrkantssignaler med respektive arbetscykel på 45 % och en dödtid på 10 %.

2.2.4 Drivkrets och bootstrapping

Drivkretsar används för att effektivt och kontrollerat styra en eller flera transistorer. De fungerar som förstärkare som höjer spänning och strömstyrka för att mer effektivt aktivera eller avaktivera transistorer [17]. Vid applikationer med stora laster är det inte möjligt att använda en mikrocontroller för att styra grinden på grund av låga strömstyrkor. Därför används drivkretsar för att leverera tillräckligt med ström till komponenten.

Drivkretsar är särskilt viktiga i växelriktare, där snabb laddning av grindkapacitansen på transistorerna krävs för att växla polaritet. Dessa drivkretsar levererar den höga strömstyrka som krävs för att ladda upp dem på kort tid och möjliggör en snabb polaritetsväxling. I en växelriktare används vanligtvis två eller fyra drivkretsar för att styra transistorerna i en halvbrygga. Figur 2.9 nedan visar en halvbrygga som använder en drivkrets per transistor.



Figur 2.9: Drivkrets och bootstrapping för att styra transistorerna i de två halvbruggorna som bygger upp växelriktaren.

För att växelriktaren ska fungera korrekt med drivkretsarna behöver kretsen kompletteras med komponenter för att kunna styra den övre transistorn. En bootstrapkapacitans tillsammans med en diod och resistans måste därför implementeras till drivkretsen för att kunna styra den övre transistorn [18]. Den nedre transistorn kräver bara en grindsignal som är över tröskelspänningen för att aktiveras då source är kopplad till jord.

Detta är en väsentlig komplettering då den övre transistorns source är kopplad till lasten och kräver en högre spänning på grindsignalen för att aktiveras. Bootstrapkapacitansen tillsammans med dioden och resistansen löser problemet genom att kapacitansen laddas upp till spänningen VCC när den nedre transistorn är påslagen. När den nedre transistorn sedan stängs av så hindrar dioden strömmen att flyta tillbaka till VCC. Bootstrapkapacitansen laddas nu ur genom att den övre transistorn aktiveras och får då en tillräckligt hög grindsignal.

2.2.5 Galvanisk isolation

För att skydda känsliga delar av en krets och undvika potentiella skador kan galvanisk isolation användas [19]. Galvanisk isolation ger en väg där strömsignaler kan överföras i en krets utan att det finns någon fysisk kontakt mellan olika delar av kretsen. Detta ger ett envägsskydd mot kortslutning och för höga strömmar i delar av kretsen där det kan vara skadligt. En vanlig metod för galvanisk isolation är användning av en optokopplare.

Inom elektriska kretsar är en optokopplare, även känd som optisk isolator, en komponent som använder en kort sträcka av ljus för att överföra en signal mellan två elektriska komponenter. Genom att använda ljus som medium blir de elektriska komponenterna fullständigt elektriskt isolerade från varandra. Signalen överförs från en elektrisk komponent till en optisk komponent och sedan tillbaka till en annan elektrisk komponent. Optokopplaren är särskilt användbar eftersom den fungerar för likström och kan skydda kretsen mot överspänning [20].

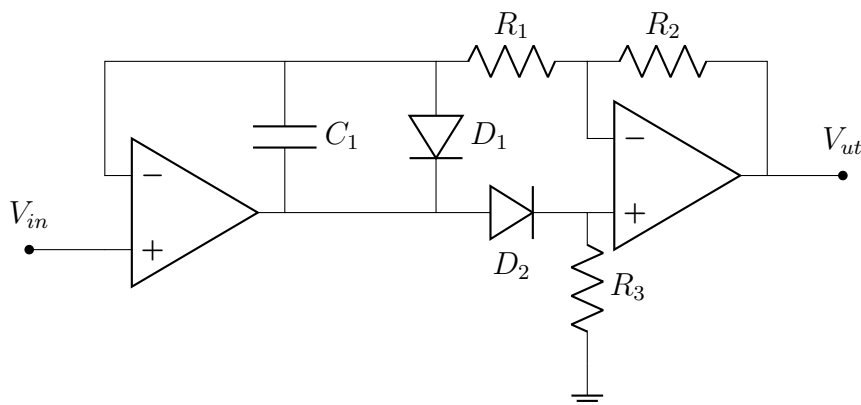
2.2.6 Mica

För att förhindra att LC-tankens spole kommer i kontakt med metallröret, behövs ett elektriskt isolerande material kring röret. Mica är en mineral bestående av silikat av aluminium tillsammans med andra metaller [21]. Materialet är både elektriskt och termiskt isolerande, och kan tåla mycket höga temperaturer. I fallet av mica, tål materialet över 500 °C och har då en elektrisk resistivitet på över $10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$. Med en tjocklek på 0.2 mm ger det en resistans på $\sim 20 \text{ G}\Omega$ [22].

2.3 Precisionslikriktare

För att kunna omvandla en växelspänning till en likspänning med hög precision och låg förvrängning kan man använda sig av en så kallad precisionslikriktare [23]. En precisionslikriktare är en krets som implementeras med hjälp av operationsförstärkare (op-amp), dioder, resistanser och kapacitanser.

Idén bakom en precisionslikriktare är att använda en återkopplad op-amp för att eliminera spänningsfallet som uppstår över dioderna vid likriktning. Till skillnad från en vanlig diodlikriktare där spänningsfallet över dioderna kan orsaka problem, kan precisionslikriktaren använda mycket små signaler utan att skapa förvrängningar. En precisionslikriktare visas i figur 2.10.



Figur 2.10: Kretsschema över precisionslikriktaren.

Precisionslikriktaren kan användas för både positiva och negativa ingångssignaler. När ingångssignalen är positiv blir D_2 ledande och diod D_1 kan anses vara en öppen krets. Utsignalen blir då lika med ingångssignalen och kan uttryckas som:

$$V_{ut} = V_{in} \quad (2.17)$$

När ingångssignalen istället är negativ blir diod D_1 ledande och diod D_2 kan nu anses vara en öppen krets. Utsignalen blir i detta fall

$$V_{ut} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{in} \quad (2.18)$$

2.4 Autonomt system

Det automatiserade systemet består av två stycken robotarmar som rör sig självständigt från varandra i en cirkulär rörelse kring ett fastmonterat torn. Separata korvmagasin och sässtationer är också integrerat i systemet.

2.4.1 Mikrokontroller

En mikrokontroller är en integrerad krets som innehåller en mikroprocessor, vilket är hjärnan i systemet [24]. Mikroprocessorn kan utföra logiska beräkningar och hantera olika signaler från systemet. Genom att programmera mikrokontrollern kan den anpassas för att utföra specifika funktioner, såsom pulsbreddsmodulation (PWM) eller hantera olika sensorer och styrningar. Utöver en mikroprocessor innehåller mikrokontrollern även en mängd minne, som kan användas för att lagra program och data från användaren. Detta gör mikrokontrollern till en kraftfull och flexibel komponent som används inom en mängd olika tekniska tillämpningar.

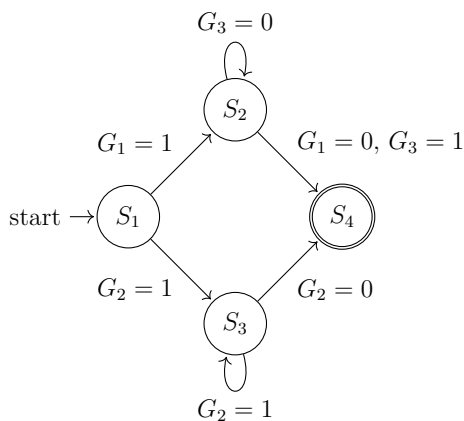
2.4.2 Drivmotorer

Elektriska servomotorer är små och enklare motorer som används i tillämpningar där det krävs jämn rotationshastighet eller hög precision vid positionering [25]. Dessa motorer regleras vanligtvis med hjälp av pulsbreddsmodulering (PWM). Pulsbreddsmodulering innebär att elektriska signaler med varierande pulsbredd skickas till servomotorerna. Genom att ändra pulsbredden kan olika vridmoment genereras i motorn, vilket resulterar i önskad hastighet eller olika vinklar vid positionering [25]. Servomotorer som roterar till en specifik vinkel brukar vanligtvis kallas för vinkelservon, medan servomotorer som kan rotera kontinuerligt med en given hastighet benämns som kontinuerliga servon.

2.4.3 Styrning och autonoma sekvenser

Autonom förflyttning av en robot kan genomföras genom en sekvensplanerare baserad på ett ramverk för intelligent automation [26]. Förflyttningen av roboten beskrivs genom en graf där noderna representerar *states* (tillstånd) som roboten kan befinna sig i, och kanterna representerar *transitions* (övergångar). Ett tillstånd kan innebära att roboten står stilla eller att en motor snurrar med konstant hastighet.

En övergång består av två delar. För det första finns det ett kriterium (guard) som innehåller ett villkor som måste vara uppfyllt för att roboten ska kunna utföra övergången mellan två tillstånd. Det kan till exempel vara att en knapp är nedtryckt eller att en sensor har ett visst värde. För det andra innehåller övergången en eller flera verkningar (actions) som representerar de handlingar som roboten ska utföra när den genomför övergången.



Figur 2.11: Exempel på state space med 4 states och 3 guards.

Om man tänker sig en robot som ska förflytta sig autonomt enligt figur 2.11, där varje tillstånd representerar en specifik konfiguration eller rörelse för roboten. För att roboten ska kunna genomföra övergångar mellan olika tillstånd krävs att vissa villkor (guards) är uppfyllda, såsom att en knapp är nedtryckt eller att en drivmotor är stillastående. Beroende på vilket tillstånd roboten befinner sig i och vilka villkor som är uppfyllda kommer roboten att genomföra olika sekvenser.

En fördel med att använda ett system baserat på en graf med tillstånd och övergångar är att det ger en tydlig översikt över alla tillåtna sekvenser. Dessutom underlättar det felsökning eftersom det blir enkelt att spåra vilka övergångar roboten utförde under en sekvens. En annan fördel är att ett grafbaserat kontrollsystem kräver relativt lite kod för att implementera det. Det behövs endast ett fåtal modulära villkor och övergångar som är specifika för roboten. Dessa används sedan för att bygga upp grafen. Även om grafen kan bli komplex så består den enbart av många enkla byggstenar.

2.5 Värmeöverföring

Det finns huvudsakligen tre olika processer för värmeöverföring. De är konvektion, konduktion och strålning. Ibland talar man även om advektion som är en kombination av konduktion och konvektion. Att advektion benäms med ett eget ord är på grund av att konduktion och konvektion sällan sker som en enskild process utan ofta är starkt förknippade med varandra. I fallet med induktionsgrillen så kommer dock den huvudsakliga värmeöverföringen ske via konduktion och strålning. Det kommer finnas en viss påverkan av konvektion men den är försumbar i jämförelse med värmen som överförs via strålning och konduktion.

Konduktion sker genom att värme rör sig från ett varmare material till ett kallare material genom fysisk kontakt. Detta beror på att när en molekyl med högre energinivå kommer i kontakt med en molekyl med lägre energinivå så kommer den överföra energi till molekylen med lägre energinivå då molekyler och atomer alltid strävar efter jämvikt. Man kan även tala om att energiöverföringen sker genom gittervågor när man talar om konduktion i fasta material. Gittervågor är vibrationer som skapas på grund av rörelse i atomer. Matematiskt kan konduktion beskrivas med hjälp av fouriers lag enligt

$$q = -k \cdot \frac{\Delta T}{L} A \quad [\text{W}] \quad (2.19)$$

Sambandet gäller för endimensionell konduktion och k är en specifik värmeledningskonstant som är beroende på materialtyp. Värdet på k avgör hur effektivt ett material leder värme. q är den totala energin per tidsenhet (W) och kvoten A/L är den area och tjocklek som värmeöverföringen sker emellan.

I fallet med ett induktionsrör så har röret i sig en cylindrisk form men även korven som värms upp kan antas vara anta en cylindrisk form. Därmed så kommer följande variant av fouriers lag, som tar hänsyn till den cylindriska formen, appliceras följande formel:

$$q = -\frac{2\pi L k \Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [\text{W}] \quad (2.20)$$

där r_1 , r_2 är inner- respektive ytterradien, och ΔT är skillnaden i temperatur [27]. En kropp utstrålar alltid en viss mängd energi tack vare elektronsvängningar i massan som uppstår på grund av elektromagnetiska krafter. Till skillnad från de andra värmeöverföringsprocesserna så kan strålning ske utan fysisk kontakt mellan olika kroppar. Energin i strålningen transporteras med ljuset hastighet och är mer lågfrekvent än det synliga ljuset, vilket innebär att våglängden är högre[28].

Strålning är den enda värmeöverföringsprocessen som inte kräver någon fysisk kontakt mellan molekyler då överföringen sker via elektromagnetisk och infraröd strålning. Den energin som strålas ut är starkt beroende på kroppens absolut temperatur men även till stor del av ytmateriallets egenskaper [28]. När man talar om strålning brukar man tala om *emission* (ϵ), *absorption* (α), och *transmission* (τ) samt *reflektion* (ρ). Vilket är mått på hur mycket strålning som emitteras, absorberas, transmittas och reflekteras. Emission syftar till den strålning som en kropp ger upphov till och strålar ut, den *emitteras*. När väl strålningen träffar en yta eller ett materia så kommer strålningen fördelas på lite olika sätt. En del av strålningen kommer studsas bort från yta av materialet, *reflekteras*, en del av den kommer tas upp av materialet, *absorberas* och en annan del kommer röra sig igenom materialet, *transmittas* [27].

Den emitterade strålningen från en yta på en kropp är kopplat till den termiska energin som är bunden på ytan. Där takten som energi släpps ut per areaenhet (W/m^2) benämns som den emitterade energin från en yta (E), vilket också benämns som emissivitet. Den maximala mängden emitterad energi från en yta kan beskrivas med Stefann-Boltzmanns lag.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.21)$$

där T_s är yttemperaturen i Kelvin och σ är Stefann-Boltzmanns konstant med värdet $5.67 * 10^{-8}$. Lagen gäller dock bara med antagandet om att kroppen emitterar maximal mängd energi. Den här typen av kroppar benämns som svartkroppar och är ett idealt tillstånd. Svartkroppar har en emitteringsfaktor, ϵ , på 1. Icke ideala objekt där emissionsfaktorn ligger mellan noll och ett kallas gråkroppar. Värdet på ϵ varierar med hänsyn till kroppens material och ytfinhet. När man tar hänsyn till emissionsfaktorn skrivs Stefann-Boltzmann lag enligt.

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.22)$$

Om det initialt antas att korven ses som en svartkropp som omsluts av en annan svartkropp kan man beskriva den överförda strålningsenergin enligt följande ekvation:

$$q = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.23)$$

För att ta hänsyn till hur strålningen påverkas av olika kroppars geometrier och placeringar till varandra så tar används den så kallade synfaktorn vid beräkningar [28]. Man kan generellt säga att synfaktorn beskriver hur mycket av strålningen från objekt i som fångas upp av objekt j med hänseende till olika geometrier och objektens placeringar i relation till varandra.

Om man tänker sig korven som en oändligt lång cylinder som omsluts av en annan oändligt lång cylinder i form av induktionsröret så innebär det att all den emitterade strålningen från korven kommer att nå rörets insida men inget av den emitterad strålningen kommer att nå korven igen. Detta innebär att synfaktorerna mellan induktionsrör och korv kommer att bli enligt följande [27]:

$$F_{12} = 1 \quad (2.24)$$

$$F_{11} = 0 \quad (2.25)$$

Att synfaktorerna blir enligt ovan kan även understrykas med den så kallade *summation rule* som säger att:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (\text{summation rule}) \quad (2.26)$$

I fallet med strålningen som emitteras från röret till korven blir synfaktorn något annorlunda då en del av den strålningen även kommer att nå röret i sig. För att applicera detta behöver vi använda oss av den så kallade *Reciprocity rule* [27]

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (\text{reciprocity rule}) \quad (2.27)$$

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.28)$$

$$F_{22} = 1 - \frac{A_1}{A_2} \quad (2.29)$$

Genom att ta hänsyn till synfaktorn kan nu en tydligare bild över hur mycket strålningens energi som träffar korven presenteras genom att kombinera ekvation 2.23 med ekvation 2.28 och få följande ekvation:

$$q = F_{21} \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.30)$$

Det finns flera faktorer som påverkar hur väl en korv kan leda värme, såsom dess vätskehalt, procenthalt, proteininnehåll, fetthalt och typ av kött [27]. Varje ingrediens i korven har sin egen unika värmeledningsförmåga. Med detta i åtanke kan en

uppskattning av korens termiska värmeledningsfaktor görs med hjälp av formeln $k = W/(m \cdot K)$, där W representerar effekten, m står för korens längd och K är temperaturen i kelvin [27]. För att få fram en mer exakta värden krävs dock mer detaljerade beräkningar.

2.6 Kylning

Komponenter utsätts ofta för höga effekter som kan leda till hög temperaturutveckling beroende på komponentens inre resistans. När komponenter utsätts för högre temperaturer så försämras egenskaperna hos komponenterna till den gräns då de inte är användbara längre [29]. För att förhindra dessa temperaturer så krävs någon form av kylning av komponenterna. Kylning kan ske på många olika sätt och delas oftast in i två olika system: passiv kylning och aktiv kylning [30]. Passiv kylning innebär att man använder sig av en kylfläns eller värmespridare för att kyla komponenterna, genom att fördela värmen över en större yta. Aktiv kylning använder istället en process som förbrukar energi i form av fläktar eller vätskekylning för att kyla komponenter.

För att säkerställa optimal funktion hos system med hög effekt är det nödvändigt att kyla komponenter som exempelvis transistorer. När transistorer utsätts för höga temperaturer så försämras deras egenskaper och kan skapa problem i systemet [31]. Temperaturen inuti en transistor kallas för kristalltemperaturen och kan beräknas på två sätt. Den första beräkningen tar hänsyn till den omgivande rumstemperaturen och kan uttryckas enligt följande ekvation:

$$T_j = T_a + R_{th(JA)} \cdot P \quad (2.31)$$

där T_j är kristalltemperaturen, T_a är rumstemperaturen, $R_{th(JA)}$ är den termiska resistansen mellan kristallen och omgivningen och P är den effekt som förbrukas av transistorn som ges av ekvation 2.7 [32]. Det andra sättet är att beräkna kristalltemperaturen med hjälp av temperaturen på transistorhöljet:

$$T_j = T_c + R_{th(JC)} \cdot P \quad (2.32)$$

där T_c är höljets temperatur [32].

Parametervärden för beräkning av kristalltemperaturen och effektförluster hittar man oftast i databladet för transistormodellen. Ett exempel på detta är transistorn *IRFP4468PBF* [33]. Denna transistor har en kristalltemperatur som sträcker sig från -55°C till 175°C . Transistorn har en maximal termisk resistans från kristall till omgivning $R_{th(JA)} = 40^\circ\text{C/W}$ vid en rumstemperatur på $T_a = 25^\circ\text{C}$. Denna modell har också en maximal termisk resistans från kristall till höljet som är $R_{th(JC)} = 0.29^\circ\text{C/W}$.

Utifrån dessa parametervärden kan effektförluster beräknas från ekvation 2.31 och 2.32 ovan. Dessa effektförluster är ett mått på hur mycket effekt man kan utsätta transistorn för innan den blir oanvändbar. Effektförlusterna ger också en indikering på vilken kylning som krävs för att transistorn ska arbeta optimalt.

3 Metod

I detta kapitel presenteras den arbetsmetodik som har använts för att omvandla den ursprungliga problemställningen till ett slutgiltigt koncept. Målet med arbetet var att vidareutveckla föregående års prototyp av en automatiserad induktionsgrill [3]. För att uppnå detta genomfördes en ingående funktionsundersökning och felsökning av det tidigare årets prototyp. Detta gjordes genom att plocka isär den tidigare prototypen och kontrollera funktionen för delsystem och enskilda komponenter var för sig. Samtidigt studerades föregående års rapport och dess slutsatser och resultat för att skapa en helhetsbild över de huvudsakliga förbättringsområdena.

Efter att ha identifierat de viktigaste felområdena så beslutades det att dela in arbetet i två huvudsakliga områden som kunde utvecklas separat: induktionsgrillen och det automatiska systemet. Detta var nödvändigt eftersom arbetet inom dessa två områden skiljer sig åt på många sätt. Arbetet med det automatiska systemet bygger till stor del på design och kravspecifikation från tidigare år [3], medan arbetet med induktionsgrillen i stor utsträckning behövde påbörjas på nytt.

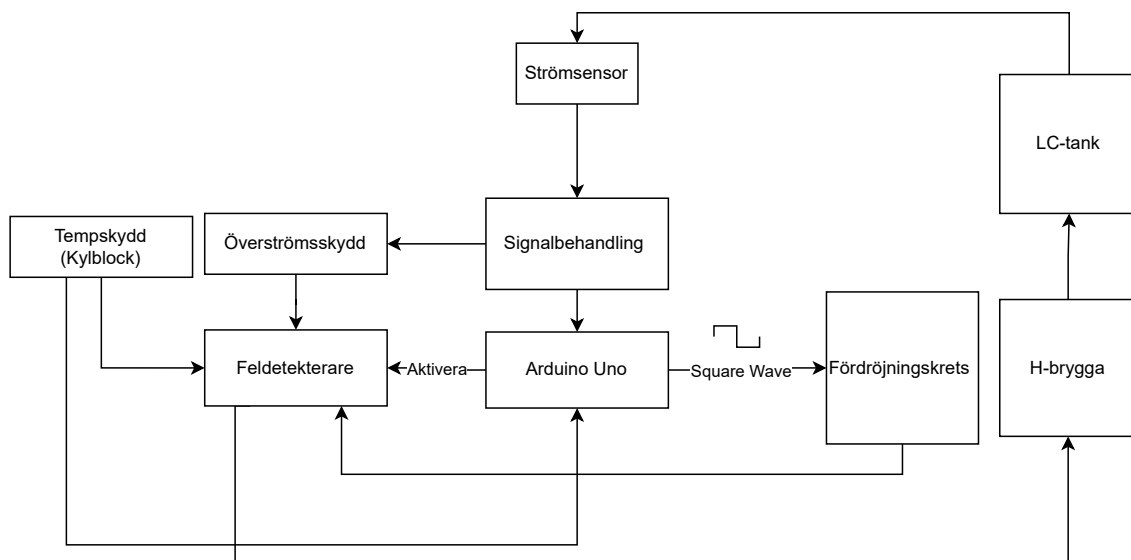
3.1 Induktionsgrillen

Baserat på det föregående projektet genomfördes en omfattande omkonstruktion av elektroniken kring induktionsgrillen. Detta var nödvändigt eftersom många vitala delar från det tidigare arbetet hade demonterats och kasserats. De fanns också problemområden inom det tidigare arbetet som gjorde att induktionsgrillen inte fungerade korrekt. För att lösa problemet gick arbetet tillväga enligt följande:

- Litteraturstudie av förra årets rapport samt allmän litteratur för uppbyggnad av en induktionsgrill
- Design av krets för datorsimulering
- Design av krets för induktionsgrillen

3.1.1 Designprocess

För att få en fungerande induktionsgrill så krävdes samverkan mellan flera delar i kretsen. Därför inleddes projektet med en noggrann litteraturstudie, där tidigare arbeten inom området granskades. Fokus låg särskilt på att förstå hur en induktionsvärmare fungerar och vilka komponenter som krävs för att skapa en effektiv och säker krets. Resultatet av litteraturstudien sammanfattades i ett processflöde, som illustrerar de olika stegen som behövdes för att konstruera induktionsvärmaren. Processflödet utgjorde grunden för designen av de olika kretsarna som krävdes för att bygga upp systemet, se figur 3.1.



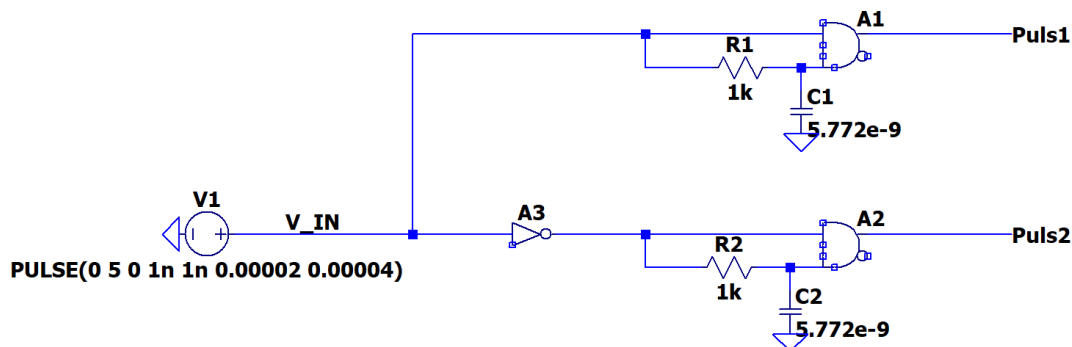
Figur 3.1: Processflöde av systemet.

3.1.2 Simuleringsmodeller i LTspice

Innan den faktiska konstruktionen påbörjades, simulerades kretsarna i programvaran LTspice för att undersöka deras funktionalitet. På så sätt kunde eventuella problem och risker upptäckas och åtgärdas tidigt i processen. Nedan presenteras de huvudsakliga processblocken som bygger upp induktionskretsen. Simuleringsresultat från dessa delar presenteras i bilaga A.

3.1.2.1 Fördröjningskrets

En fördröjningskrets konstruerades för att kunna styra transistorerna i par utan att kortsluta dem. Kretsen visas i figur 3.2 nedan.



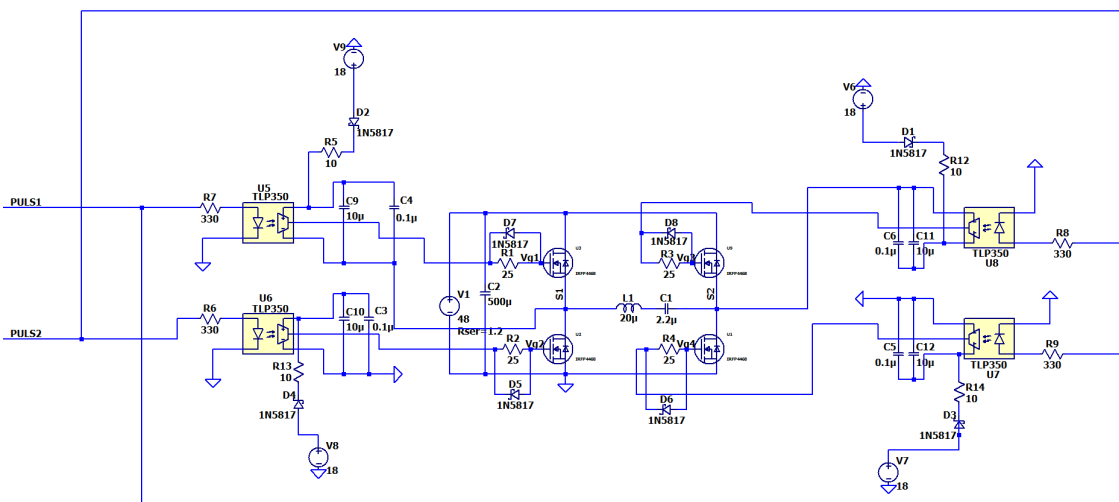
Figur 3.2: Kretsschema på en fördröjningskrets bestående av digitala komponenter, RC-filter och en PWM puls.

Kretsen är uppbyggd av två logiska AND grindar (A1, A2), en inverterare (A3) och

två RC-filter. En genererande fyrkantspuls kommer in från en Arduino, och går till den första AND grinden A1 medan den andra pulsen blir inverterad och går till grinden A2. Pulserna får en fördröjningstid av RC filtret, i detta fall en fördröjning på $4 \mu\text{s}$ mellan puls 1 och puls 2.

3.1.2.2 Växelriktare

Kretsen som designades för växelriktaren visas i figur 3.3 nedan. Den är uppbyggd av en helbrygga med fyra separata MOSFET drivkretsar där varje drivkrets har en inbyggd optokopplare för att isolera kretsen från omgivningen. Pulserna från



Figur 3.3: Kretsschema på en växelriktare bestående av drivkretsar med inbyggda optokopplare.

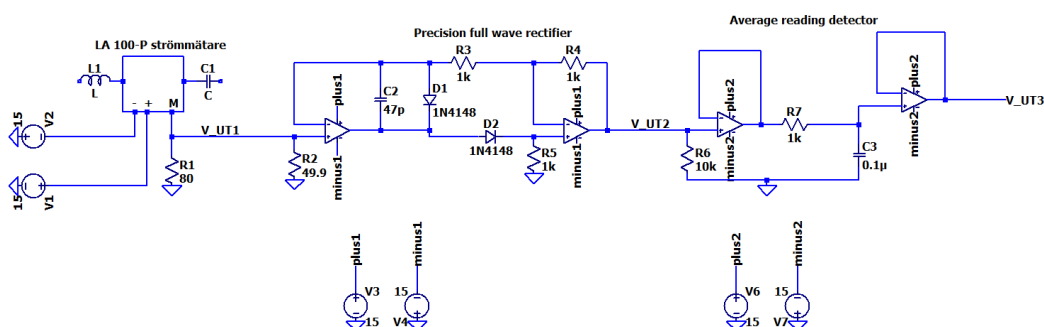
fördröjningskretsen blir insignaler till drivkretsarna enligt figuren ovan. Insignalerna har delats upp så att U5 och U7 samt U6 och U8 kommer vara på samtidigt. Detta gör så att helbryggan kan omvandla likspänningen till växelspanning och förhindra kortslutning av kretsen. Spänningen ut från drivkretsarna förstärks till VCC (18 V i figuren ovan) för att kunna driva transistorerna på en optimal spänningsnivå och släppa igenom så mycket ström som möjligt. Resistanserna in till drivkretsarna är satta så att lysdioden inte ska gå sönder och förstöra drivkretsarna.

Bootstrap-kapacitanserna valdes till $0.1 \mu\text{F}$ parallellt med $10 \mu\text{F}$ för att snabbt kunna ladda upp kapacitansen och stabilisera spänningen. Dioderna i kretsen är snabba schottky dioder som har lågt spänningsfall i framriktningen och snabb återställningsförmåga. Detta är viktigt för att minimera mängden laddning som matas tillbaka från bootstrap-kapacitanserna till VCC. Det valdes också att sätta resistanser till transistorernas gate för att minska störningar och oscillation. Bootstrap-resistanserna är till för att minska strömtopporna vid växlingen mellan transistorerna.

3.1.2.3 Strömmätning och signalbehandling

För att uppnå en önskad växelström som genereras i resonanskretsen så behövdes det en strömsensor för att kunna mäta strömmen på primärsidan. Detta implementerades genom att använda en halleffektsensor. En sådan sensor mäter växelströmmen på primär sidan och omvandlar den till en växelspanning på sekundärsidan som kan läsas av från Arduinon.

Däremot, då Arduinon bara kan läsa av positiva värden så behövde kretsen kompletteras med en likriktare och ett aktivt RC filter för att kunna läsa av ett medelvärde från signalen. Kretsen för applikationen visas i figur 3.4 nedan.

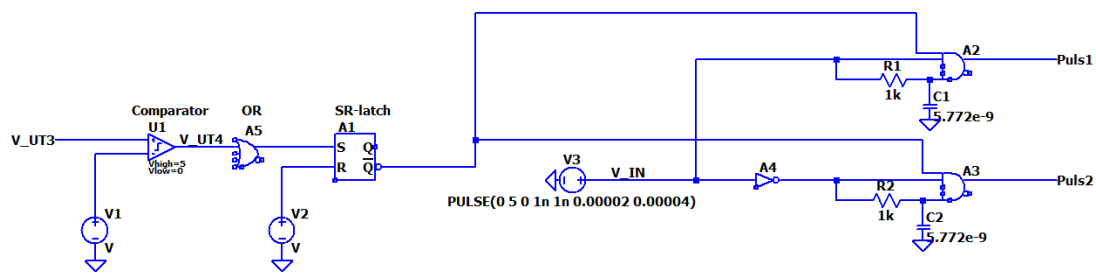


Figur 3.4: Kretsschema för signalbehandling av strömmätningen i LC-tanken på växelriktaren.

Kretsen består av tre delar: den första är strömsignalen från strömmätaren som omvandlas till en spänning genom resistorn R1. Därefter går signalen genom en precisionslikriktare för att bara få positiva värden på spänningen. Till sist så går den likriktade signalen genom ett aktivt RC filter med en lämplig tidskonstant, i detta fall 0.1 ms, som ger ett medelvärde som kan läsas från Arduinon.

3.1.2.4 Överströmsskydd

För att inte förstöra komponenter valdes det att införa logik för att begränsa strömmen i kretsen. Genom att använda en komparator och jämföra den likriktade signalen med en referens kan strömmen begränsas till ett önskat värde. Signalen från komparatorn går sedan in i en SR-latch som låser värdet och skickas vidare till fördröjningskretsen. Se figur 3.5. När den likriktade signalen blir högre än referensvärdet V1 så skickas en nolla till fördröjningskretsen som låser kretsen från drift. För att återställa kretsen så sattes en återställningsknapp vid SR-latchen.



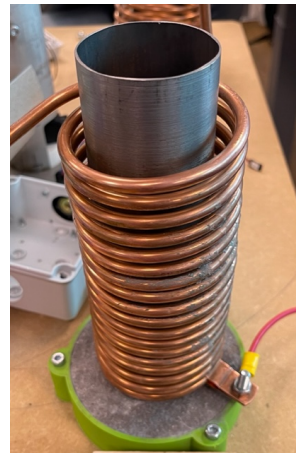
Figur 3.5: Krettschema på ett överströmsskydd bestående av digitala komponenter.

3.1.3 LC-tanken

För att bygga en effektiv resonanskrets så valdes det att använda en seriekopplad LC-tank. Detta val gjordes för att minimera impedansen och samtidigt maximera strömmen. För LC-tanken användes tio parallellkopplade kapacitanser på 220 nF vardera, vilket resulterade i en total kapacitans på 2.2 μF . Kapacitans-banken visas i figur 3.6 nedan. Denna bank seriekopplades sedan med en tidigare dimensionerad spole från föregående kandidatarbete för att slutföra resonanskretsen, som visas i figur 3.7. Spolen, som är lindad runt arbetsstycket mättes upp till 20 μH .



Figur 3.6: Kapacitans-banken



Figur 3.7: Spolen och arbetsstycket.

Genom användning av den dimensionerade LC-tanken kunde en teoretisk resonansfrekvens på 24 kHz uppnås, samtidigt som den kapacitiva reaktansen vid denna frekvens blev $3\ \Omega$. Kapacitanserna dimensionerades för att klara höga spänningsnivåer och därmed undvika eventuella skador som kan uppstå vid hög effektbelastning. För att förhindra kortslutning mellan spolen och röret valdes det att placera en mica-duk mellan dem för elektrisk isolering.

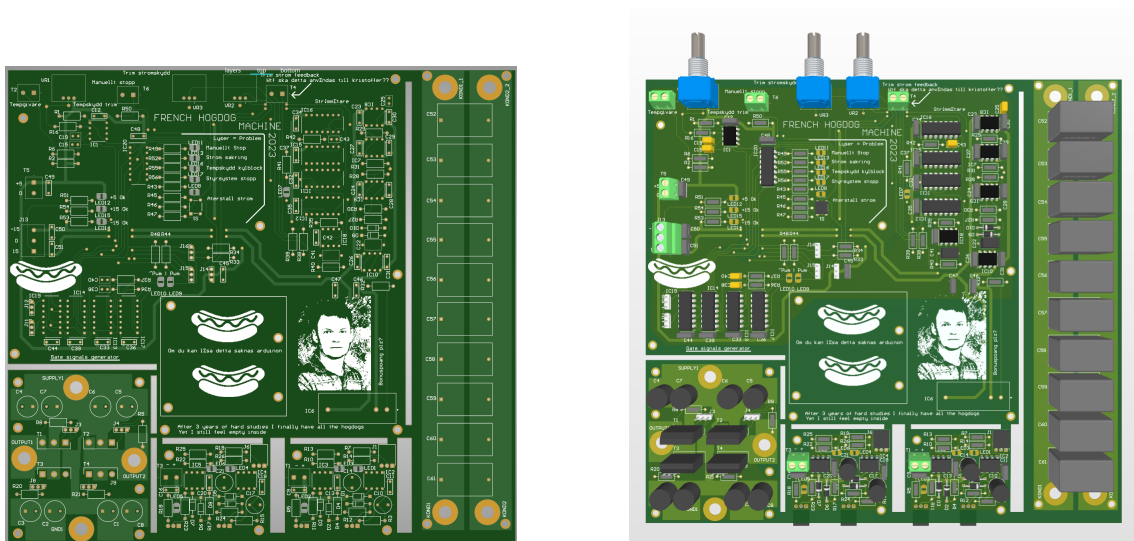
3.1.4 Konstruktion av kretskortet

Baserat på processflödet och simuleringarna, konstruerades ett kretskort i programvaran Altium Design. Kretsschemat för den slutgiltiga designen presenteras i bilaga

3. Metod

B.7. För att enkelt kunna modifiera kretsen vid eventuella fel valdes hålmonterade komponenter. Komponentvärdena optimerades utifrån simuleringar och datablad, och en fullständig lista över alla komponenter visas i bilaga C.

Under utvecklingen konstaterades det att växelriktaren kan skapa störningar och eventuella fel som kan påverka resterande kretsar. För att undvika detta så valdes det att separera alla kretsar från varandra. Detta åstadkoms genom att använda galvaniska snitt i kretsen, så som isolerade DC/DC omvandlare, optokopplare och två olika jordplan i kretsen. Figur 3.8 nedan visar det slutgiltiga kretskortet.



Figur 3.8: Kretskortsdesign på induktionsgrillen.

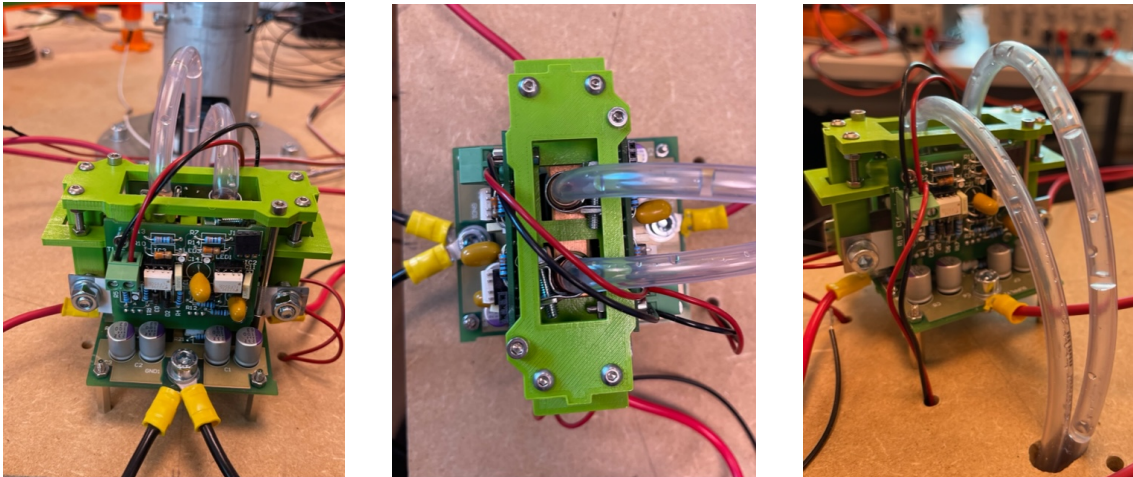
Vid konstruktionen av kretskortet var det viktigt att ta hänsyn till flera faktorer för att undvika eventuella problem. En av dessa faktorer var bredden på kopparbanorna, som påverkar den maximala strömmen som kan flöda genom dem. Det var viktigt att välja en tillräckligt bred kopparbana för att undvika överhettning och andra problem med strömhantering. Detta var speciellt nödvändigt vid växelriktaren, där strömmen är som högst, medan smalare kopparbanor användes på resterande kretsar.

En annan viktig faktor som beaktades var koppertjockleken, vilket också påverkar strömkapaciteten. I detta fall valdes en koppertjocklek på $105\ \mu\text{m}$ för att ge en strömkapacitet på $3\ \text{A}/\text{mm}$. Den grova tjockleken var nödvändig för de höga strömmarna i LC-tanken.

3.1.4.1 Växelriktaren

Konstruktionen av växelriktaren bestod av tre separata kretskort. Motivationen bakom detta är dels kompaktare design och dels att minimera de störningarna som de stora strömmarna i LC-tanken skapar på närliggande komponenter. Det stora kretskortet i botten innehåller bara de fyra transistorerna i H-bryggan samt 8 stycken kondensatorer om totalt $800\ \mu\text{F}$ över strömkällan för att motverka brus. Gate-signalerna går direkt till vertikala kontakter. Här minimerades anståndet för

att få så lite störningar som möjligt på gatesignalerna. All elektronik för att generera gate-signalerna är placerad på separata kort som sen monteras vertikalt i dessa kontakter. Slutligen är mycket koppar exponerat mellan transistorerna så att värme även effektivt kan ledas från kretskortet till kylblocket. Detta designval möjliggjorde en kompakt design och effektiv vattenkyllning som inte bara kyler transistorerna utan även kretskortet, se figur 3.9.



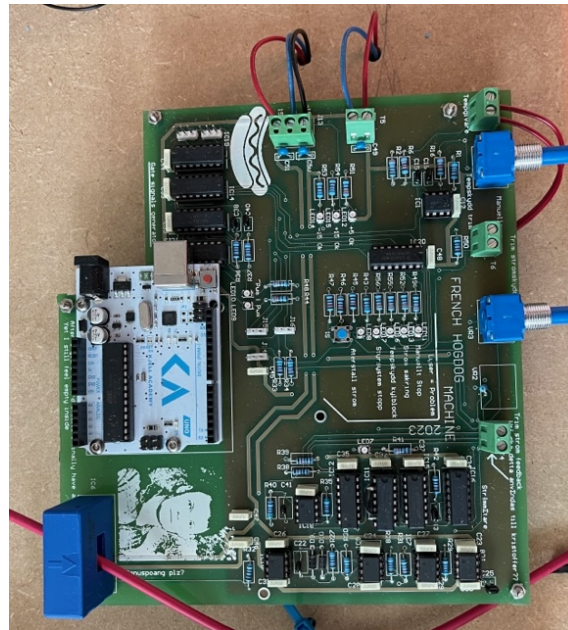
Figur 3.9: Den konstruerade växelriktaren med ett integrerat kylblock.

Mellan de vertikala kretskorten är transistorerna monterade och fastklämda med hjälp av en isoleringsduk för att undvika kortslutning. För att hålla kylblocket på plats så tillverkades ett fäste som monterades på ovansidan av de vertikala kretskorten med hjälp av 3D-printing. För att minimera risken för vattenläckage i samband med kylningen, monterades slangarna till kylblocket med hjälp av slangklämmor. Detta säkerställde en säker och stabil anslutning mellan slangarna och kylblocket.

3.1.4.2 Strömmätning och signalbehandling

Konstruktionen av signalbehandlingen består av ett större kretskort där alla logik-kretsar, Arduino och strömsensorn har monterats, se figur 3.10.

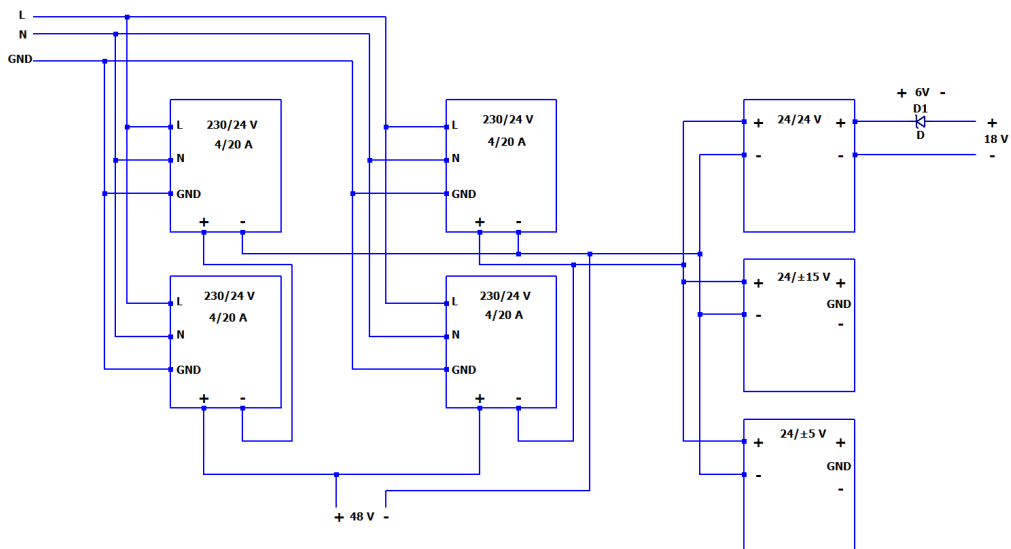
För att underlätta felsökning vid eventuella fel har lysdioder implementerats vid varje säkerhetsskydd, inkommande spänning och PWM-puls på kretskortet. För att möjliggöra enkel justering av referensvärden, har variabla motstånd monterats vid överströmsskyddet och temperaturskyddet. Strömsensorn har monterats på hörnet av kretskortet för att minimera störningar till andra delar av kretsen när strömmen mäts i LC-tanken.



Figur 3.10: Kretskortet för strömmätning och signalbehandling.

3.1.5 Strömförsörjning

För att de elektriska komponenterna ska fungera optimalt så behövs ett flertal olika spännings- och strömnivåer till projektet. Från tidigare arbete fanns det fyra nätaggregat som användes till huvudförsörjningen för hela projektet. Dessa nätaggregat omvandlar 230 V AC till 24 V DC och en ström på 20 A kan tas ut av vardera nätaggregat. För att maximera spänning- och strömnivåerna till induktionskretsen så seriekopplades nätaggregaten två och två för att uppnå en spänning på 48 V. Sedan så parallellkopplades paren för att få ut en ström på 40 A, se figur 3.11 nedan.



Figur 3.11: Strömförsörjningen till hela systemet.

Strömförsörjning till resterande delar av kretsen uppnås med hjälp av tre isolerade spänningsomvandlare enligt figuren ovan. Spänningsnivåerna ut från omvandlarna är $\pm 5\text{ V}$, $\pm 15\text{ V}$ och 18 V som både går till växelriktaren och signalbehandlingen i kretsen. Isolerade spänningsomvandlare valdes för att begränsa kretsen ifall fel skulle uppstå.

3.1.5.1 Strömförsörjning till växelriktaren

Från nätaggregaten kan en ström på 40 A tas ut till växelriktaren. Detta tillsammans med den maximala spänningen på 48 V ger en effekt på 1920 W som kan matas in till växelriktaren. För att klara av att leverera denna effekt så ställer det krav på kabelarea för att klara av de höga strömmarna. En kabelarea på 4 mm^2 med en hög temperaturtålighet valdes för detta fall då denna specifikation klarar kraven. Vidare behövs 18 V till drivkretsarna för att styra växelriktaren och detta matas från $24/24\text{ V}$ spänningsomvandlaren i figur 3.11. Genom att använda en zener diod i serie till spänningsomvandlaren kan en spänning på 18 V erhållas.

Strömmen i LC-tanken mättes med hjälp av en strömsensor som krävde en spänning på $\pm 15\text{ V}$. Denna spänning matades också från en av spänningsomvandlarna som var ansluten till nätaggregaten.

3.1.5.2 Övrig strömförsörjning

För att säkerställa en korrekt signalbehandling och skydd mot strömproblem i kretsen, användes flera integrerade grindar som krävde olika spänningsnivåer, nämligen 5 V och $\pm 15\text{ V}$. För att undvika överbelastning av arduinon och för att leverera tillräckligt med ström till de olika delarna, matades dessa spänningar från både Arduinon och en spänningsomvandlare. För att driva servomotorerna och för kylning användes icke-isolerade buckregulatorer med hög utström. Kylsystemet krävde en spänning på 12 V och servomotorerna krävde en spänning på 5 V som levererades från dessa regulatorer.

3.1.6 Kylning

För att förhindra överhettning av komponenter, särskilt transistorer, så var det nödvändigt att införa någon form av kylning. Det konstaterades att vattenkylning är ett effektivt sätt att kyla komponenterna, vilket även bidrar till en mer kompakt krets och minimering av förluster. Detta uppnås genom att montera en vattenreservoar med en pump och en radiator med fläktar på vagnen, vilket visas i figur 3.12.

Kylprocessen fungerar så att pumpen i reservoaren leder in vattnet i radiatoren, där det kyls ner av två fläktar. Därefter fortsätter vattnet vidare till koppar-kylblocket där transistorerna är monterade. Här kyler det kalla vattnet värmeavgivande komponenter på växelriktaren så överhettning kan förhindras, vilket ökar effektiviteten och livslängden för elektroniken. Det varma vattnet strömmar det sedan tillbaka till reservoaren för att upprepa kylcykeln. På så sätt kan systemet upprätthålla en stabil temperatur och säkerställa optimal prestanda för växelriktaren.



Figur 3.12: Kylningen av växelriktaren bestående av en vattenreservoar, radiator och pump

3.1.7 Temperaturmätning

För att veta korvens innertemperatur och därmed tillagningsprocess så användes korvhissens termoelement från föregående års arbete [3]. Tanken var att spetsa korven med termoelementet och föra ner den i arbetsstycket för att mäta innertemperaturen på korven och ta ut den när korven har uppnått en önskad temperatur.

Temperaturmätningen på kylblocket var också nödvändigt för att inte överhätta transistorerna. För detta monterades en termistor på kylblocket som ändrar resistansen beroende på temperaturen. Detta möjliggjorde också att man kunde implementera temperaturskyddet i kretsen.

3.2 Automatiserade systemet

Under den initiala felanalysen av det automatiserade systemet från föregående arbete analyserades framförallt de slutsatser och resultat som presenterades i föregående års rapport [3]. Som komplement till rapportstudien studerades även en rad testvideos som delades av föregående års projektgrupp. Att montera ihop prototypen och genomföra funktionstester bedömdes vara olämpligt. Detta då prototypen i sitt dåvarande skick var till stor del isärplockad och på grund av bristande monteringsinstruktioner samt en redan god uppfattning av de huvudsakliga problemområdena

togs beslutet att inte försöka montera ihop prototypen eller att genomföra initial tester.

Då arbete i sig är ett fortsättningsarbete så valdes det att behålla föregående års kravspecifikation och inte heller göra omfattande ändringar i designen [3]. Utvecklingsarbetet efter felanalysen gjordes i följande steg:

1. Rangordna de identifierade de huvudsakliga problemområden som behöver åtgärdas.
2. Idégenerering av lösningar till identifierade problemområden.
3. Applicera de nya lösningarna i det nuvarande systemet och därefter testa och utvärdera.

3.2.1 Problemområden

Baserat på föregående års slutsatser och resultat kunde en rad problemområden identifieras [3]. Det huvudsakliga problemområdet från föregående år var precisionsfel i systemet som kan kopplas till en rad olika faktorer. Dessa faktorer bedöms vara följande:

- Materialval
- Undermålig hållfasthetsdesign
- Undermålig precision vid montering av komponenter kopplat till kvalitén av komponenterna.

För komponenter som används i syfte att stabilisera konstruktionen är valet av material av hög vikt då ett felaktigt materialval kan leda till en rad olika problem såsom oönskad töjning och deformation. Föregående års arbete valde att tillverka majoriteten av de ingående komponenterna i olika plastsorter (PLA, ABS, PC, PP och PVC). Det fick följderna att kritiska komponenter som sockeln och baspelaren som monterades i sockeln sviktade i när systemet utsattes för önskad belastning.

En annan faktor som påverkar precisionen är själva utformningen på robotarmarna. I sin nuvarande utformning så sviktar armarna i infästningarna på grund av hög belastning och otillräckliga stödpunkter. Detta sker då armarna enbart är monterade med en rak balk för att sedan utsättas med en hög kraft i änden av balken. En design som detta tar inte hänsyn till hävstångseffekten i tillräckligt stor utsträckning vilket skapar elastiska deformationer i systemet som ytterligare bidrar till precisionsfelet.

Utöver materialvalet och bristande hänsyn till hävstångseffekten så kan en del även härledas till precisionsfel som uppstod vid tillverkning och montering av egentillverkade komponenter. Då mycket av de ingående komponenterna var egentillverkade av studenter med varierande erfarenheter och kunskaper samt att de verktyg och tillverkningsmetoder som använts inte nödvändigtvis har tillgodosett en hög grad

av precision så har det inneburit att det finns ett antal glapp i systemet.

I samband med felanalysen togs det fram en prioriteringslista för lämplig åtgärder som bör göras för att förbättra precisionen i systemet:

1. Materialval till sockel och baspelare.
2. Stödarmar på robotarmarna
3. Korvhissen. Ersätta kugghjul och kuggstång med annan lämplig lösning för att minska glappen som uppstår.

Då arbetets fokusområde var att konstruera en fungerande induktionsgrill och att effektiviteten i det autonoma systemet inte prioriterades, gjordes de önskade förbättringsförslagen i den mån av tid och prioritetsordningen. Målsättningen var dock att slutföra de först två punkterna i listan.

3.2.2 Arbetsgång/designprocess

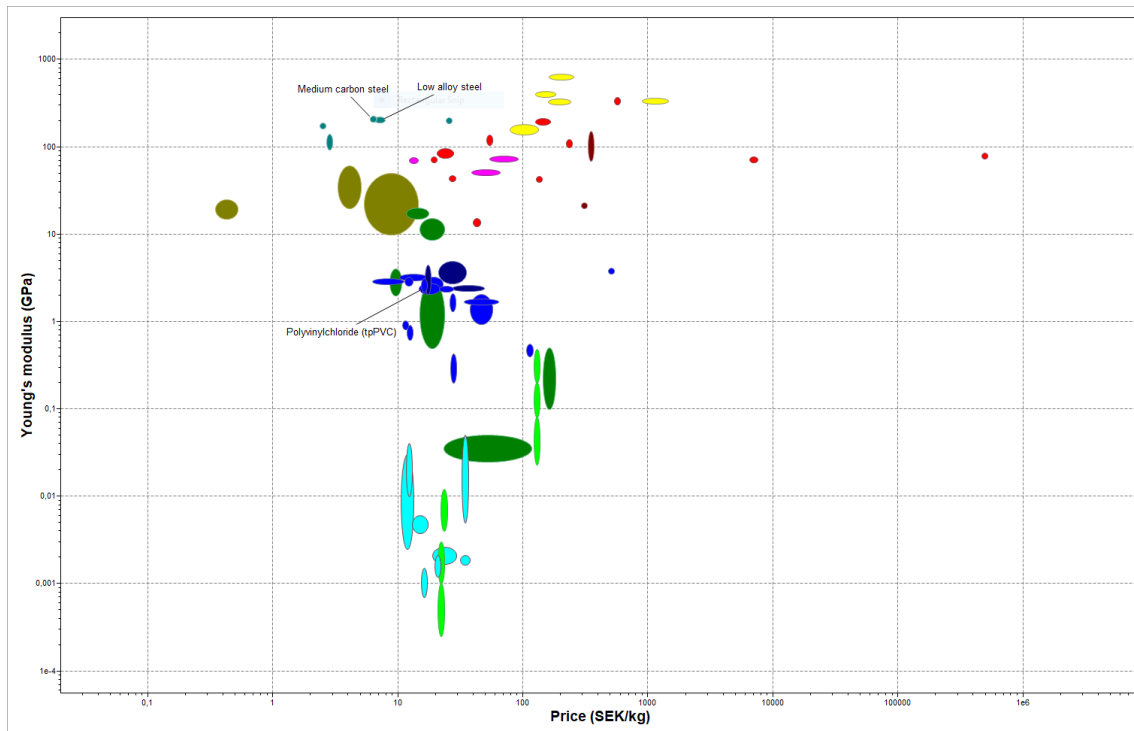
Då sockel, baspelare och robotarmar är komponenter som hänger ihop med varandra så gjordes utvecklingsarbetet på dessa som ett större projekt istället för att dela in de i separata delprojekt.

Arbetet påbörjades genom att först återskapa den första designen på baspelaren i modelleringsprogrammet CATIA V5. Syftet med att återskapa modellen var att underlätta visualiseringen av hur eventuella förändringar i designen skulle påverka de övriga komponenterna i systemet, särskilt när det gäller dimensioner och möjligheter till montering. Det gjordes även i syfte att enklare kunna ta fram de korrekta måtten som behövdes för att kunna dimensionera stödbalkarna och göra de initiala hållfasthetsberäkningarna. Modellen skapades med hjälp av ritningarna som bifogats i föregående års rapport [3].

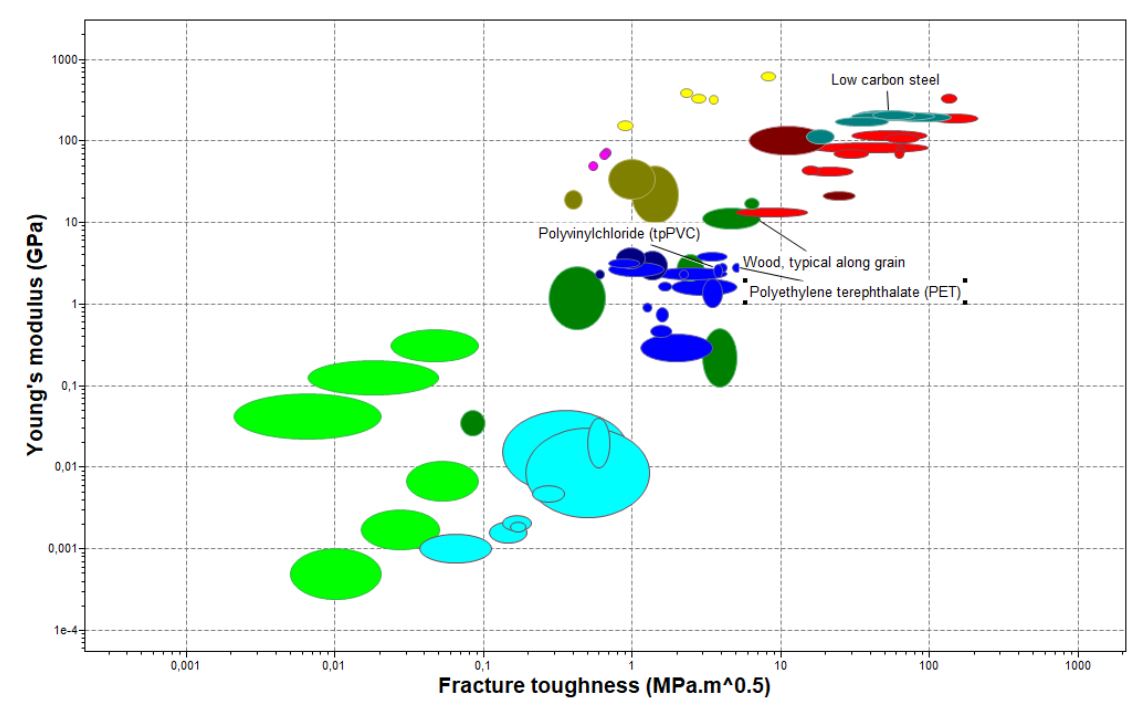
3.2.3 Materialval

Efter att den första CAD modellen skapats gjordes en materialvalsanalys för de ingående delarna i modellen. Tidigare års resultat visade på att tillverka komponenterna i olika plasttyper inte gav tillräckligt stabilitet i systemet på grund av undermålig styvhet. Ett sätt att åtgärda detta var att ersätta de ingående designade plastkomponenterna med snarlika delar i ett mer styvt material.

För att göra ett lämpligt materialval användes programvaran Granta Edupack. Analysen gjordes med fokus på styvhet, hårdhet och pris. Analysen gjordes även väldigt översiktligt och jämförde inte olika typer av samma material. Anledningen till detta var att det bedömdes inte vara relevant då fokus var att åtgärda det huvudsakliga problemet med stabiliteten i systemet och inte nödvändigtvis för att optimera enskilda komponenter med hjälp av materialval. Resultatet från analysen visade dock på att kolstål hade varit lämpligt att nyttja vid konstruktion av sockel och torn istället för PVC och (ABS eller PLA). Se figur 3.13 och 3.14 nedan.



Figur 3.13: Styvhet och pris.



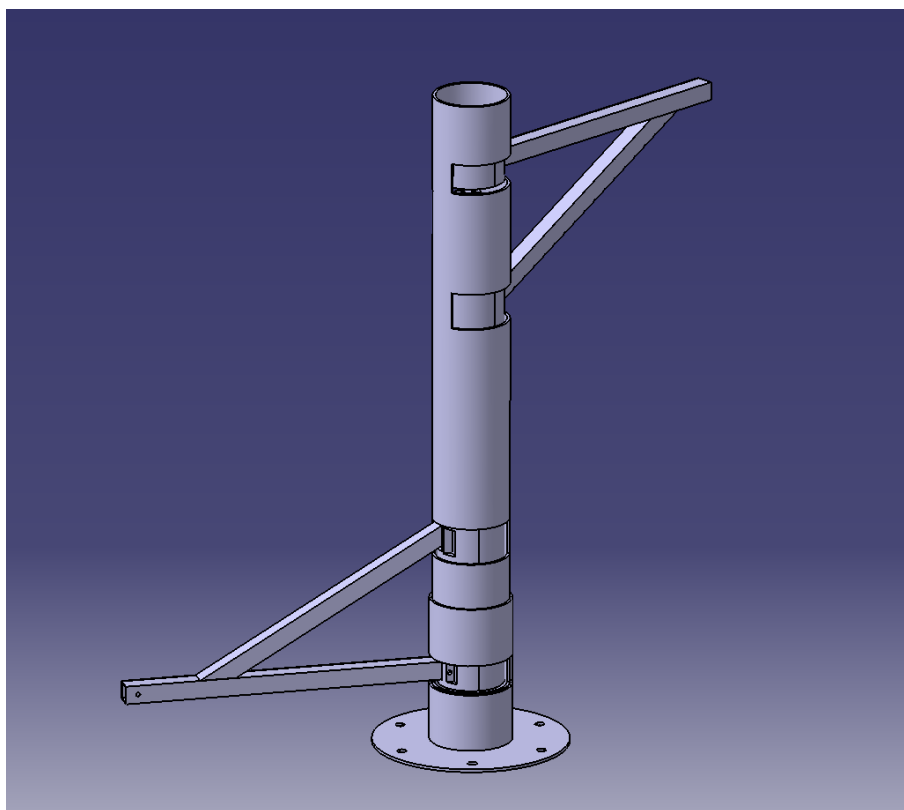
Figur 3.14: Styvhet och hårdhet

3.2.4 Hållfasthetsåtgärder

I syfte att minimera sviktandet i robotarmarna togs beslutet att montera varsin stödarm till respektive robotarm. Detta då en fackverkskonstruktion bidrar till mer

stöd och stabilitet än en enskild monterad balk.

Initialt gjordes en rad enklare pappersberäkningar som tog hänsyn till grundläggande hållfasthetsprinciper för att beräkna töjningen i en balk med och utan stödbalkar monterade. De initiala beräkningar visade att med stödbalkar monterade så minimeras en teoretisk böjning i en balk med en faktor på ca 10^5 . Detta bedömdes vara en tydlig indikation på att stödbalkar kan bidra till att lösa precisionsfelet som orsakats av böjning i balkar. Efter att beräkningarna var genomförda, genomfördes en omdesign av baspelaren i CATIA V5 för att möjliggöra montering av stödbalkar. Den slutgiltiga modellen kan ses i figur 3.15 nedan.



Figur 3.15: CAD-modell av baspelaren.

Det diskuterades också att genomföra en mer omfattande hållfasthetsanalys där den designade CAD-modellen skulle analyseras i sin helhet med hjälp av FEM och programvaran ANSYS Workbench. Men det bedömdes som icke-nödvändigt eftersom det skulle ha tagit för lång tid och inte bidragit i stor utsträckning till den övergripande utvecklingen av systemet. Dessutom bedömdes de konstruerade komponenterna inte vara utsatta för höga belastningar, vilket ledde till beslutet att inte genomföra en FEM-analys.

Det bör noteras att den genomförda analysen är en statisk analys som inte tar hänsyn till rörelse i ingående komponenter och att analysen utförs i 2D-format. Syftet med analysen är främst att påvisa fördelarna med att montera stödbalkar och hur mycket extra avlastning det ger systemet. Den är inte avsedd för exakta beräkningar eller för att optimera design, materialval eller dimensioner.

3.2.5 Tillverkning och konstruktion

Efter att det slutgiltiga systemet modellerats i CATIA V5 togs det fram nya ritningar som användes för att praktiskt konstruera en prototyp. Ritningarna visas i bilaga B.

Initialt presenterades ritningarna för personal i Chalmers prototypplabb och efter konsultation togs beslutet om att enbart montera en fläns på metallröret som skulle agera baspelare istället för att konstruera en separat sockel. Detta då det skulle vara onödigt att tillverka en sockel i metall när det enbart skulle räcka att montera på en fläns på baspelaren för förbättra hållfastheten markant.

För att tillverka baspelaren nyttjades ett rör av rostfritt stål med diametern 60.5 mm och tjockleken 1 mm. Därefter användes en metallfräs för att göra de önskade öppningarna och hålet i baspelaren. Till sist så slipades kanter och vassa ändrar ner för att runda av kanterna.

Flänsen till baspelaren tillverkades genom vattenskärning enligt ritning och monterades på baspelaren med hjälp av svetsning. Allra sist så borrades de skruvhål som är tänkta att nyttjas för att montera fast det pucksystem som möjliggör rörelse i armarna. Det slutgiltiga utseendet på baspelaren utan skruvhål kan ses i figur 3.16.



Figur 3.16: Baspelare

3.2.6 Pucksystemet

Som tidigare nämnt så valdes det att behålla det pucksystem som tillåter rotation i robotarmarna. Men under arbetets gång blev det nödvändigt att tillverka en ny uppsättning puckar då det stålrör som användes till baspelaren inte var i exakt

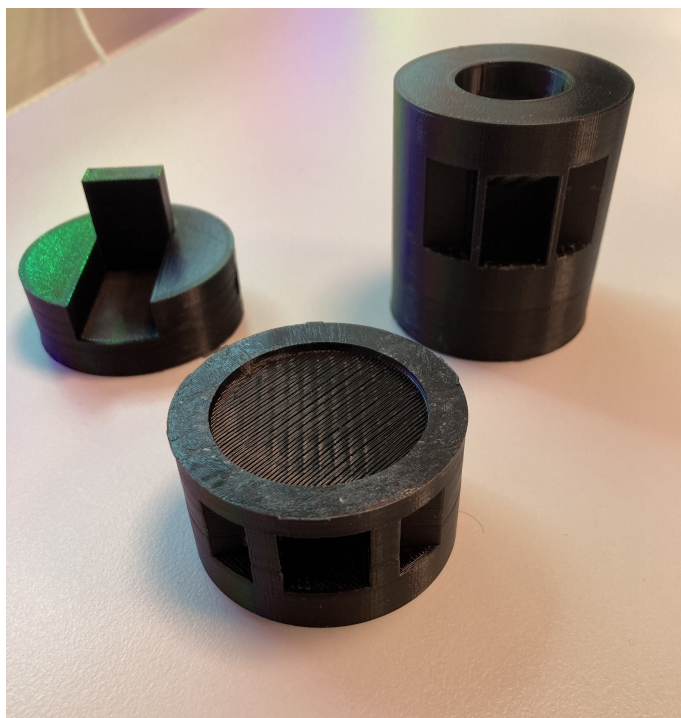
3. Metod

samma dimension som förra årets torn i PVC. Det nya tornet har en kortare diameter på 60.5 mm istället för 63.5 mm. Därav blev det tvunget att 3D-skriva nya puckar till systemet. Se figur 3.17.

Vid tillverkningen av puckarna gjordes även en rad smärre designändringar för att göra puckarna enklare att arbeta med med hänseende till de resurser som fanns tillgängliga på Chalmers. Detta gjordes för att slippa tidsfaktorn som tillkommer vid beställning av nya komponenter från utomstående leverantör samt att det tillät mer tid till att testa designen.

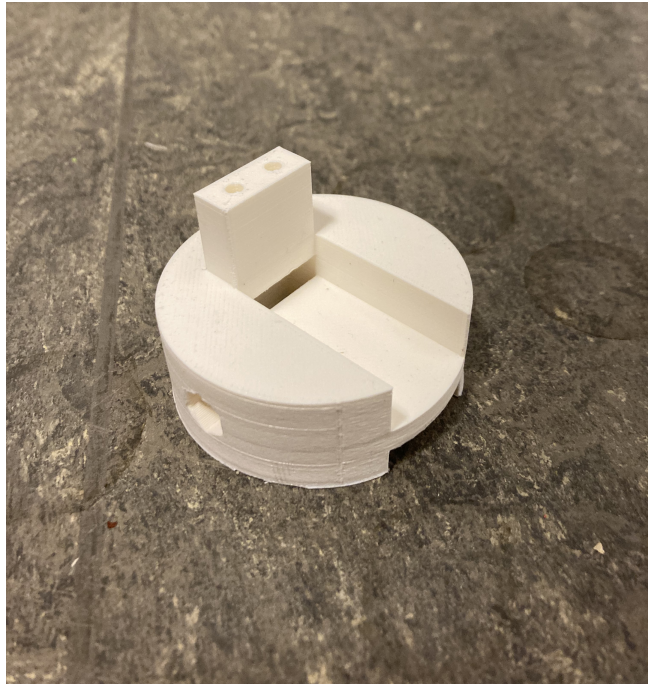
De gjorda designändringarna inkluderade bland annat att göra infästningshål för vanliga muttrar istället för använda sig av muttrar med gängade kanter. Dessutom minskades diametern för varje puck för att möjliggöra uppfyllandet av rotationsfunktionen.

Även ingropningen för servomotorns propeller designades istället om till att enbart bli en cirkel istället för att matcha mönstret exakt. Anledningen till detta var att lättare kunna ersätta propellern med en annan modell ifall det skulle finnas behov för en sådan förändring. Därmed blir komponenten mer anpassningsbar. Samtliga nya puckar 3D-skrevs i PLA.



Figur 3.17: Servopuck, vinkelpuck och stödpuck

Även en åtgärd som inte initialt var med på åtgärdslistan 3 genomfördes vilket var att göra små ändringar designen av servopuckarna för att möjliggöra en smidigare dragning av sladdarna för vinkelservot. Den nya designen gjordes efter att den första vinkelpucken tillverkats och undersöktes. Den korrigerade servopucken kan ses i figur 3.18.



Figur 3.18: Omdesignad servopuck

3.2.7 Styrning av systemet

För att säkerställa en effektiv styrning och kontroll av de olika delsystemen i det autonoma systemet användes två styrenheter. För den centrala enheten som styr systemet på högsta nivå användes en Raspberry Pi-enkortsdator med linux operativsystem. Men då ett operativsystem medför att processer inte nödvändigtvis körs i realtid kan denna inte användas för att generera fyrkantsvågen till växelriktaren, vilket kräver en noggrannhet runt $1\ \mu\text{s}$. Till detta användes en separat Arduino Uno-mikrokontroller som är mer lämpad för realtidsprocesser. Mikrokontrollern användes också för att läsa in analoga sensorvärden då den har inbyggda analog-digitalomvandlare. De två styrenheterna kommunicerade med varandra via en UART-bus med hjälp av en standard USB-kabel.

För att avlasta styrenheterna från att behöva generera styrsignaler till de flertalet servomotorer användes en separat servostyrningsmodul. Denna modul kommunicerade med styrenheten via I2C protokollet.

För implementering av styrningen valdes högnivåprogramspråket Python. I stora drag användes ett ramverk för intelligent automation där robotens sekvenser är representerade som en graf, där noder motsvarade tillstånd och kanter representerade övergångskriterier och handlingar. Kriterier för att detektera knapptryckningar, servostatus, sensorvärden, temperatur och effekt för att styra servon, sätta indikatorlampor och justera uppvärmning implementerades. Genom att använda dessa modulära byggstenar så skapades en graf som representerade hela robotens rörelsesekvens.

3. Metod

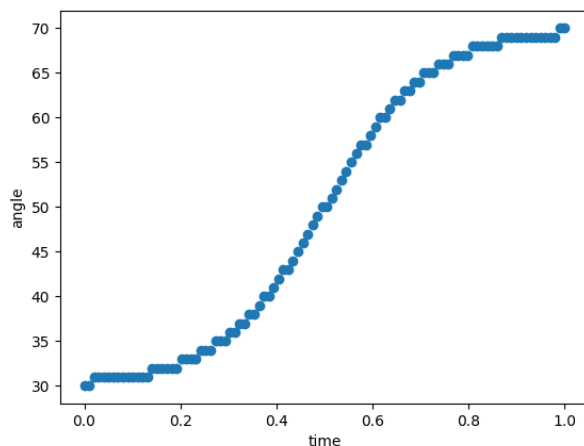
För att utföra sekvensen som beskrivs i grafen räcker det med följande (pseudo)kod:

```
def run_state(state):
    while True:
        for transition in state.transitions:
            if transition.is_active:
                transition.execute()
                run_state(transition.nextstate)

def main():
    run_state(root_node)
```

För att kontinuerligt kunna avläsa sensorvärden användes flertrådning, vilket möjliggjorde kontinuerlig avläsning av alla sensorer med bestämda intervall utan att störa huvudsekvensen.

Eftersom de använda servomotorerna hade en tendens att överkompensera när styrvinkeln ändrades och därmed orsaka kraftiga översvängningar användes en mjukningsfunktion som, istället för att ändra styrvinkeln i ett steg, skapade en mjuk ändring. För detta användes sigmoid-funktionen $f(x, k) = \frac{1}{1+e^{-kx}}$ där x är tiden och k en variabel som bestämmer lutningen. Resultatet illustreras i figur 3.19. Även här användes flertrådning för att kontinuerligt uppdatera styrvinklarna till servomotorerna.

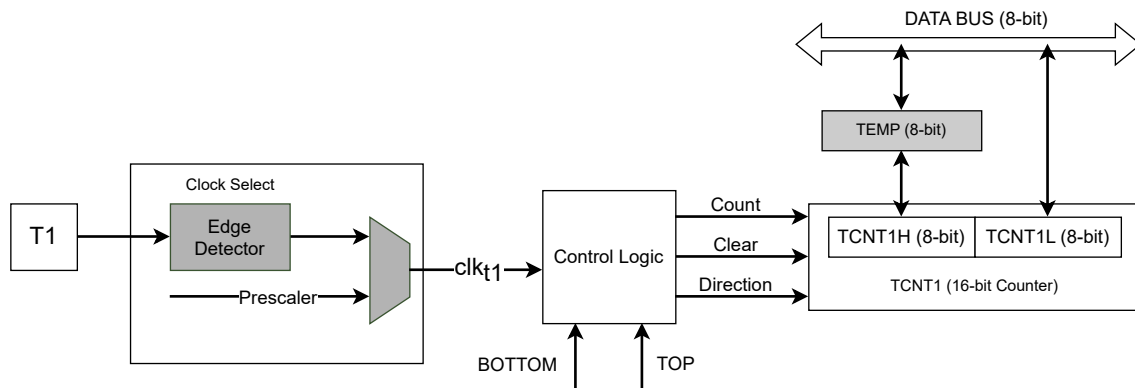


Figur 3.19: Servostyrning, mjukning

Förutom styrningen av sekvensen inkluderades även temperaturmätning, strömmätning, aktivering av induktionsgrill och frekvensgenerering genom styrdatorn. Genom att ha kontroll över dessa delar via styrdatorn blev det enklare att övervaka och styra systemet som helhet.

3.2.7.1 Frekvensgenerering med Arduino Uno

Mikrokontrollern som används är ATmega328P som sitter på en Arduino Uno. Denna mikrokontroller har enligt datablad 3 timers; timer 0 och timer 2 (8-bit) som räknar mellan 0 och 255 samt timer 1 (16-bit) mellan 0 och 65535 [34].



Figur 3.20: Blockschema enligt specifikation för ATmega328P 16 bitars räknare

I figur 3.20 motsvarar T1, timer 1 klockpulssignal, som tillsammans med prescaler bildar en klockpuls clk_{T1} . Prescalern har bestämda valbara värden för 16-bitars räknaren enligt: $N_{pre} = 1, 8, 64, 256, 1024$. En prescaler används för att dividera frekvensen av en ingående signal. Om en prescaler har ett värde 8, bildas en klockpuls på clk_{T1} var åttonde puls av T1. Om prescaler väljs till 1 blir clk_{T1} samma som T1.

När en puls når logikblocket ökar, minskar eller återställs timer/counter 1 (TCNT1) registret beroende på operationsläge. De olika operationslägen väljs genom waveform generation mode bitarna (WGM) i timer/counter control registret (TCCR) enligt tabell 3.1. Vidare kommer endast Clear Timer on Compare Match (CTC) behandlas då det operationsläget valdes för i detta applikationsområdet.

3.2.7.2 Clear Timer on Compare Match (CTC)

Värdet som uppdateras i TCNT1 registret vid varje klockpuls, jämförs med ett 16 bitars output compare register (OCR). När TCNT1 registret når samma värde som i OCR-registret återställs räknaren till startvärdet. Ett ytterligare register Timer/Counter1 Control Register (TCCR1) bestämmer vad som händer när räknaren når värdet i OCR-registret.

Väljer man att toggla output vid matchning skapas en fyrkantsvåg på en pin på Arduinon med en frekvens som bestäms av tiden det tar för räknaren att räkna upp till värdet i OCR-registret. Värt att notera för CTC så uppdateras uppdateras värdet i OCR-registret "immediate", vilket betyder att registret uppdateras vid nästa klockpuls efter registret uppdateras. Om man ändrar värdet i registret till ett värde är lägre än i räknarregistret (TCNT1), kommer räknaren missa jämförelsen och därmed räkna hela vägen upp till max värdet (65535).

Tabell 3.1: Valbara operationslägen för 16 bitars räknare

Mode	Control bits, TCCR				Timer/Counter Mode	TOP	Update of OCR1x at	TOV1 Flag
	WGM13	WGM12	WGM11	WGM10				
0	0	0	0	0	Normal	0xFFFF	Immediate	MAX
1	0	0	0	1	PWM, phase correct, 8-bit	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0	0	1	0	PWM, phase correct, 9-bit	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0	0	1	1	PWM, phase correct, 10-bit	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0	1	0	0	CTC	OCR1A	Immediate	MAX
5	0	1	0	1	Fast PWM, 8-bit	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0	1	1	0	Fast PWM, 9-bit	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0	1	1	1	Fast PWM, 10-bit	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1	0	0	0	PWM, phase & frequency correct	ICR1	BOTTOM	BOTTOM
9	1	0	0	1	PWM, phase & frequency correct	OCR1A	BOTTOM	BOTTOM
10	1	0	1	0	PWM, phase correct	ICR1	TOP	BOTTOM
11	1	0	1	1	PWM, phase correct	OCR1A	TOP	BOTTOM
12	1	1	0	0	CTC	ICR1	Immediate	MAX
13	1	1	0	1	(Reserved)	-	-	-
14	1	1	1	0	Fast PWM	ICR1	BOTTOM	TOP
15	1	1	1	1	Fast PWM	OCR1A	BOTTOM	TOP

Tabell 3.2: Valbara operationslägen för 16 bitars räknare

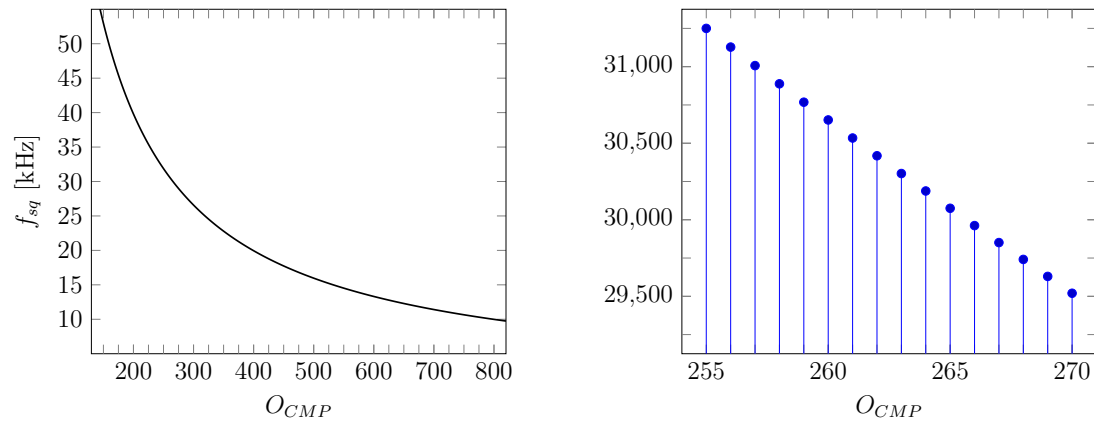
TCCR1		
COM1A1/COM1B1	COM1A0/COM1B0	I/O funktionalitet
0	0	Ingen output
0	1	Togglar output vid matching
1	0	Sätt låg output vid matching
1	1	Sätt hög output vid matching

Följande parametrar gäller för ATmega328P: $f_{clk} = 16$ MHz, $O_{cmp} = 0 - 65535$, $N_{pre} = 1, 8, 64, 256, 1024$, där f_{clk} är klockhastigheten, O_{CMP} jämförelsevärde för 16 bitars OCR-register, och N_{pre} motsvarar värden för prescalern. Ekvationer för att räkna ut vilken frekvens f_{sq} fyrkantsvågen får för ett visst jämförelse värde O_{CMP} , och vice versa blir då:

$$f_{sq} = \frac{f_{clk}}{2N_{pre} \cdot (O_{CMP} + 1)}$$

$$O_{CMP} = \frac{f_{clk}}{2N_{pre} \cdot f_{sq}} - 1.$$

Vidare i figur 3.21 följer två grafer i olika intervall för att tydligare illustrera förhållandet mellan f_{sq} och O_{CMP} .



Figur 3.21: Frekvensgenerering 50 kHz – 10 kHz, $N_{pre} = 1$

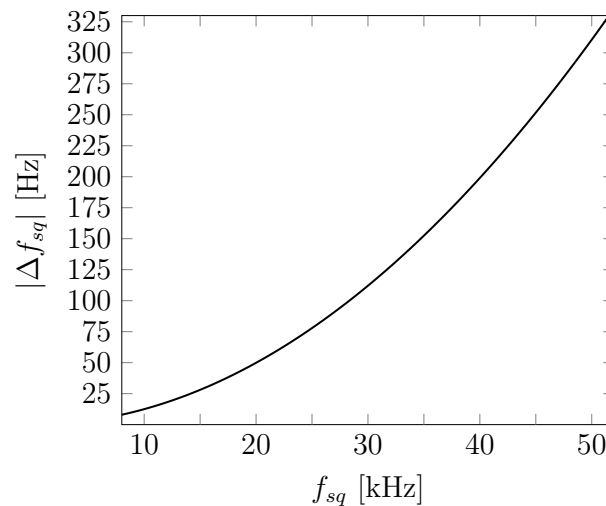
Absolutbeloppet av den diskreta derivatan beskrivs av:

$$|\Delta F[n]| = n \mapsto |F[n] - F[n - 1]|, \quad (3.1)$$

vilket kan användas för att beskriva vilken upplösning som är möjlig vid olika frekvenser för generering av fyrkantsvågen.

$$|\Delta F[n]| = n \mapsto \frac{f_{sq}^2}{\frac{f_{clk}}{2} - f_{sq}}, \quad n = f_{sq} \quad (3.2)$$

Inom intervallet 10 – 50 kHz kommer den sämsta upplösningen vara på ungefär 325 Hz för ATmega325P i CTC-läge.



Figur 3.22: Frekvensupplösning 10 kHz – 50 kHz

4 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultaten från den autonoma induktionsgrillen och hur väl syftet har uppnåtts av prototypen. Avsnittet har delats upp i de båda huvudområdena: induktion och autonomi.

4.1 Induktionsgrillen

För att testa induktionsgrillens funktionalitet och säkerställa att den uppfyller de krav och specifikationer som ställdes så utfördes ett antal mätningar. Dessa mätningar syftade inte bara till att upptäcka eventuella fel utan också till att utvärdera induktionsgrillens prestanda och mäta effektiviteten i överföringen av effekt till arbetsstycket. De här resultaten är avgörande för att bedöma induktionsgrillens prestanda och de utgjorde grunden för uppbyggnaden av själva induktionsgrillen. Nedan redovisas de mest väsentliga resultaten från mätningarna.

4.1.1 Fördröjningskrets

En fyrkantsvåg med en arbetscykel på 50% genererades av en Arduino och matades in i kretskortet vid resterande signalbehandling. Denna fyrkantsvåg transporteras sedan genom fördröjningskretsen för att skapa två fyrkantsvågor med en dödtid. Utsignalerna som genererades av fördröjningskretsen visas i figur 4.1 nedan.



Figur 4.1: Signalerna ut från fördröjningskretsen

I figuren 4.1 visas en dödtid på $1.1 \mu\text{s}$ för varje period som optimerades baserat på de två RC-filtren i kretsen. Genom ett flertal mätningar med olika tidskonstanter visade det sig att en kortare dödtid gav bättre prestanda till induktionsgrillen, men det var viktigt att den var tillräckligt hög för att undvika kortslutning i kretsen.

Signalerna som skickades till transistorerna hade en liknande form som utsignalerna

4. Resultat

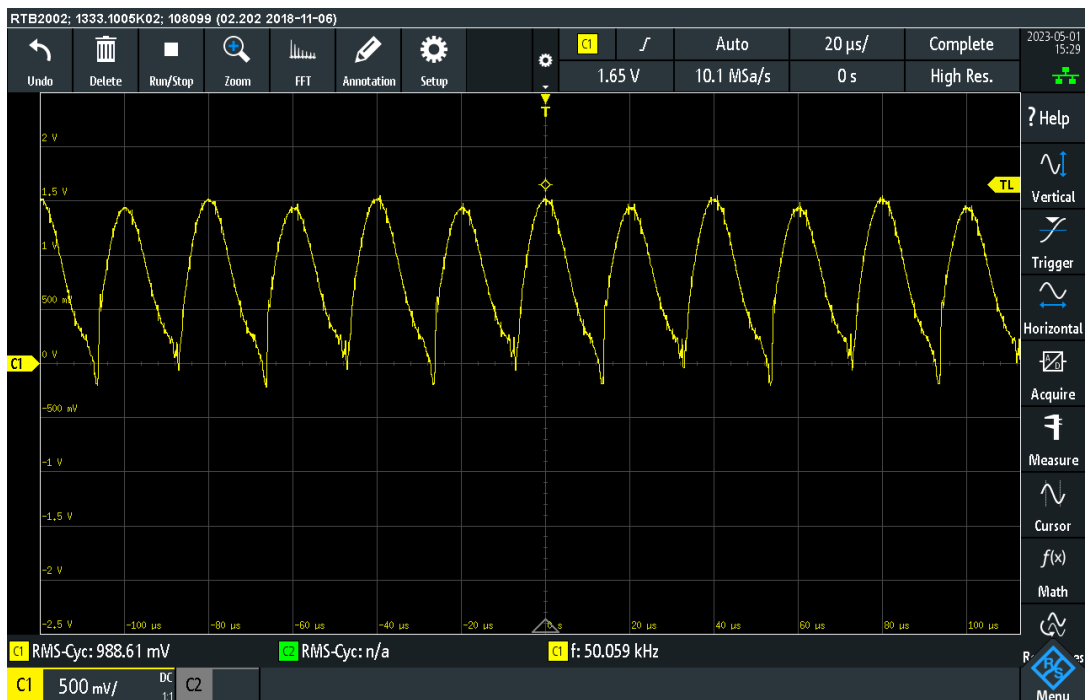
från fördröjningskretsen, men med en högre spänning, vilket var förväntat från drivkretsarna. I figur 4.2 visas de två insignalerna till transistorerna med en dödtid på $1.25 \mu\text{s}$. Denna dödtid gör det möjligt för transistorerna att byta polaritet i kretsen utan att det uppstår kortslutning.



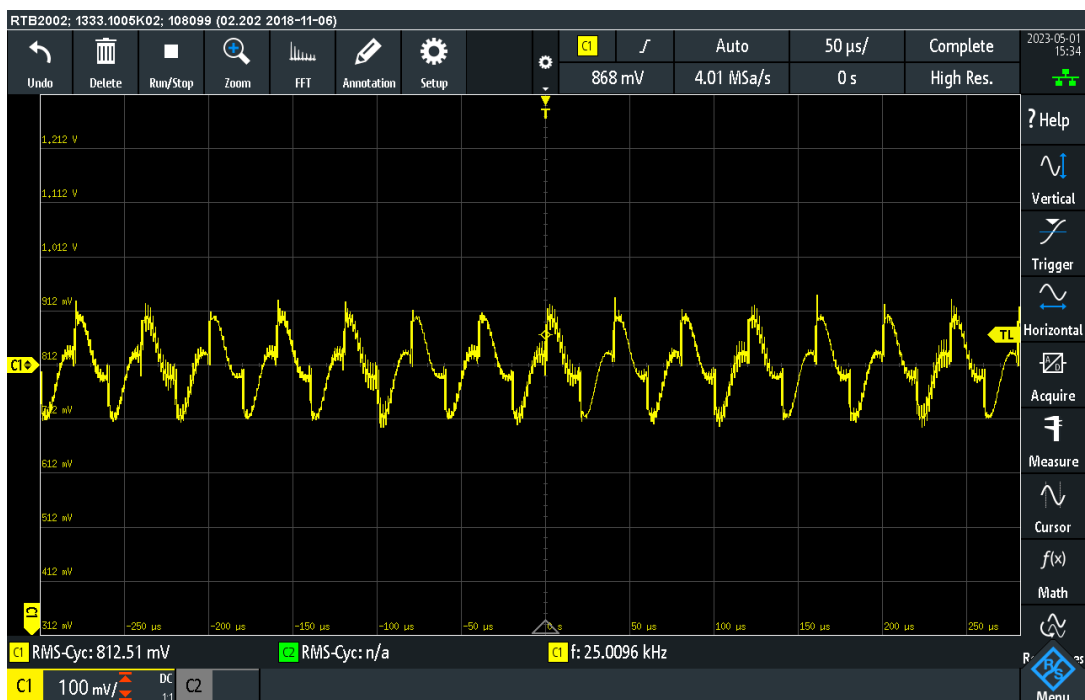
Figur 4.2: Signalerna till transistorerna.

4.1.2 Signalbehandling

För att mäta strömmen från LC-tanken användes en strömsensor, vars utsignal likriktades för att kunna mätas av Arduinon som bara kan läsa positiva värden. Resultatet från precisionslikriktaren presenteras i figur 4.3 nedan. Den likriktade strömmens medelvärde, användes som indikator för att se när resonansfrekvens, och därmed maximal ström, var uppnådd. Resultatet av likriktarens medelvärde presenteras i figur 4.4 nedan.



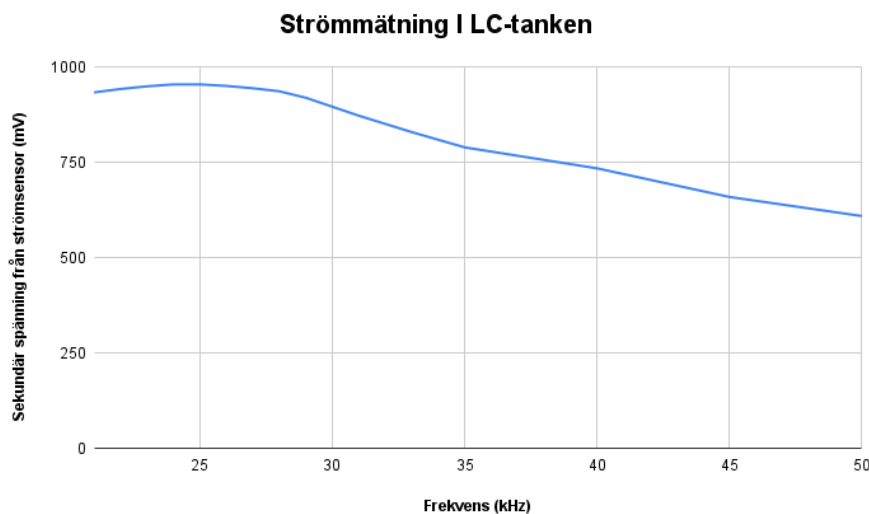
Figur 4.3: Den likriktade strömsignalen från strömsensorn.



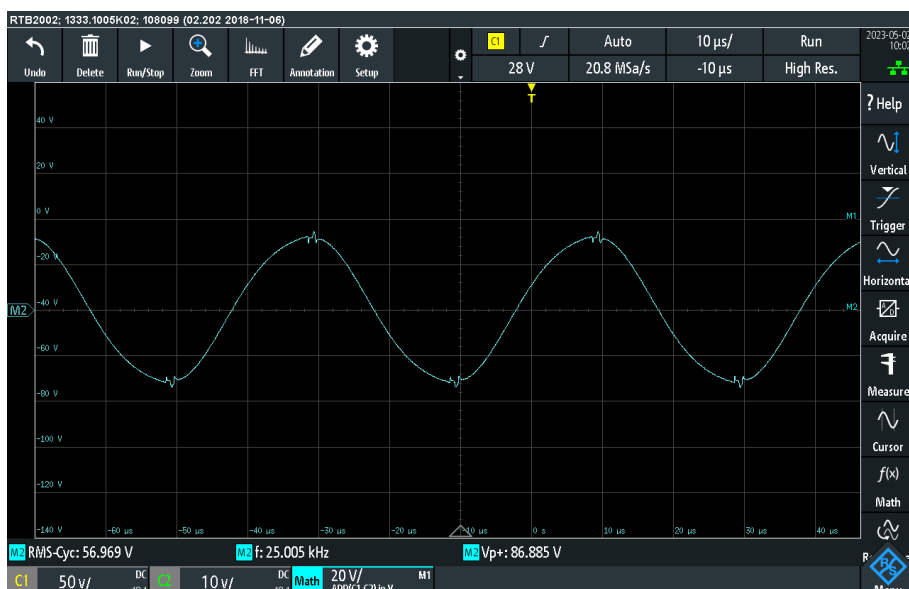
Figur 4.4: Medelvärdet av den likriktade strömsignalen.

4.1.3 Växelriktare

För att hitta resonansfrekvensen så genomfördes mätningar genom att variera frekvensen och observera hur strömmen i LC-tanken påverkades. Testet utfördes vid en effekt på 800 W från DC-aggregaten. Mätningarna visade att en frekvens på 25 kHz gav högst ström, vilket också ligger nära den teoretiska resonansfrekvensen på 24 kHz, se figur 4.5. Vid resonansfrekvensen kunde en växelspanning på 57 V mätas i LC-tanken och en ström på 19.7 A kunde beräknas utifrån spänningen och reaktansen. Den genererade sinusvågen vid denna resonansfrekvens visas i figur 4.6.



Figur 4.5: Mätning av resonansfrekvens.



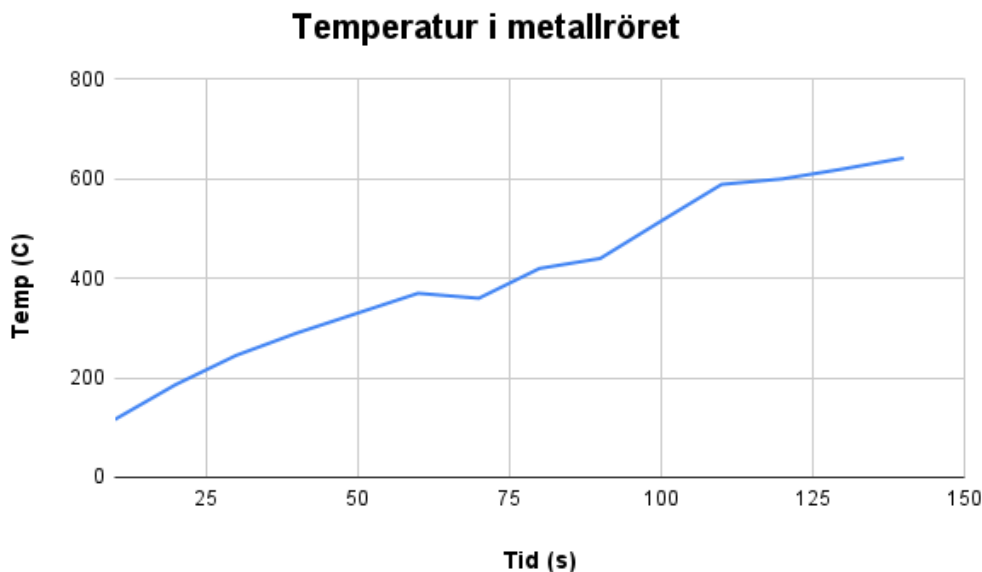
Figur 4.6: Växelspänningen i LC-tanken.

4.2 Funktionstester av systemet

Under arbetets gång gavs aldrig möjligheten att testa funktionen för de två delsystemen tillsammans på grund av ett fel som uppstod i växelriktaren i slutsteget av projektet. I testerna visade delsystemet för induktionsgrillen att en korv kunde tillagas på cirka en minut vid en effekt på 800 W. När det gäller det autonoma systemet, visade testet att en korv kunde serveras på ungefär 45 sekunder från det att en användare interagerade med gränssnittet tills korven plockades bort från korvhissen med hjälp av korvavtagaren. Testsekvensen inkluderade också en paus på 5 sekunder i induktionsgrillen som symboliserade tillagning av korven.

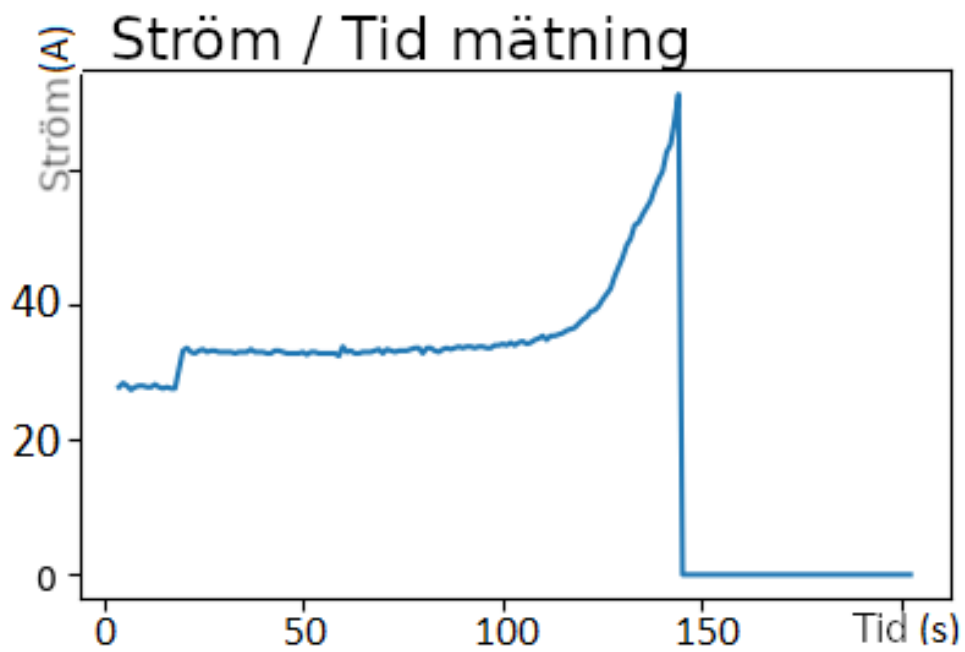
4.2.1 Högeffektstest

Ett test med en effekt på cirka ~ 2000 W genomfördes där temperaturen i metallröret mättes över tid och visas i figur 4.7 nedan. Det tog ca 2 minuter för metallröret att uppnå en temperatur på 650 °C. Värt att notera är att denna temperatur är den maximala temperaturen som den IR-temperaturmätare som användes vid testet kunde uppnå. Vilket innebär att röret kan ha uppnått en ännu högre temperatur.



Figur 4.7: Temperaturökning i metallröret mot tid vid en effekt på 2 kW.

Under testet observerades det att strömmen i LC-tanken började öka exponentiellt efter en viss tid, vilket resulterade i att strömkskyddet löste ut. Detta fenomen visas i figur 4.8. Vid den tiden var toppströmmen i LC-tanken ungefär 63 A och frekvensen hölls konstant.



Figur 4.8: Strömmätning i metallröret över tid vid konstant frekvens.

4.3 Resultat av det autonoma systemet

I detta avsnitt presenteras resultaten av konstruktionen och styrningen av det autonoma systemet.

4.3.1 Design och konstruktion

I tidigare avsnitt presenterades en lista med lämpliga förbättringsåtgärder som hade kunnat genomföras för att få designen på de ingående komponenterna mer stabila och precisa, se lista 3. De punkter som slutgiltigen åtgärdades var att tillverka baspelaren i rostfritt stål samt att montera på stödarmar till de båda robotarmarna.

Tillverkningen av baspelaren och tillhörande armar ställde högre krav på precision än tidigare tillverkning i PVC. Designen på tornet innebar också att en hög grad av precision i vinkelsättning inte kunde säkerställas vilket ledde till att ett flertal skruvhål blev förskjutna i sidled och därmed behövdes breddas ut för att möjliggöra montering. Även möjligheten att slipa ner deformationer kring öppningar och hål begränsades tack vare rörutformningen då det var svårt att använda lämpliga verktyg för att slipa ner dessa deformationer. Deformationerna i sig innebar att monteringen av puckarna försvarades då de tenderade att fastna på deformationerna i röret och därmed inte kunna flyttas till korrekt plats.

Men även i höjddled blev en del hål felplacerade och därmed så kunde två av puckarna ej bli monterade på önskat sätt. Men tack vare puckarnas utformning att passa i röret precis och att de framförallt är tänkta att motverka horisontell belastningar och inte vertikal belastningar så togs beslutet att inte åtgärda detta då systemet i sin helhet ändå tillåter önskad rörelse och stöd utan märkbar påverkan av felmonteringen. I slutändan så fick de genomförda åtgärderna effekt då baspelare och robotarmar blev mer styva och stabila än den tidigare konfigurationen med PVC-rör och enkla robotarmar.

4.3.2 Autonom styrning

Den autonoma styrningen fungerar enligt de specificerade kraven och begränsningarna som har satts upp för systemet. När användaren trycker på startknappen i användargränssnittet, initieras en sekvens av operationer som möjliggör korrekt hantering av korvarna.

Först förflyttas korvhissen från sin startposition till den första platsen i korvmagasinet. Därefter hämtar den upp en korv och förflyttar sig till arbetsstycket. Vid arbetsstycket sänks korven nedåt för att påbörja tillagningsprocessen. När den önskade temperaturen har uppnåtts, lyfts korvhissen uppåt igen och förflyttas till korvavtagaren och brödarmen för att kunna servera korven. Slutligen återgår korvhissen till sin startposition för att vara redo för nästa cykel.

För att uppnå en mer kontrollerad rörelse hos armen har specifika funktioner implementerats. Dessa funktioner möjliggör jämna rörelser utan oväntade ryckningar

4. Resultat

från servomotorerna. Genom att finjustera motorernas styrning och hastighet kunde armens rörelser optimeras för att säkerställa en mer effektiv hantering av korvarna.

5 Diskussion

I följande kapitel diskuteras arbetsgången för projektet och de resultat som arbete ledde fram till. Dessutom presenteras samhällsetiska och etiska perspektiv för den framtagna prototypen.

5.1 Utveckling av induktionsgrillen

Efter konstruktionen av induktionsgrillen kunde förbättringsområden identifieras. Nedan presenteras de väsentliga förbättringarna som skulle kunna effektivisera induktionsgrillen.

5.1.1 Spolen

Spolen som användes för detta projekt var gjord av ett kopparrör. Detta innebär att spolens ledare hade en väldigt låg tvärsnittsarea, vilket leder till en högre resistans enligt

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (5.1)$$

En högre inre resistans innebär en lägre ström enligt Ohms lag. Mycket av den potentiella strömmen och därmed effekten från nätaggregaten, förlorades som värme i spolen. En lägre ström leder till ett mindre magnetiskt flöde, och därmed även mindre utvecklad effekt i metallröret, vilket slutligen leder till mindre värme överförd till korven och en högre tillagningstid. Hade en solid kopparledare använts, med en högre tvärsnittsarea, hade potentiellt mindre effekt gått till värmeförlust, och en lägre tillagningstid hade kunnat uppnås.

Spolens prestanda är den främsta faktorn som påverkar Q-faktorn för LC-tanken, och en bättre spole skulle ha flera fördelar. Ett högre Q-värde skulle innebära ett effektivare system med mindre förluster och bättre kontroll över induktionen. En skarpare admittanskurva ger också bättre möjligheter att reglera effekten som utvecklas i järnröret, med tanke på att drivkretsarna i kretsen har en frekvensbegränsning på 50 kHz. Detta innebär att det finns en större påverkan på induktionen inom spannet från resonansfrekvensen på 24 kHz och upp till drivkretsarnas begränsning på 50 kHz.

För att säkerställa att spolen inte kommer i kontakt med röret under drift och orsakar kortslutning krävs en permanent isoleringslösning istället för den mica-duk som användes i detta projekt. En möjlig lösning är att gjuta in spolen i en form eller bygga fyra pelare runt spolen och fästa varje lindning för att förhindra att spolen drar ihop sig och rör sig under drift.

5.1.2 Test av induktionsgrill

Då testerna på 800 W inte gav en tillräckligt snabb tillagningstid så valdes det att öka effekten in i systemet med ambitionen att få en högre temperatur i grillen. Genom att implementera två extra nätaggregat för att öka spänningen i systemet kunde en effekt på 2000 W uppnås. Det bedömdes att ett grilltest vid den här effekten kunde

sänka tillagningstiden, men inga konkreta resultat hann att implementeras vid den här effekten.

Under testet så observerades däremot en upptäckt där strömmen exponentiellt ökade efter en viss tid. Den exakta orsaken till detta beteende har ännu inte kunnat förklaras. En möjlig förklaring är att induktansen i spolen och röret ändras med stigande temperatur, vilket leder till en ökad ström.

5.1.3 Eliminera störningar

Signalbehandlingen i kretsen påverkades av olika typer av störningar, särskilt Arduinon som genererade fyrkantsvågen. För att eliminera en del av dessa störningar och erhålla mer stabila signaler så skulle man behöva vidta några åtgärder. En viktig åtgärd är att separera strömkablar och signalkablar i kretsen för att undvika att magnetfält bildas runt signalerna. Förutom att separera kablar så skulle man också kunna minska avstånden mellan komponenterna. Genom att placera komponenter närmare varandra så kan man minska utrymmen där oönskade störningar kan uppstå. Detta minskar chansen för att externa elektromagnetiska fält och andra störningskällor påverkar signalerna negativt.

En annan viktig åtgärd skulle vara att separera Arduinon från kretskortet. Eftersom störningar från de högfrekventa delarna i kretsen påverkade Arduinons PWM-puls och ledde till stora spänningsrippel. Genom att montera Arduinon bättre så skulle man kunna minska störningarna och därmed förbättra kvaliteten på de genererade pulserna.

5.2 Utveckling av det autonoma systemet

Genom att nyttja rostfritt stål som material till baspelaren och att montera på stödarmar så har stabiliteten i systemet ökad avsevärt. Det har i sin tur medfört en högre precision vid nyttjande av systemet då korvhissen lättare och mer konsekvent träffar rätt på korven.

Dock så finns det fortfarande en del glapp och precisionsfel som kan kopplas till att systemet i hög grad består av egentillverkade komponenter vilket innebär en större sannolikhet för precisionfel vid tillverkning och montering. Inget av glappen och felen har en väsentligt stor påverkan på systemets funktion i sin helhet men har försvårat vid montering och inneburit att vissa avvikelser från de initiala ritningarna har behövt göras. Även de fel som inte åtgärdades från förra årets prototyp påverkar fortfarande funktionen negativt, men de är nu mer försumbara eftersom den huvudsakliga orsaken till instabiliteten har åtgärdats.

Sammanfattningsvis så kan man säga att systemet numera är mer stabilt och har högre precision. Dock så skulle vidare utveckling behövas för att åtgärda de sista glappen och precisionfelen som finns. Några exempel på detta skulle kunna vara att införskaffa mer passande servomotorer som har en kraftigare axel och som skulle passa bättre in i rörets hålrum. Detta då en källa till glapp och instabilitet är punkten

där servomotorn kopplar till stödpucken, vilket kan ses i figur 5.1. Det skulle även kunna åtgärdas genom att införskaffa servomotorer som är mer lämpligt utformade efter baspelarens dimensioner.



Figur 5.1: Koppling mellan puck och servomotor

Den största frågan gäller dock att ens använda sig av en rördesign för baspelaren överhuvudtaget. Många av de precisionsfel som den nuvarande designen har kan härledas till att de svårigheter som följer av att jobba med cirkulära objekt och samtidigt uppnå en hög grad av precision, speciellt när enbart enklare maskiner och verktyg nyttjas. Det har även försvårat monteringen då de massiva delarna av röret har varit i vägen och medfört att pucksystemet behövt monteras på ett icke intuitivt sätt. Därav så hade det troligtvis varit bättre att inte använda ett rör överhuvudtaget och istället satsa på en mer lätthanterlig design. Förutsatt att man fortfarande vill behålla övriga delsystem och helhetssystemet med en cirkulär rörelse.

Under testerna med induktionsgrillen så observerades det att temperaturer ovanför induktionsgrillens övre öppning nådde temperaturer uppemot 200-300 °C. De delar av korvhissen som är närmast induktionsgrillen är tillverkade i plastsorterna ABS och PC. Från databasen i programvaran Granta Edupack kan man se att PC och ABS har rekommenderade arbetstemperaturer på 101-116 °C för PC och (62.9-76.9) °C för ABS. Vilket gör att båda plastsorterna är olämpliga att använda i kring induktionsgrillens övre öppning. För att kringgå problemet tillverkades en tillfällig värmesköld i form av en plåtbit med ett antal fastsatta mica-dukar. För att lösa problemet mer permanent skulle antingen en bättre värmesköld behöva tillverkas eller så skulle man behöva designa om hela korvhissen från grunden med material som är mer värmeresistant. Det skulle förmodligen innebära att korvhissen behöver genomgå en betydande designförändring. Detta eftersom den nuvarande designen är anpassad för tillverkning med 3D-skrivning vilket nödvändigtvis inte innebär att det går att återskapa med andra material på grund av att andra tillverkningsmetoder inte kan uppnå den grad av komplexitet i design som 3D-skrivning kan uppnå.

Under arbetets gång togs även beslutet att inte försöka integrera de sässtationer

som tidigare års arbete tillverkat. Det valdes också att inte heller försöka utveckla något nytt system. Därav sattes det som en avgränsning för projektet istället. Beslutet om att sätta det som en avgränsning togs då det inte fanns tid att göra de önskade åtgärder som krävdes för att få funktionsdugliga såsstationer samt att försöka integrera dem i systemet

5.2.1 Optimering av tillagningsprocessen

Eftersom projektets fokus låg på att konstruera en fungerande prototyp, genomfördes ingen undersökning eller tester för att optimera själva tillagningsprocessen för korven. För att optimera systemet skulle det krävas en serie tester för att identifiera optimala grilltemperaturer, placering i röret för bästa grillning och korvens tillagningstid.

5.3 Samhällsetiska och etiska perspektiv

Nedan presenteras de samhällsetiska och etiska konsekvenser som projektet behandlar. Även om projektet i sig inte har betydande samhällspåverkan, presenteras de potentiella effekterna av en bredare användning av en autonom induktionsgrill.

5.3.1 Matsvinn

I samband med hög efterfrågan på snabbhet vid servering av korv så sker ofta tillagningen i bulk där fler korvar än vad som faktiskt efterfrågas tillagas och värmeålls i syfte till att snabbt kunna servera kunder. Det här leder till onödigt matsvinn, då till exempel korvar som har legat för länge måste kastas bort. Ett system som istället kan tillaga korv snabbt på beställning har potentialen att minska det matsvinn som finns inom restaurangbranschen idag, vilket motsvarar cirka 65 000 kg ätbar mat [1].

5.3.2 Samhällsnytta med systemet

I dagens samhälle är det fortfarande främst människor som utför arbetet med att förbereda, tillaga och servera mat i restauranger. Det är ännu inte normen att låta helautomatiserade system sköta dessa arbeten. Utvecklingen av sådana system kan potentiellt hota olika yrkesroller inom restaurangbranschen i en sådan utsträckning att vissa av dessa roller inte längre skulle vara nödvändiga. Men det kan även öppna upp möjligheter för nya arbetsroller inom service och underhåll.

Det går även att diskutera den här utvecklingen mot automatiserade system och vilken påverkan den skulle kunna ha på samhället, särskilt ur ett psykosocialt perspektiv. Eftersom dessa system eliminerar behovet av mänsklig interaktion kan det medföra flera negativa konsekvenser för människors mentala hälsa. Till exempel kan det potentiellt innebära att individer som redan känner sig isolerade eller ensamma blir ännu mer avskärmade från sociala interaktioner. Automatiseringen kan också leda till en minskad känsla av mening och syfte i arbete och livet i allmänhet, eftersom människor kan känna sig ersatta av tekniska system.

6 Slutsats

Under detta arbete har förbättringarna av en automatiserad induktionsgrill resulterat i att en korv kan grillas på kortare tid än tidigare. Åtgärder på det autonoma systemet i form av en baspelare i stål, stöd till robotarmarna samt förbättringar i styrkoden har inneburit att systemet kan flytta en korv från korvmagasinet till induktionstgrillen mer precist och stabilt än tidigare. Genom att öka strömtillförseln till induktionsgrillen har effekten ökat, vilket har resulterat i ett varmare metallrör och snabbare tillagningstid.

Det finns dock fortfarande utrymme för förbättringar i konstruktionen. Genom att använda en spole med lägre resistivitet skulle förlusterna kunna minskas och verkningsgraden för induktionsgrillen ökas. Den höga inre resistansen har också resulterat i en lägre kvalitetsfaktor, Q , vilket bör förbättras i framtida konstruktioner. Dessutom skulle en separat signalanslutning från de högre strömmarna runt LC-tanken förbättra prestandan genom att minska störningar som påverkar signalerna. Vid en effekt på 2000 W finns det potential att kunna grilla en korv på kort tid men det hade behövt genomföras flera tester för att verifiera detta.

Sammanfattningsvis så har arbetet visat att den nuvarande designen har god potential att fungera helt autonomt och grilla en korv på kort tid. Men vidare testning och optimering hade behövts för att påvisa detta.

Referenser

- [1] *Livsmedelsavfall i Sverige*, sv. URL: <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/avfall/avfall-mat/> (hämtad 2023-03-07).
- [2] H. Ritchie, *Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions*, nov. 2019. URL: <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions> (hämtad 2023-04-24).
- [3] H. Skoog, R. Örtenfelt, A. Kjellberg, E. Olsson, O. Mark och E. Levin, "Autonom induktionsberedning av french hot dog," swe, 2022. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/304625> (hämtad 2023-01-31).
- [4] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, eng, second edition, ser. World student series edition. Edinburgh: Pearson, 2014, ISBN: 9781292026565.
- [5] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede och J. M. Burdio, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, årg. 61, nr 5, s. 2509–2520, maj 2014, ISSN: 0278-0046, 1557-9948. DOI: 10.1109/TIE.2013.2281162. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6595059/> (hämtad 2023-02-17).
- [6] S. Zinn och S. L. Semiatin, *Elements of induction heating: design, control, and applications*, eng. Metals Park, Ohio: ASM International, 1988, OCLC: 608121833, ISBN: 9781615031986.
- [7] R. Lundin, "A handbook formula for the inductance of a single-layer circular coil," English, *Proceedings of the IEEE*, årg. 73, nr 9, s. 1428–9, 1985, ISSN: 0018-9219.
- [8] H. Wheeler, "Formulas for the Skin Effect," *Proceedings of the IRE*, årg. 30, nr 9, s. 412–424, 1942. DOI: 10.1109/JRPROC.1942.232015.
- [9] V. Rudnev, D. Loveless och R. Cook, *Handbook of Induction Heating*, second edition. CRC Press, 2017, s. 53–63, ISBN: 9781138748743.
- [10] *Transistor | Definition & Uses | Britannica*, en. URL: <https://www.britannica.com/technology/transistor> (hämtad 2023-02-25).
- [11] NEAMEN, *ISE SEMICONDUCTOR PHYSICS AND DEVICES*, eng. S.l.: MCGRAW-HILL EDUCATION, 2011, OCLC: 1273670353, ISBN: 9781266064012.
- [12] R. G. Powell, *Introduction to electric circuits*, 1. utg. Arnold, 1995, s. 123–133, ISBN: 0340631988.
- [13] B. Karlström, *Kretsanalys*, Tredje upplagan. Studentlitteratur AB, 2022, s. 309–326, ISBN: 9789144166001.
- [14] *Metallized Polypropylene Film EMI Suppression Capacitors PHE845, Class X1, 760 VAC, 105°C*, Kemet Corporation. URL: https://content.kemet.com/datasheets/KEM_F3109_PHE845_X1_760.pdf.
- [15] M. H. Rashid och J. R. Espinoza, "15 Inverters," i *Power Electronics Handbook Devices, circuits, and applications*. Elsevier/BH, 2011, s. 359–364, ISBN: 978-0-12-382036-5.

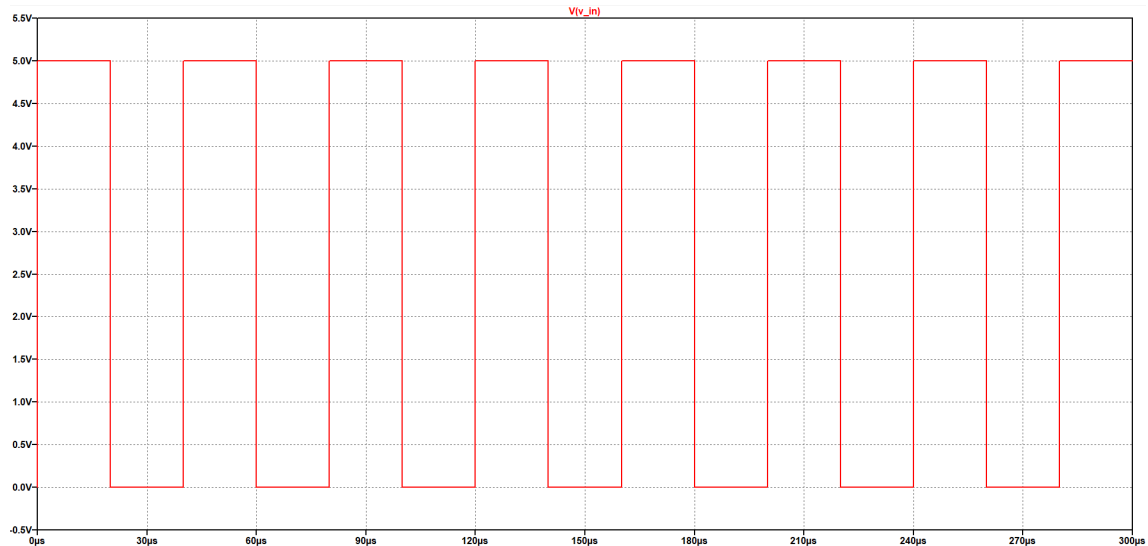
- [16] X. Lu och F. Z. Peng, "Minimizing DC capacitor current ripple and DC capacitance requirement of the HEV converter/inverter systems," i *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009, s. 1191–1198. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316270.
- [17] A. D. Pathak, "MOSFET/IGBT drivers theory and applications," *Application Note AN002*, 2001.
- [18] L. Balogh, "Fundamentals of MOSFET and IGBT gate driver circuits," *Texas Instruments–Application report, SLUA618-March*, s. 28–33, 2017.
- [19] D. O. J. DeSá, *Instrumentation fundamentals for process control*, eng. New York: Taylor & Francis, 2001, OCLC: 1260363908, ISBN: 9781351438070.
- [20] O. Aluf, *Optoisolation circuits: nonlinear applications in engineering ; optoisolation nonlinear dynamic and chaos, application in engineering*. Singapore ; Hackensack, N.J: World Scientific, 2012, OCLC: ocn773431634, ISBN: 9789814317009.
- [21] M. L. Skow, *Mica A Materials Survey*. Washington: U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1962.
- [22] *MSS08/013 - MICA*, RS PRO. URL: <https://docs.rs-online.com/193a/A700000008919963.pdf>.
- [23] T. Ye, "Precision Full-Wave Rectifier, Dual-Supply," *Texas Instruments. Dez*, 2013. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/tidu030>.
- [24] M. Rossi, N. Toscani, M. Mauri och F. C. Dezza, *Introduction to microcontroller programming for power electronics control applications: coding with MATLAB and Simulink*, eng, First edition. Boca Raton: CRC Press, 2022, OCLC: 1273728795, ISBN: 9781003196938.
- [25] D. G. Alciatore, *Introduction to mechatronics and measurement systems*, eng, Fifth edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2019, OCLC: 1007509660, ISBN: 9781259892349.
- [26] M. Dahl, E. Erős, K. Bengtsson, M. Fabian och P. Falkman, "Sequence Planner: A Framework for Control of Intelligent Automation Systems," *Applied Sciences*, årg. 12, nr 11, 2022, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12115433. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/11/5433>.
- [27] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incopera och D. P. DeWitt, *Incopera's Principle of heat and mass transfer*, 8. utg. Wiley, 2017, ISBN: 9781119382911.
- [28] I. A. Ekroth och E. Granryd, *Tillämpad termodynamik*, 4. utg. studentlitteratur, 2006, kap. 11, ISBN: 978-91-44-03980-0.
- [29] V. Lakshminarayanan och N. Sriraam, "The effect of temperature on the reliability of electronic components," i *2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, 2014, s. 1–6. DOI: 10.1109/CONECCT.2014.6740182. (hämtad 2023-02-25).
- [30] A. Zaharia, *Passive cooling vs. active cooling – what's the difference?* Juni 2021. URL: <https://www.simscale.com/blog/active-and-passive-cooling/> (hämtad 2023-02-25).

- [31] J. Jose, A. Ravindran och K. K. Nair, "Study of temperature dependency on MOSFET parameter using MATLAB," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, årg. 3, nr 07, 2016.
- [32] R. Semiconductor, *Junction temperature calculating transistor chip temperature*. URL: <https://www.rohm.com/electronics-basics/transistors/calculating-transistor-temperature>.
- [33] *N-Channel MOSFET, 290 A, 100 V, 3-Pin TO-247AC Infineon IRFP4468PBF*, Infineon. URL: <https://docs.rs-online.com/5caa/0900766b8154410b.pdf>.
- [34] *ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*, Rev. 7810D-AVR-01/15, Atmel, 2015. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.

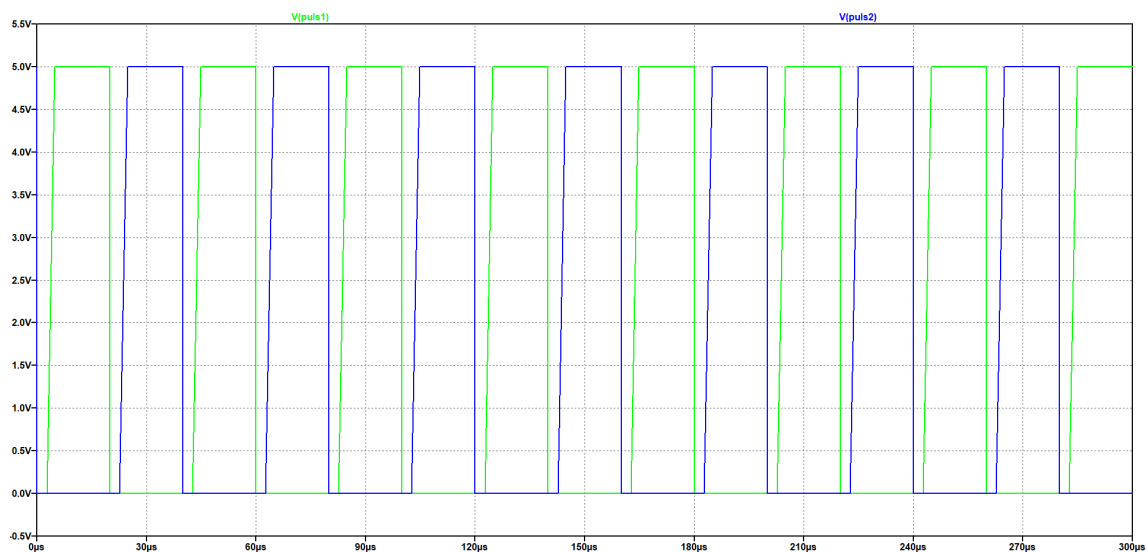
A Simuleringar

Nedan visas resultaten från simuleringarna i LTspice.

A.1 Fördröjningskrets

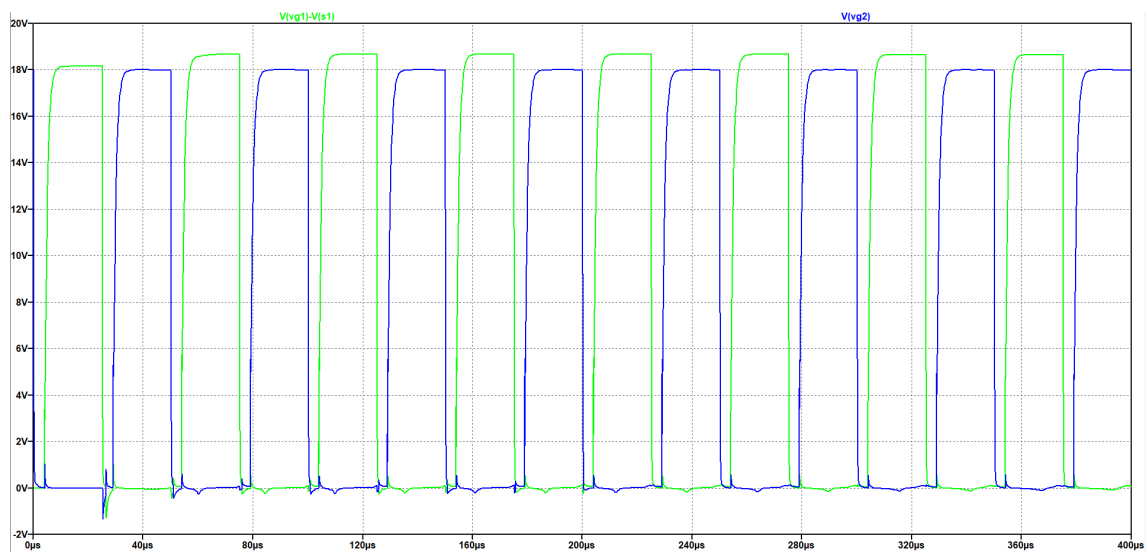


Figur A.1: PWM puls med en duty cycle på 50 % som matas in till fördröjningskretsen.

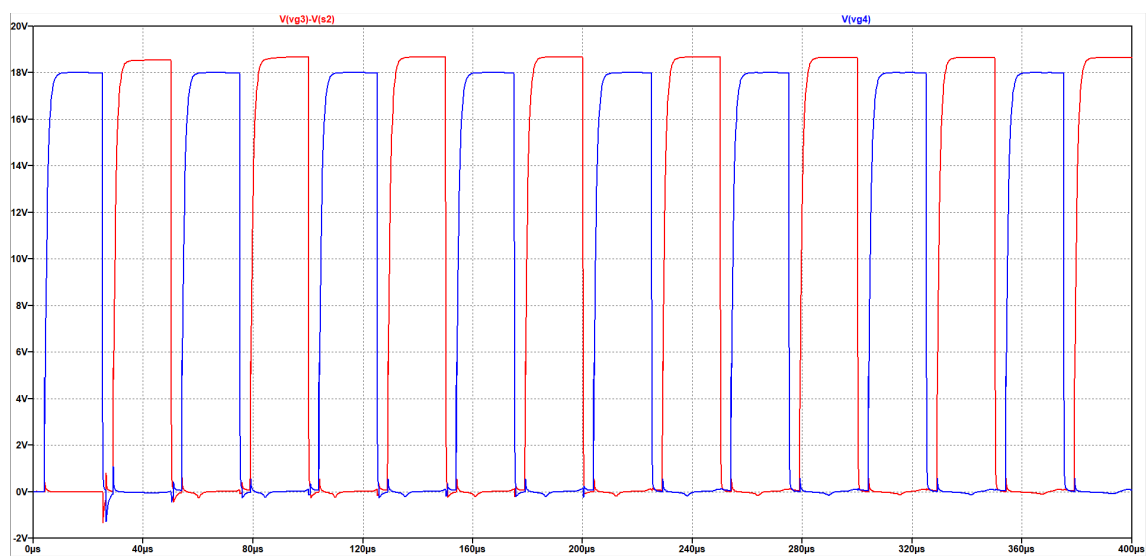


Figur A.2: De två utgående pulserna från fördröjningskretsen med en dödtid på 4 μs .

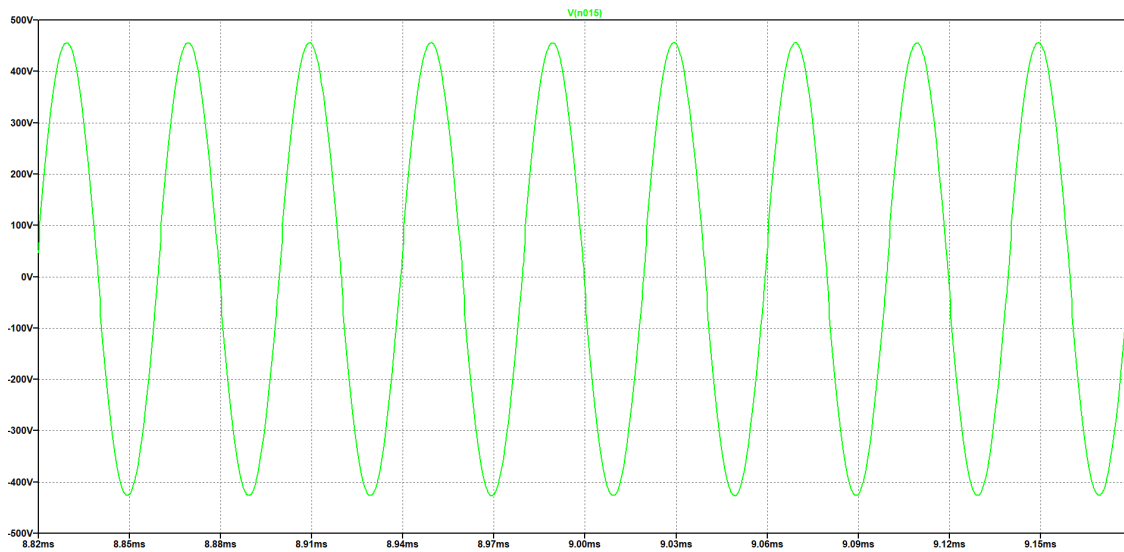
A.2 Växelriktare



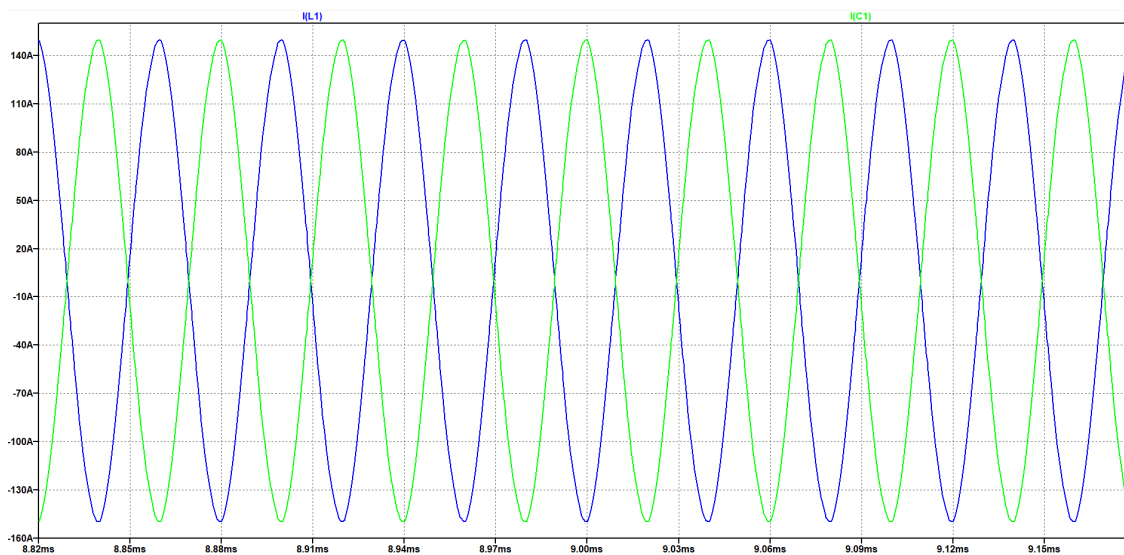
Figur A.3: De två insignalerna till transistorerna (Grön för *high side switch* VG1 och blå för *low side switch* VG2).



Figur A.4: De två insignalerna till transistorerna på andra sidan av växelriktaren (Blå för *high side switch* VG3 och röd för *low side switch* VG4).

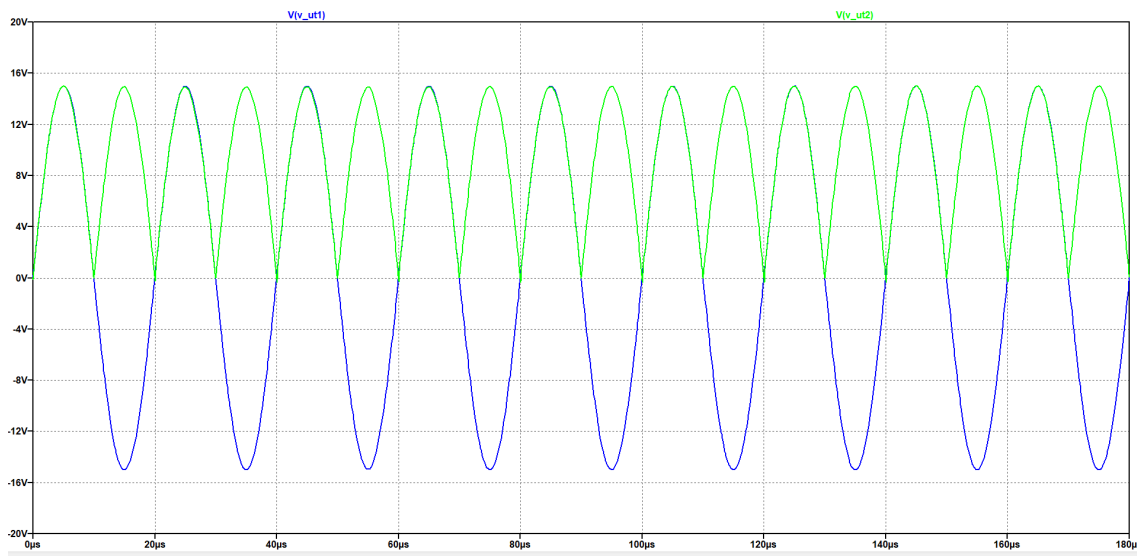


Figur A.5: Spänningen över kondensatorn och spolen i växelriktaren nära resonansfrekvensen.

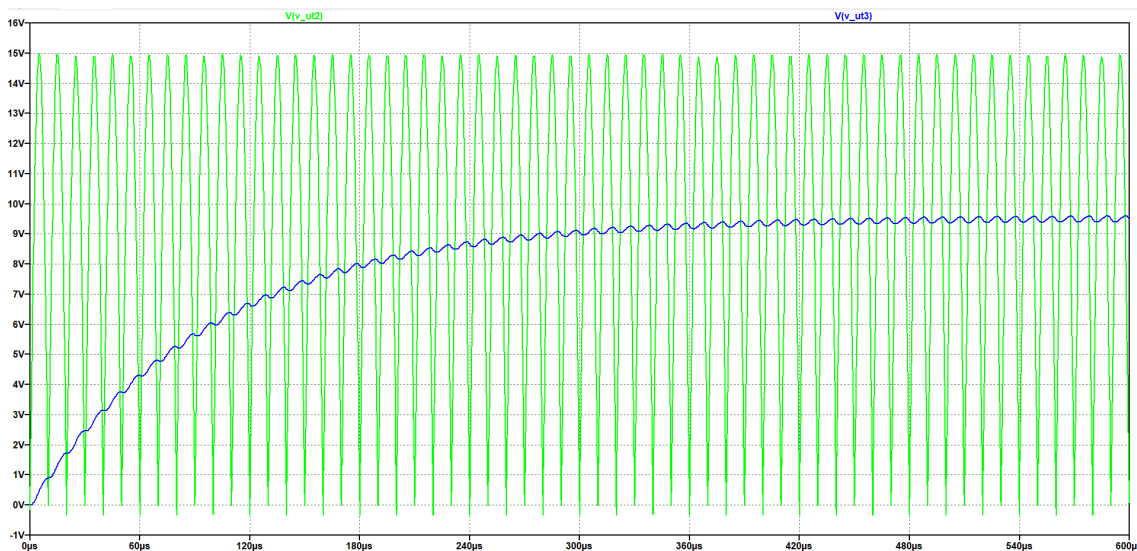


Figur A.6: Strömmen genom spolen och kondensatorn i växelriktaren nära resonansfrekvensen.

A.3 Strömmätare

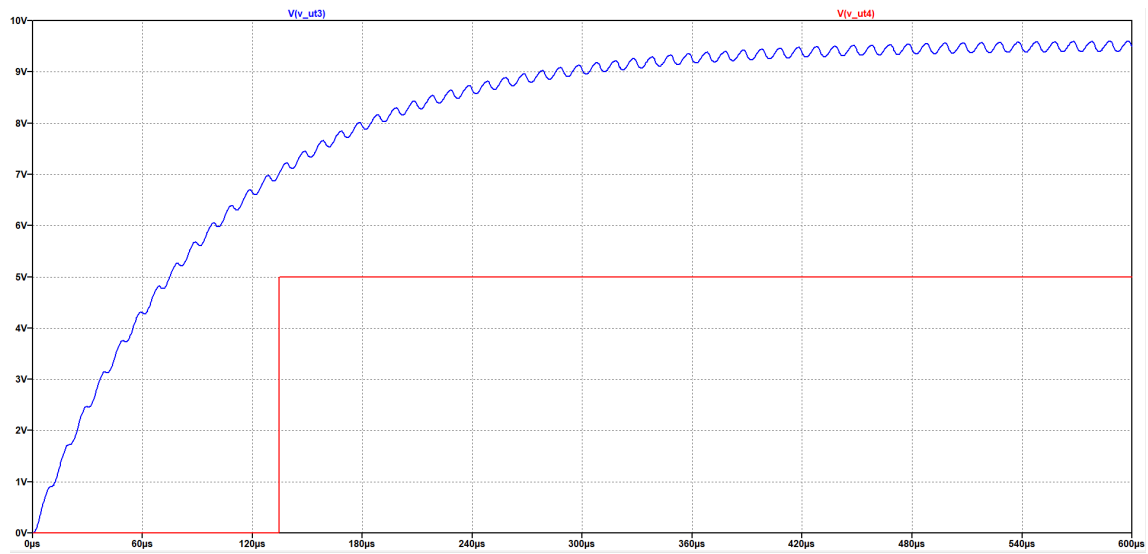


Figur A.7: Strömmätarens utsignal V_{UT1} och den likriktade signalen från strömmätaren V_{UT2} .



Figur A.8: Den likriktade utsignalen från strömmätaren V_{UT2} och utsignalen från *average detectorn* V_{UT3} .

A.4 Överströmsskydd

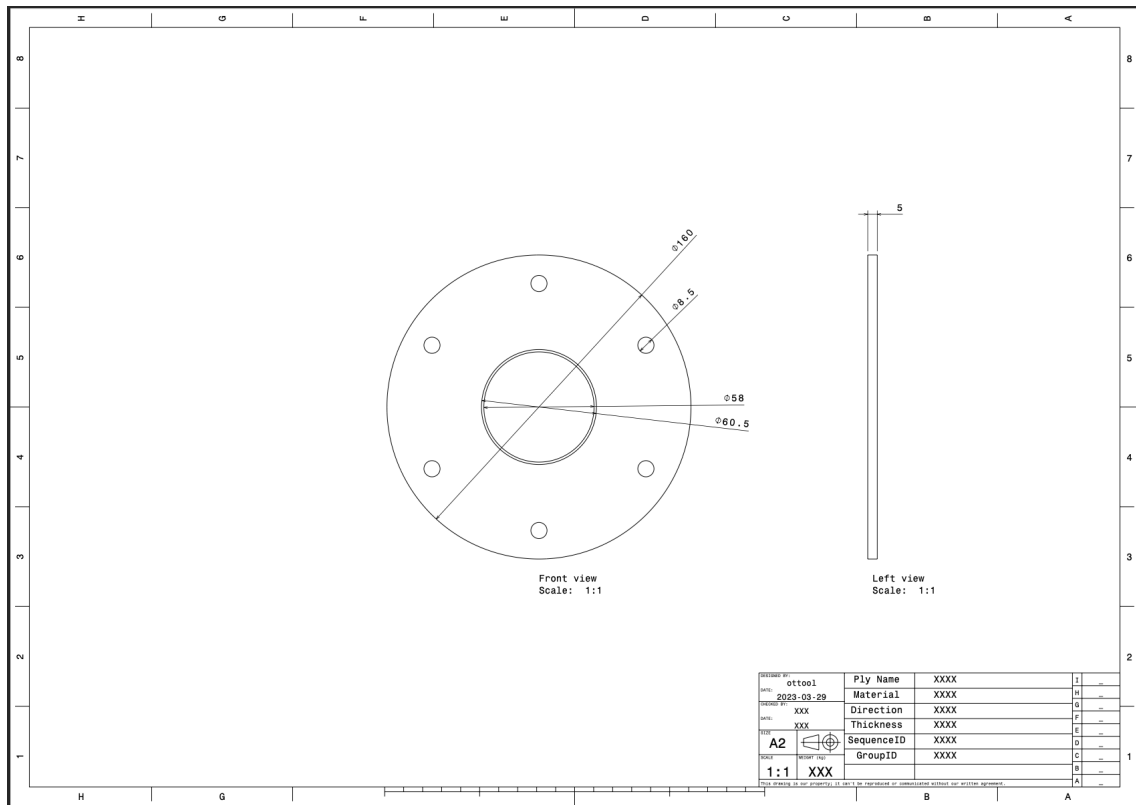


Figur A.9: Utsignalen från *average detectorn* V_{UT3} och utsignalen från *comparatorn* V_{UT4} .

B Ritningar

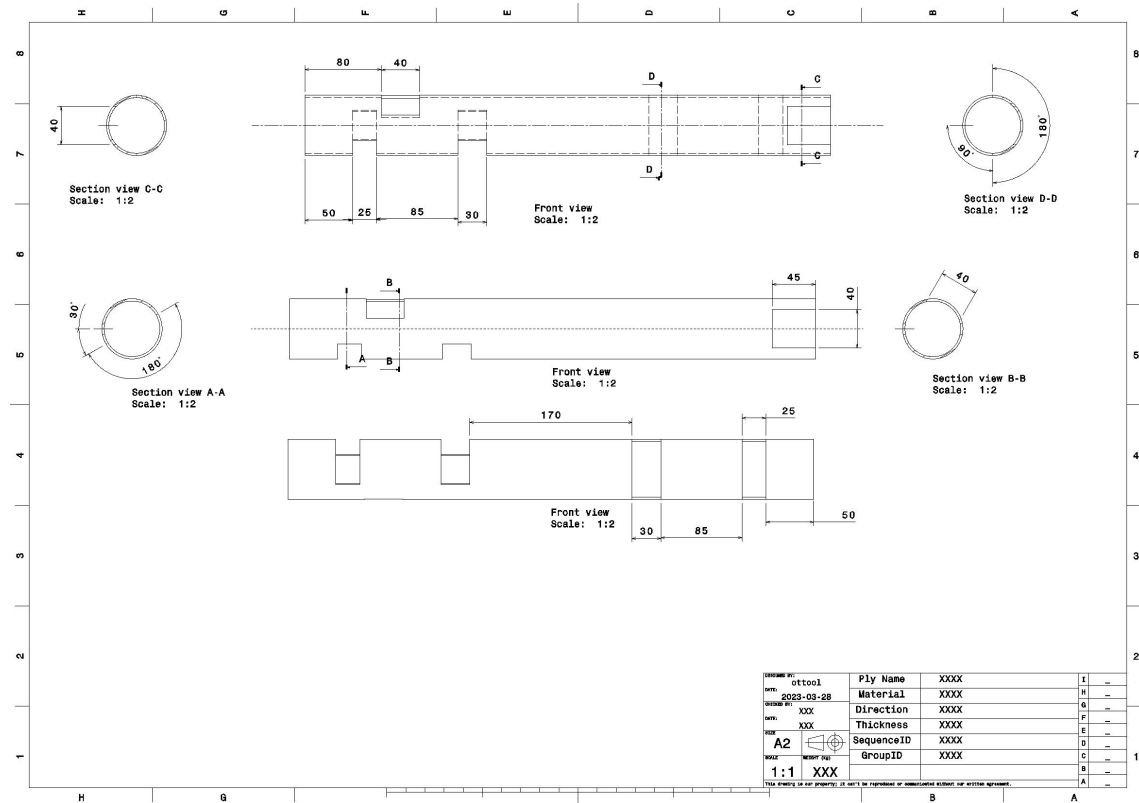
Nedan visas ritningarna för det autonoma systemet samt kretsschemat för induktionsgrillen.

B.1 Fläns



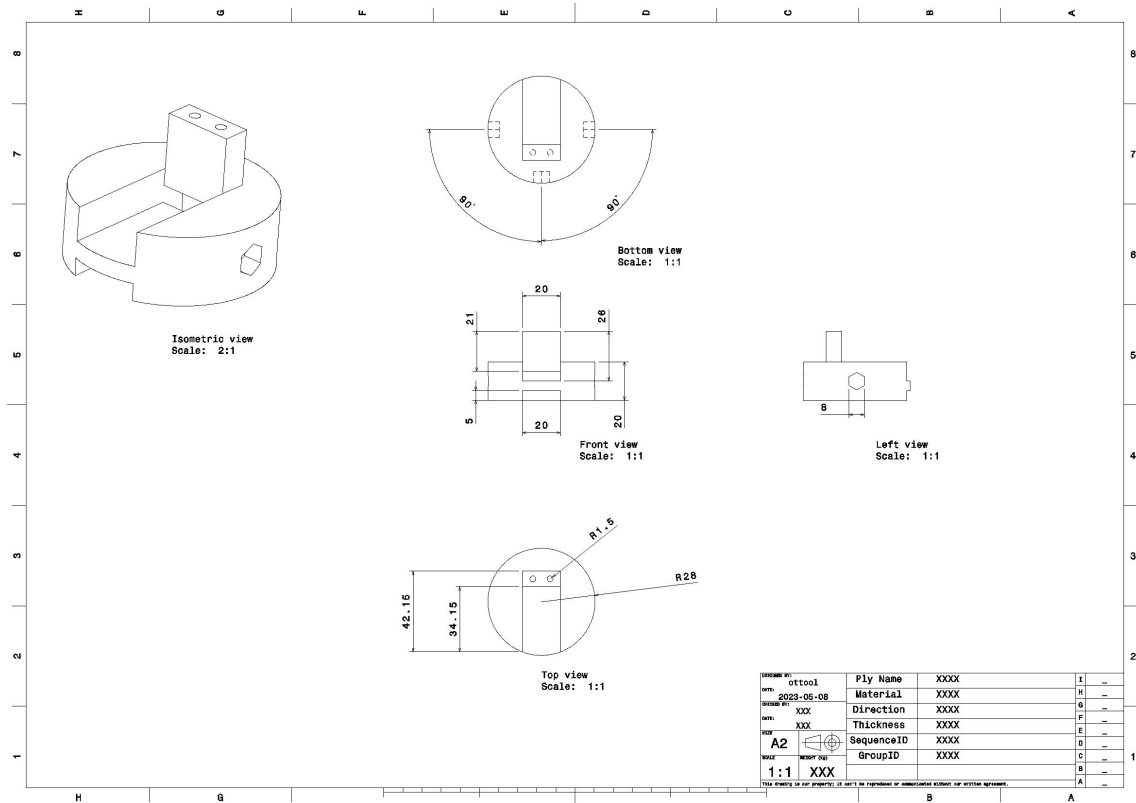
Figur B.1: Riting på flänsen

B.2 Baspelare



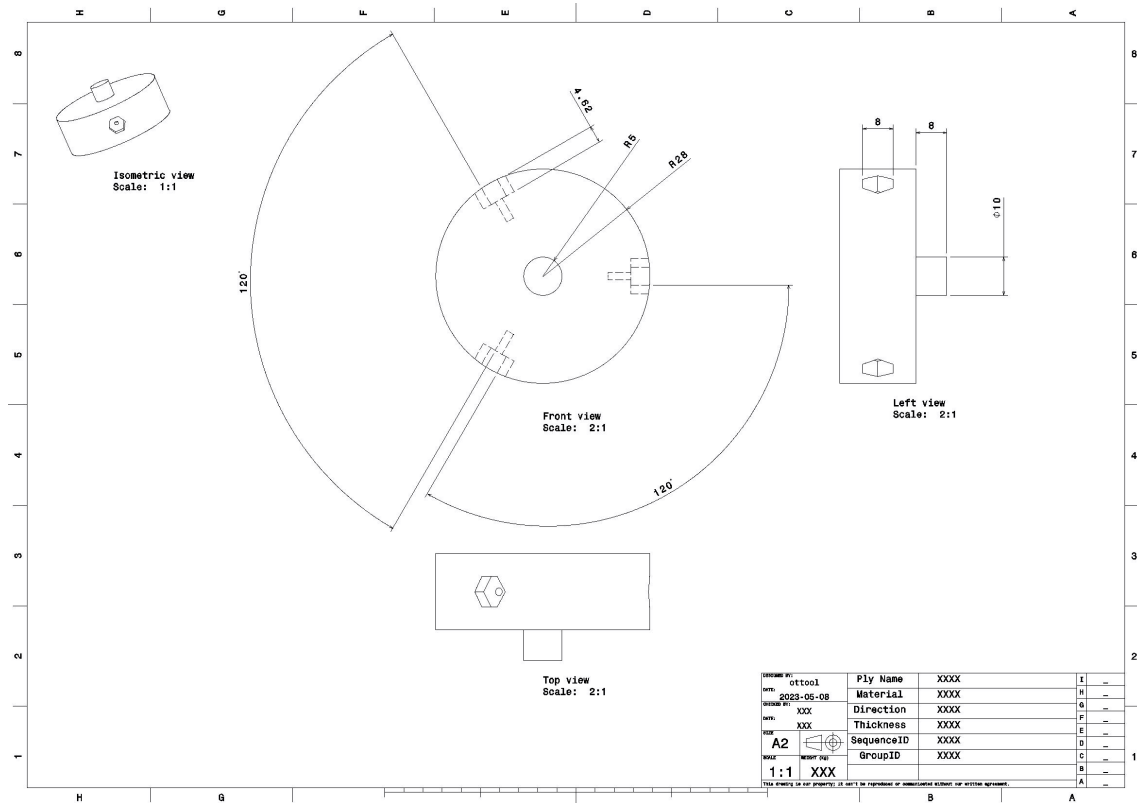
Figur B.2: Baspelaren

B.3 Servopuck



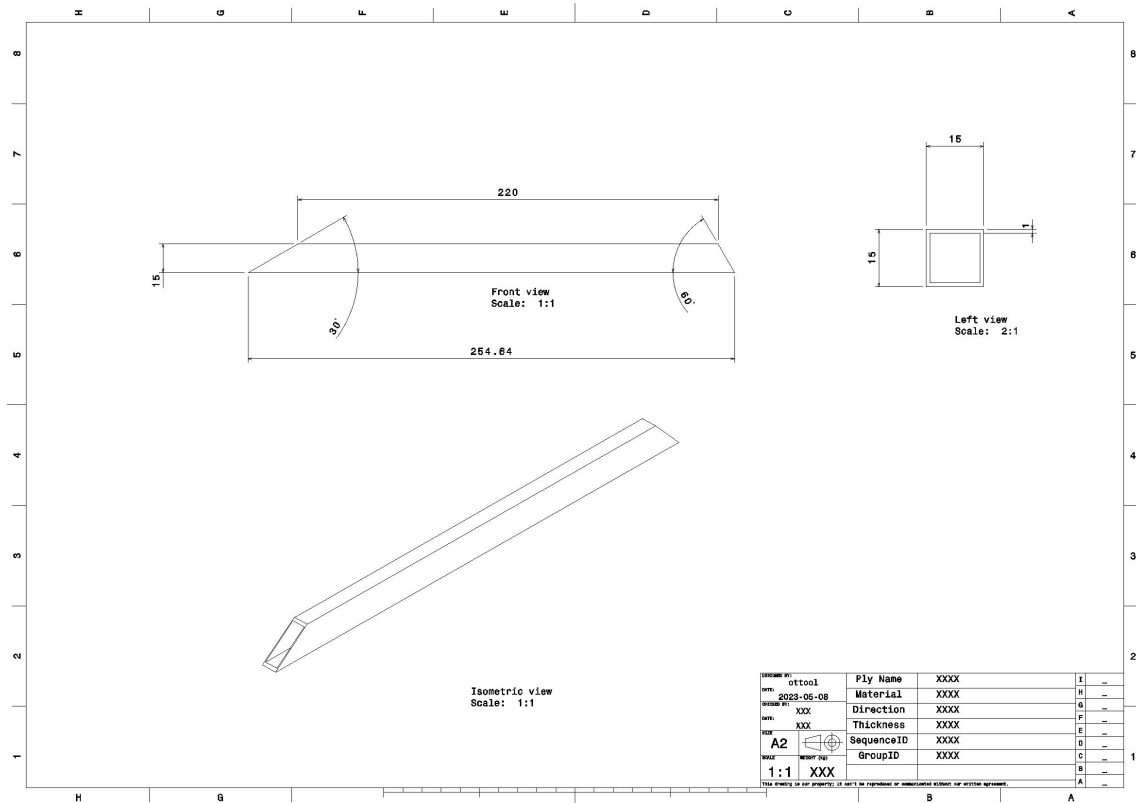
Figur B.3: Servopuck

B.4 Stödpuck



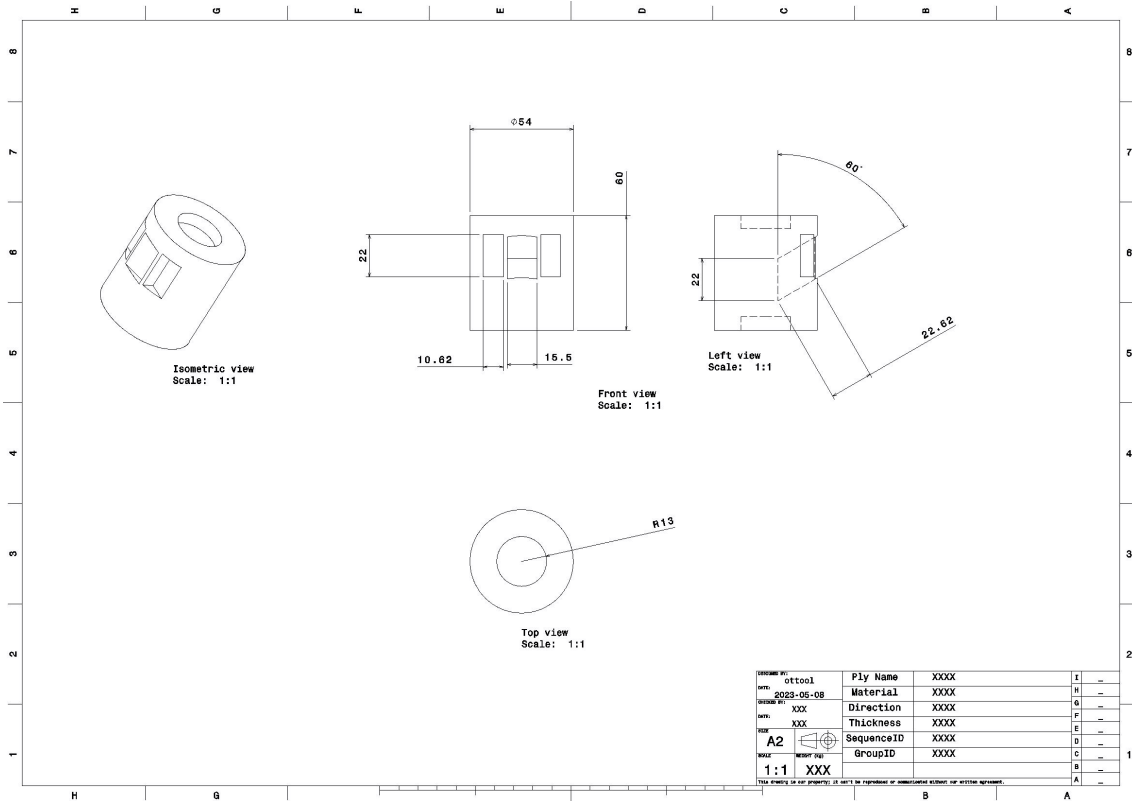
Figur B.4: Stödpuck

B.5 Stödarm



Figur B.5: Stödarm

B.6 Vinkelpuck



Figur B.6: Vinkelpuck

C Komponentlista

Comment	Description	Designator	Qty
100 nF	Capacitor Polarised	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8	8
0.1 nF	Capacitor	C9, C11, C12, C13, C16, C18, C20, C23, C24, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C39, C42, C44, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51	31
10nF	Capacitor	C10, C14, C17, C21	4
470 nF	Capacitor	C15, C19	2
47 pF	Capacitor	C22, C41	2
1 nF	Capacitor	C25, C43	2
4.7 nF	Capacitor	C38, C40	2
0.22u	Capacitor	C52, C53, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61	10
UF4007-E3/54	Generic Diode	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	10
PADS_01	Pads cable connect	GND1, KOND1, KOND1_1, KOND2, KOND2_2, OUTPUT1, OUTPUT2, SUPPLY1	8
LM333P	Integrated Circuit	IC1, IC18	2
TLP350_F_	Integrated Circuit	IC2, IC3, IC4, IC5	4
LA_100-P	Current Sensor	IC6	1
TL082IP	Integrated Circuit	IC7, IC8, IC9, IC10	4
SN74HC02N	Integrated Circuit	IC11	1
SN74HC32N	Integrated Circuit	IC12	4
SN74HC08N	Integrated Circuit	IC13, IC14, IC16, IC19	4
SN74HCT04N	Integrated Circuit	IC15, IC17, IC20	3
angled	Connector	J1, J2, J5, J6, J7, J10	6
straight	Connector	J3, J4, J8, J9, J11, J12, J14, J15, J16	9
PLUS	Connector	J13	1
150141RS73113	LED	LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED10, LED11, LED12, LED13, LED14, LED15, LED16, LED17	17
5.1k	Resistor	R1, R35, R40	3
330	Resistor	R2, R10, R14, R22, R26	5
10	Resistor	R3, R4, R11, R12, R15, R17, R23, R24	8
6.8k	Resistor	R5, R18, R53, R54	4
33k	Resistor	R6, R16	2
3.3k	Resistor	R7, R13, R19, R25, R41, R43, R44, R48, R49, R51, R52, R55, R56	13
10k	Resistor	R8, R9, R20, R21, R31, R33, R34, R38, R39, R42, R45, R46, R47, R50	14
1k	Resistor	R27, R28, R30, R36, R37	5
100	Resistor	R29, R32	2
PTS645SM43-2_LFS	Switch	S1	1
IRFP4468PBF	MOSFET (N-Channel)	T1, T2, T3, T4	4
1729128	Connector	T1, T2, T3, T4, T5, T6	6
91A1A-B28-A10L	Variable Resistor	VR1, VR2, VR3	3

DEPARTMENT OF SOME SUBJECT OR TECHNOLOGY
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Gothenburg, Sweden
www.chalmers.se



CHALMERS