



CHALMERS



# Autonom induktionsberedning av french hot dog

Kandidatarbete vid elektroteknik, avdelningen för Elkraftteknik

ALBIN KJELLBERG  
ERIK LEVIN  
OSCAR MARK  
ERIK OLSSON  
HANNES SKOOG  
ROBIN ÖRTENFELT

**KANDIDATARBETE VID ELEKTROTEKNIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



KANDIDATARBETE 2022

**Autonom induktionsberedning  
av french hot dog**

ALBIN KJELLBERG  
ERIK LEVIN  
OSCAR MARK  
ERIK OLSSON  
HANNES SKOOG  
ROBIN ÖRTENFELT



**CHALMERS**

Institutionen för Elektroteknik  
*Avdelningen för Elkraftteknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2022

Autonom induktionsberedning av french hot dog

ALBIN KJELLBERG

ERIK LEVIN

OSCAR MARK

ERIK OLSSON

HANNES SKOOG

ROBIN ÖRTENFELT

© ALBIN KJELLBERG, ERIK LEVIN, OSCAR MARK, ERIK OLSSON, HANNES SKOOG, ROBIN ÖRTENFELT, 2022.

Handledare: Robert Karlsson, Avdelningen för Elkraftteknik

Examinator: Jimmy Ehnberg, Avdelningen för Elkraftteknik

Kandidatarbete EENX15-22-29

Institutionen för Elektroteknik

Avdelningen för Elkraftteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Bild: Visuell representation av slutresultat.

Typsättning i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

## Förord

Vi vill börja med att uttrycka vår uppskattning till vår handledare Robert Karlsson, som med sin utförliga praktiska och teoretiska kunskaper har stöttat och hjälpt oss genom hela arbetet.

Vidare vill vi tacka våra sponsorer Härryda Karlsson, Peas of Heaven och Korvbrödsbagarn som tillförsatt gruppen med korv respektive bröd för testning och experiment under arbetets gång.

Slutligen vill vi tacka Hampus Blom, Philip Pettersson och Delta21 för deras väl tilltagna bidrag i form av delar och stöd som bidragit till att kunna utveckla arbetet utan förseningar och komponentbrist.

---

## Sammanfattning

Arbetet som utförts vid institutionen Elektroteknik har haft som syfte att konstruera en maskin där målet var att på kortast tid möjligt tillaga en korv. Detta genom att föra ner den i ett upphettat metallrör som värmts upp med hjälp av induktion. Maskinen ska även autonomt hantera förflyttningen av korv och bröd med hänsyn till användarens val av korvtyp och dressing. Inledningsvis i arbetet genomgicks en produktutvecklingsprocess där ett koncept valdes för vidareutveckling. Därefter innefattade arbetsprocessen bland annat teoretiska kalkyler främst inom induktionsområdet med fokus på effektförluster och optimering. Med beräkningarna som grund utfördes CAD-modellering, mätning, kretskortsdesign, konstruktion, programmering och kontinuerlig testning.

Resultatet blev en prototyp där förflyttningen fungerar autonomt och korrekt följer användarens inmatning via ett gränssnitt. Maskinen kan laddas med 15 korvar och tillåter val mellan två olika korvtyper samt två olika dressingar. Ett fungerande induktionselement har konstruerats som har värmt upp ett metallrör med 45 W. Däremot har ett problem med att spolen drar ihop sig vid start och därmed orsakar kortslutning har det försvårat fullständig testning på den delen av systemet med full effekt.

---

## Abstract

The purpose of the project which has been carried out at the institution of Electrical engineering was to develop a machine which heats a hot dog in the shortest possible time by lowering it into a induction heated metal pipe. The machine also autonomously transports the hot dogs and buns with regards to the users choices of hot dog type and dressing. The initial stage of the project involved a product development process where one concept was chosen for further development. Thereafter the working process included theoretical calculations mainly in the field of induction with focus on efficiency and optimization. With the calculations as guidelines CAD-modelling, measuring, circuitry design, construction, programming and continuous testing was performed.

The result was a prototype with functioning autonomous transportation correctly responding to the user's input via an interface. The machine can be loaded with 15 hot dogs and the user can choose from two different types of hot dogs and two different dressings. An induction element has been constructed which has heated the metal pipe with 45 W. However a problem with the coil pulling itself together during start and causing a shorting has complicated complete testing of that area of the system with full power.

Keywords: Autonom, Automation, Induktionsvärmning, Servostyrning, Mikrodator, Produktutveckling, Kandidatarbete





# Innehåll

Ordlista	x
Nomenklatur	xii
<b>1</b> Introduktion	<b>1</b>
1.1 Syfte . . . . .	1
1.2 Problemformulering . . . . .	1
1.3 System . . . . .	2
1.4 Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b> Teori	<b>3</b>
2.1 Värmeelement och dess teoretiska uppbyggnad . . . . .	3
2.1.1 Induktion . . . . .	3
2.1.2 Spolinduktans . . . . .	5
2.1.3 Spollindningsfaktorer och förluster . . . . .	10
2.1.4 Effektgenerering och Poyntingvektor . . . . .	13
2.1.5 Effektöverföring vid induktionsvärmning . . . . .	14
2.1.6 Ferromagnetiska material . . . . .	18
2.1.7 Solida cylindrar . . . . .	19
2.1.8 Ferromagnetiska cylindrar . . . . .	21
2.1.9 Rör . . . . .	22
2.1.10 Ferromagnetiskt rör . . . . .	23
2.1.11 Effektivitet och förluster för enkellagrig solenoidspole . . . . .	24
2.2 Värmeöverföring via inducerat arbetsstycke . . . . .	25
2.3 Korvkoeficienter och materialkonstanter . . . . .	28
2.4 LC-tank . . . . .	28
2.5 Q-värde . . . . .	29
2.6 Transistorer . . . . .	30
2.6.1 Bipolära transistorer . . . . .	31
2.6.2 MOSFET . . . . .	31
2.7 Växelriktare . . . . .	31
2.8 Temperaturmätning . . . . .	32
2.9 Servomotorer . . . . .	33
<b>3</b> Metod	<b>35</b>

3.1	Designprocess . . . . .	35
3.2	Materialval . . . . .	37
3.3	Matsäkerhet . . . . .	38
3.4	Baspelare . . . . .	39
3.5	Brödskopa . . . . .	39
3.6	Korvhiss . . . . .	40
3.7	Temperaturmätning . . . . .	41
3.8	Såsstation . . . . .	42
3.9	Korvmagasin . . . . .	43
3.10	Användargränssnitt . . . . .	44
3.11	Värmeelement . . . . .	45
	3.11.1 Spole . . . . .	46
	3.11.2 Arbetsstycke . . . . .	46
	3.11.3 Kretskort . . . . .	46
3.12	Styrdator . . . . .	48
3.13	Servostyrning . . . . .	48
3.14	Kod . . . . .	49
	3.14.1 Frekvensgenerering . . . . .	50
3.15	Strömförsörjning . . . . .	50
	3.15.1 Strömförsörjning av värmeelement . . . . .	51
	3.15.2 Strömförsörjning av mikrodatorer och servomotorer . . . . .	51
3.16	Kylning . . . . .	52
3.17	Basstruktur . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Resultat</b>	<b>55</b>
4.1	Initiala parameterintervall via teoretiska och praktiska begränsningar . . . . .	55
4.2	Resultat inom induktion . . . . .	56
4.3	Resultat inom automation . . . . .	58
	4.3.1 Programmering . . . . .	58
	4.3.2 Design, konstruktion och integration . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Slutsats och diskussion</b>	<b>67</b>
5.1	Vidareutveckling av autonoma systemet . . . . .	67
5.2	Vidareutveckling av induktionsvärmning . . . . .	68
5.3	Samhälleliga och etiska aspekter . . . . .	68
	5.3.1 Autonomi . . . . .	69
	5.3.2 Matsvinn . . . . .	69
5.4	Slutsats . . . . .	69
	<b>Litteratur</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Lösningssökning</b>	<b>1</b>
<b>B</b>	<b>Ritningar</b>	<b>5</b>
<b>C</b>	<b>Bilder på konstruerade komponenter</b>	<b>25</b>
<b>D</b>	<b>Komponentlista</b>	<b>37</b>

# Ordlista

Nedan följer en lista över förkortningar och ord som har använts i denna rapport med tillhörande förklaringar.

RPI	Raspberry Pi, styrdator
PWM	Pulse Width Modulation, pulsbreddsmodulering
GPIO	General Purpose Input Output, en digital signalpinne
CAD	Computer Aided Design, programvara för att rita komponenter
DC	Direct Current, likström
AC	Alternating Current, växelström
Autonomi	En maskin som inte kräver mänsklig styrning kan betraktas som autonom
Ferromagnetism	En form av magnetism
PLA	Polylactic acid, polylaktid, en plast
ABS	Akrylnitril Butadien Styren, ABS-plast, en plast
PC	Polycarbonate, polykarbonat, en plast
PP	Polypropylene, polypropen, en plast
TPU	Thermoplastic polyurethane, termoplastisk polyuretan, en plast
PVC	Polyvinyl chloride, polyvinylklorid, en plast
BJT	Bipolar Junction Transistor, en bipolär transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, en fälteffekttransistor
MDF	Medium Density Fibreboard, medelhårt packad spånskiva
DIN-skena	Standardiserad skena för montering av elektriska komponenter
volymelement	infinitt liten volym ( $m^3$ )
Maxwells ekvationer	de grundläggande elektromagnetiska ekvationer, se teori för utförligare definition
Poyntingvektor	se $S$
emk	elektromagnetisk kraft (V)



# Nomenklatur

Nedan följer en nomenklatur över variabler och parametrar som har använts i denna rapport.

## Variabler

$\alpha$	Attenuationskoefficienten för elektromagnetiska vågor i Beer-Lambert absorptionslag ( $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\delta$	Penetrationsdjupet $\sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$ (m)
$\epsilon$	Permittivitet i godtyckligt material ( $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\epsilon_0$	Permittivitet i vakuum ( $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\epsilon_r$	Relativ permittivitet, $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ (-)
$\eta$	Effektivitetskonstant (-)
$\Theta$	Magnetflöde (Wb)
$\kappa$	Värmeledningsförmåga ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
$\mu$	Permabilitet i godtyckligt material ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\mu_0$	Permabilitet i vakuum ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\mu_r$	Relativ permabilitet (-)
$\rho$	Elektrisk resistivitet $\frac{1}{\sigma}$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
$\sigma$	Elektrisk konduktivitet ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\omega$	Vinkelfrekvens (Rad)
$A$	Area ( $\text{m}^2$ )
$\mathbf{X}$	Vektornotation (-)
$\mathbf{X}_{\text{amp}}$	Maximala värdet för vektor eller skalär (-)
$d$	Diameter (m)
$E$	Elektriskt fält ( $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$F$	Aktiv effektöverföringsfaktor (-)
$f$	Frekvens (Hz)

$G$	Reaktiv effektöverföringsfaktor(-)
$H$	Magnetisk fältstyrka ( $A \cdot m^{-1}$ )
$h$	Godstjocklek (m)
$I$	Ström (A)
$I$	Generell intensitet (-)
$J$	elektrisk strömtäthet ( $A \cdot m^{-2}$ )
$L$	Induktans (H)
$l$	Längd (m)
$m_x$	Hjälpenhet, förhållande mellan $x$ och $\delta$ , $\frac{\sqrt{2x}}{\delta}$ (-)
$P$	Aktiv effekt (W)
$p$	Vindingsavstånd (m)
$P_v$	Uppvärmningseffekt (W)
$PF$	Effektfaktor (-)
$Q$	Reaktiv effekt (var)
$Q$	Värmeenergi (J)
$R$	Resistans ( $\Omega$ )
$S$	Poytningvektorn alternativt skenbar effekt. Beskriver effektflödet ( $W \cdot m^2$ )

# 1

## Introduktion

Idag tillagas korv ofta genom att först grillas för att sedan ligga på eftervärme tills de serveras på platser som bensinmackar, närbutiker samt vid stora evenemang inom exempelvis sport och musik. Ett vanligt problem med detta är svårigheten att möta ändringar i efterfrågan. Kunderna lider risken att serveras en korv som legat på eftervärme i timmar, eller att få vänta på att nya ska tillagas. En annan metod som utnyttjas vid evenemang och mobila serveringsstationer är att en stor mängd korv kokas i ett kärl, och sedan lämnas i det varma korvspadet tills de serveras. Vid användning av båda ovanstående metoder förekommer matsvinn då tillagade korvar slängs i slutet av dagen.

Om korv istället tillagades snabbt och autonomt, det vill säga maskinellt utan någon mänsklig operatör på kundens beställning skulle det skapa en möjligheten att spara pengar på både energi och bemanning. Även matsvinnet kunde potentiellt minska då inga tillagade korvar hade behövt slängas i slutet av dagen. Ytterligare hade en obemannad korvautomat möjliggjort korvförsäljning på platser och tider som i dag inte är lönsamma. Därmed finns båda ekonomiska och klimatmässiga incitament för att undersöka möjligheten och genomförbarheten för en sådan maskin.

### 1.1 Syfte

Syftet med arbetet var att undersöka och utveckla en produkt som tillagar french hot dog så snabbt som möjligt genom att med hjälp av induktion hetta upp ett metallrör som korven förs ned i. Hanteringen av korven skulle skötas autonomt av produkten för att undvika brännskador. Maskinen agerar med hänsyn på användarens val av korvtyp och dressing för att avslutningsvis servera användaren.

### 1.2 Problemformulering

I arbetet fanns ett antal problem som krävde lösningar. Tillagningen av korven skulle ske genom induktionsvärmning av ett metallrör som korven kunde doppas ner i. Detta kunde delas upp i ett antal delproblem:

- Hur skall induktionsvärmning av röret gå till?
- Hur skall en induktionskrets utformas?

Ett andra problem var hanteringen av korven och dess tillbehör. Hanteringen skulle ske så att användaren kan undvika brännskador vid användning. Utöver det togs

ett beslut om att även hantera korvbröd samt såstillförsel i brödet som tillhör till korven. Delproblem som uppstod då var följande:

- Hur skall hanteringssystemet utformas?
- Hur skall hanteringssystemet kontrolleras av användaren?

### 1.3 System

Systemet för tillagning av en french hot dog kan delas in i tre delar. Den första stora delen är att värma korven vilket sker genom att en växelriktare skickar strömmen genom en spole som via induktion värmer upp ett metallrör. Korven förs sedan in i metallröret och tas ut när den är tillräckligt varm. De andra två stora delarna är förflyttningen av korven samt förflyttningen av brödet. Korven förflyttas från ett magasin till metallröret för uppvärmning. Därefter transporteras korven till brödet. Samtidigt som korven börjar förflyttas till metallröret förflyttas brödet till dressingstationen för applicering beroende på användarens preferenser. Sedan behöver de här två delarna koordineras tillsammans för att kunna montera ihop den färdiga french hot dog:en.

### 1.4 Avgränsningar

Arbetet avgränsades till att enbart kunna hantera en korv i taget på grund av den ökade komplexiteten som hade uppstått vid hantering av flera korvar simultant. Vidare avgränsades även arbetet till att inte omfatta en konstruktion för likriktning av växelström då det ej ansågs vara relevant för syftet. Likspänningen som driver produkten begränsades även till 48 V på grund av säkerhetsföreskrifter för kandidatarbeten på avdelningen för Elkraftteknik.

Arbetet avgränsas även från reglering av optimal energiförbrukning. Detta görs då målet enbart är att designa och tillverka en prototyp som tillagar korven på kortast tid möjligt.

Valen som är möjliga för användaren avgränsades till två typer av sås och två typer av korv. Detta begränsades dels för att reducera dimensionerna på produkten samt att mervärdet av ökad valmöjlighet sågs som lägre prioriterad än det av andra funktioner.

Ytterligare begränsades optimering och mer precisa undersökningar av processen då en fungerande prototyp prioriterades. Gränsen för vad som ansågs autonomt drogs vid att användaren själv stoppar in ett bröd i maskinen och sedan använder gränssnittet vilket eliminerade behovet av ett fungerande brödmagasin.



# 2

## Teori

Teorin för produkten grundar sig i flera delar. Initialt går induktion och induktionsuppvärmning igenom. Därefter presenteras värmeöverföringsekvationerna samt korvs fysikaliska uppbyggnad.

### 2.1 Värmeelement och dess teoretiska uppbyggnad

Tillagningen av korven sker genom induktionsvärmning av ett metallrör. Nedan presenteras den grundläggande induktionsteorin viken är tungt geometriberoende. På grund av detta går de fundamentala kunskaperna igenom via ett exempel där Maxwells ekvationer appliceras på ett semi-infinit metallstycke. När detta presenteras byggs sedan teorin på via fallet för en solid cylinder och slutligen ihåliga cylindrar, rör. Fallen för ferromagnetiska material presenteras ytligt och bitvis under respektive geometrisk kategori men skall ses som en generell kommentar kring påverkans faktorer snarare än analytiska regler. Effektöverföring vid induktion kommenteras även för respektive geometri medan värmeöverföringen från rör till korv presenteras när induktionen har förklarats. Korvens grundläggande uppbyggnad och parametrar presenteras därefter kort.

#### 2.1.1 Induktion

Induktion eller mer specifikt, elektromagnetisk induktion, är fenomenet som beskriver hur ett varierande magnetfält ger upphov till en elektromotorisk kraft, emk eller  $\mathcal{E}$  [1]. Detta sker i alla ledningar men för att förstärka effekten kan ledningar lindas i en spole och enligt Faradays induktionslag beskrivs då emk i ekvation (2.1)

$$\mathcal{E} = -N \frac{\partial \Theta_B}{\partial t} (V), \quad (2.1)$$

där  $N$  är antalet varv och  $\Theta_B$  är den magnetiska fältstyrkan i varje varv [1]. Den elektromotoriska kraften  $\mathcal{E}$  skiljer sig gentemot vad som kallas spänning i vardagligt tal men ges i samma enhet. Skillnaden i en krets mellan emk och spänning ges av sambandet  $\mathcal{E} = V + iR_{\text{inre}}$  där  $R_{\text{inre}}$  är den inre resistiviteten av kretsen [2]. Märk även teckenförändringen i ekvation (2.1) som kan härledas från Lenz lag som säger att de inducerade strömmarna alltid är motriktade den kraft som orsakade den [3].

I differentialform kan Faradays lag beskrivas genom en av Maxwells ekvationer,

se ekvation (2.2) där  $E$  är det elektriska fältet och  $B$  det magnetiska fältet [4] samt uttrycken för  $D$  och  $B$  i följande stycke.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Uppkomsten av magnetfält vid varierande elektriska strömmar kan sedan beskrivas genom Amperes lag som ger ytterligare en av Maxwells ekvationer med beroende på strömtätheten  $J$  i dess differentialform. Se ekvation (2.3) där  $c^2 = \frac{1}{\epsilon_0\mu_0}$ . Permittiviteten i vakuum skrivs som  $\epsilon_0$  och  $\mu_0$  står för permeabiliteten i vakuum [4].

$$\nabla \times B = \frac{J}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (2.3)$$

Både ekvation (2.2) samt (2.3) kan skrivas om när materialen som fälten propagerar igenom har magnetiska eller polariserande egenskaper. Detta görs via de sista två av Maxwells ekvationer,  $D = \epsilon_0\epsilon_r E = \epsilon E$  samt  $B = \mu_0\mu_r H = \mu H$ .  $D$  beskriver den elektriska flödestätheten i materialet beroende på dess polariserande egenskaper,  $\epsilon_r$  och  $H$ , den magnetiska fältstyrkan i materialet [4]. Med dessa omskrivningar uttrycks då ekvation (2.3) samt (2.2) enligt ekvation (2.4) respektive (2.5).

$$\nabla \times E = -\frac{\partial \mu H}{\partial t}. \quad (2.4)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (2.5)$$

Med hjälp av dessa effekter kan en varierande ström generera ett varierande magnetfält som i sin tur kan inducera en ström i ett arbetsstycke. Denna ström kommer sedan att genom Joules uppvärmningslag generera upphettning i arbetsstycket enligt ekvation (2.6) där uppvärmningseffekten,  $P_v$  enbart ges av strömmen  $I$  samt resistansen  $R$  [5].

$$P_v = I^2 R \text{ (W)}. \quad (2.6)$$

Ekvation (2.6) kan i sin tur skrivas om till ett fältuttryck genom utnyttjandet av Ohms generella lag,  $\mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho}$  där  $\rho$  är den elektriska resistiviteten [5]. Detta ger då  $I = \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}$  i generell vektorform och som kan skrivas om till  $I = JA$  där  $JA$  representerar skalära storheterna för elektriska strömtätheten samt arean och där areans normal har antagits parallell med strömtäthetens riktning. Detta tillsammans med  $R = \frac{\rho l}{A}$  ger att ekvation (2.6) kan skrivas om till ekvation (2.7) för effekt per volym med skaläruttryck för strömtätheten och elektriska fältstyrkan [5]. Observera att volymen här är  $V = Al$  men kan ses som volymelement för godtyckliga kroppar.

$$P_v = \frac{J^2 \rho A^2 l}{A} = \rho J^2 V \text{ (W} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}. \quad (2.7)$$

Med dessa tre effekter och lagar, Faradays induktionslag, Amperes lag samt Joules uppvärmningslag kan därmed uppvärmning med hjälp av elektromagnetisk induktion skapas via elektrisk styrning. Hur dessa kvantitativa samband i fråga om magnetfält, strömmar och uppvärmning ser ut beror på ett stort antal faktorer, från spolens utformning till arbetsstyckets material och de största faktorerna går igenom i följande avsnitt.

### 2.1.2 Spolinduktans

Induktans,  $L$ , kan i en krets beskrivas som dess egenskap att motverka strömförändringar i kretsen [1]. Detta fenomen ger upphov till en elektromotorisk kraft, emk, som tidigare nämnts i ekvation (2.1) men som nu kan ges utifrån induktansen enligt ekvation (2.8) [1].

$$\mathcal{E} = -L \frac{\partial I}{\partial t} \text{ (V)}. \quad (2.8)$$

Detta gäller alla ledningar men som tidigare nämnt används spolar för att förstärka effekten. Förhållandet mellan induktans och magnetfält i dessa spolar kan fås genom att kombinera ekvation (2.1) med ekvation (2.8). Med integrering med avseende på  $t$  samt definitionen av magnetiskt flöde i Weber ( $\Theta_B = BA(W)$ ) om ytans normal är positivt parallell med  $B$ -fältet, ger ekvation (2.9).

$$LI = NAB \iff B = \frac{LI}{NA} \text{ (T)}. \quad (2.9)$$

Magnetfältet  $B$  samt induktansen  $L$  beror starkt på geometrin i spolens form samt antalet varv  $N$ . I fallet med en infinit spole kan uttrycket härledas från Ampere-Maxwells ekvation, ekvation (2.3), men på integralform genom Stokes sats, ekvation (2.10).

$$\oint_C B \, dl = \mu_0 \int_A \left( J + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \cdot dA \right). \quad (2.10)$$

Detta säger att den totala integrerade strömtätheten över en yta ger den inkapslade strömmen,  $I_{\text{Inkaps}}$  från ytan och den senare termen i ekvationen representerar bidraget till magnetfältet från ett tidsvarierande elektriskt fält [6].

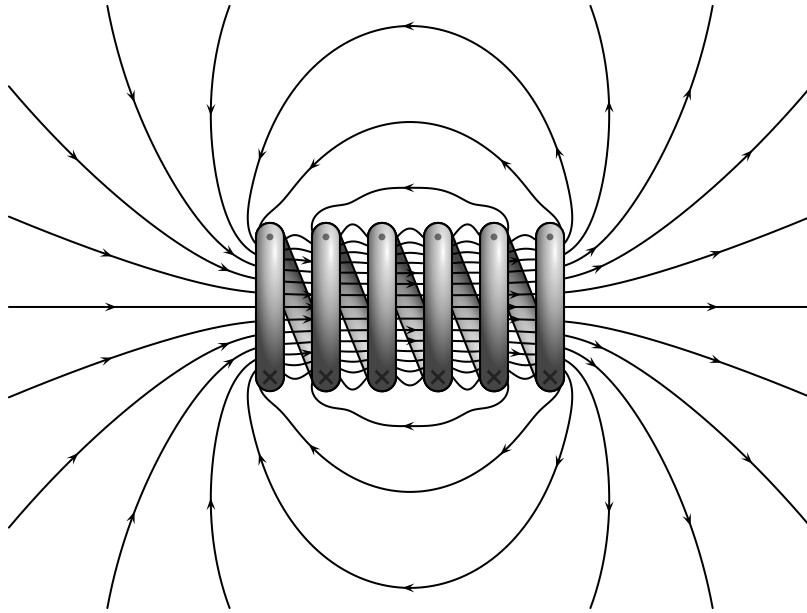
För en tidsinvariant ström,  $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$ , i en infinit spole kan då  $B$  fås genom att enbart beräkna  $I_{\text{Inkaps}}$ . Med en bestämd varvdensitet,  $n = \frac{N}{l}$  erhålls uttrycket för  $B$  i ekvation (2.11) från ekvation (2.10). Observera att  $I_{\text{Inkaps}} = IN$  samt att  $\mu = \mu_0 \mu_r$ .

$$\oint_C B \, dl = \mu I_{\text{Inkaps}} = Bl = \mu IN \implies B = \mu n I \text{ (T)}. \quad (2.11)$$

Från detta kan induktansen  $L$  erhållas från ekvation (2.9) som då ger uttrycket för induktansen i en infinit lång, enkelvirad, solenoidspole i ekvation (2.12). Lagg märke till användningen av  $\mu$  som beror på om kärnmaterialet i spolen är annat än luft [8]. Exempelvis har ferromagnetisk stål en relativ magnetisk permeabilitet,  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \approx 200$  [8]. Ferromagnetiska material och dess faktorer kommenteras i mer detalj i avsnitt 2.1.6, 2.1.8 samt 2.1.10.

$$L = \frac{\mu I n A N}{I} = \frac{\mu N^2 A}{l} \text{ (H)}. \quad (2.12)$$

Ekvationerna (2.11) samt (2.12) beskriver dock ideala fall och i verkligheten påverkar exempelvis ändarna på en spole till att skapa inhomogena fältfördelningar som då påverkar induktansen, se Figur 2.1 där fältet är glesare utanför spolen och tätare innuti den samt varierar i ändarna [9].



**Figur 2.1:** Förenklad bild på magnetfältet för en sexvarvig solenoid. Observera magnetfältets assymetriska fördelning där fältlinjerna är mer koncentrerade i mitten av solenoiden och glesnar av utanför. [7] CC BY-SA

Dessa korrektionsfaktorer har undersökts under 1900-talet där Nagaoka framförde sin koefficientformel 1909 från Lorentz strömarksberäkningar 1879 och med Nagaokakoefficienten,  $k_L$  kan ekvation (2.12) skrivas om till ekvation (2.13) genom en idealisering från spole till strömarm, se Figur 2.4 [9] [10].

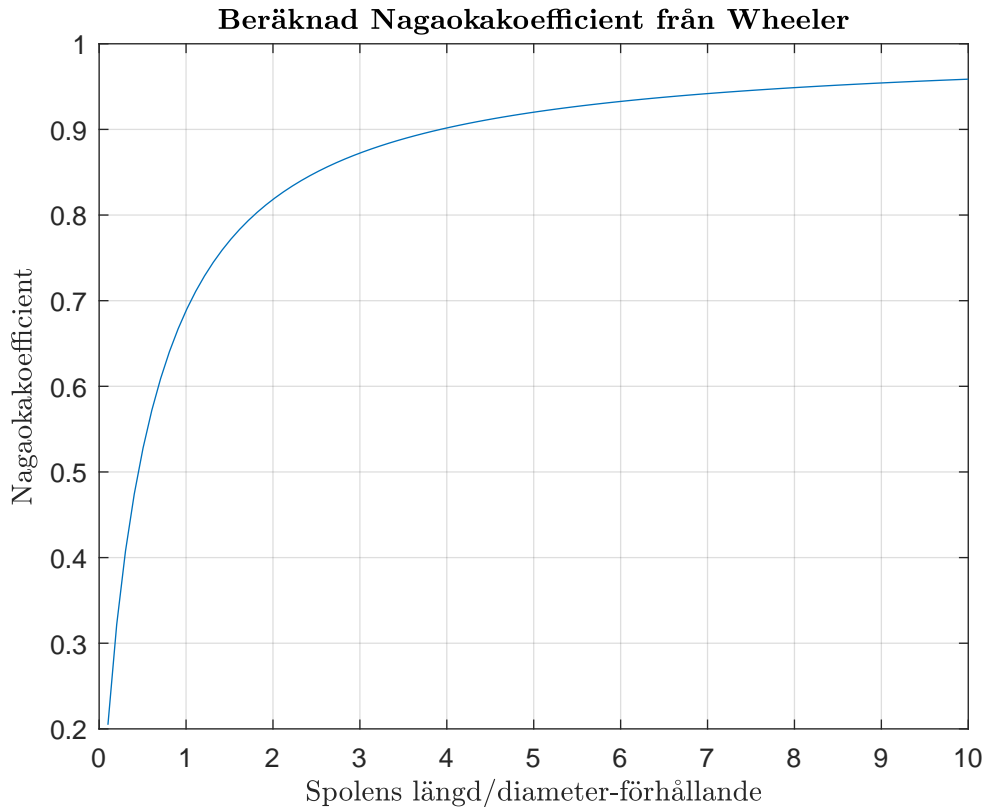
$$L = k_L \frac{\mu I n A N}{I} = \frac{\mu N^2 A}{l} \text{ (H)}. \quad (2.13)$$

Koefficienten  $k_L \leq 1$  där en infinit lång spole ger  $k_L = 1$  och därefter minskar den ju kortare den blir, se Figur 2.2 [9].

Precisa beräkningarna för Nagaokakoefficienten sker genom elliptiska integraler men alternativa formler för att uppskatta värdet på dessa integraler och därmed  $k_L$  har gjorts för att underlätta uppskattningar. En långt arbete har utförts av flertalet individer, b.l.a Robert Weaver som optimerade Harry Wheelers originalformel för att ge en kontinuerlig formel med en felmarginal på 18,5 ppm [11]. Se ekvation (2.14) för Weavers formel men anmärk att det finns bättre uppskattningar med exempelvis en felmarginal på 3 ppm från Lundins empiriska formel. Den är dock inte kontinuerlig utan uppdelad i lång respektive kort spole samt mer komplex vilket gör den mindre lämpad till analog analys [11].

$$L = 2\pi d N^2 \cdot 10^{-2} \left( \ln\left(1 + \frac{\pi}{2k}\right) + \frac{1}{2,3 + 3,427k + 1,764k^2 - \frac{1}{2(0,847+k^{-1})^{\frac{3}{2}}}} \right) \text{ (H)}. \quad (2.14)$$

Variabeln  $k = \frac{l}{d}$  i ekvation (2.14) medan koefficienterna är framtagna genom numerisk databehandling genom att finna koefficienterna som minimerar en relaterad



**Figur 2.2:** Nagaokakoefficienten för spolar. Observera att kortare spolar ger lägre koefficient och större förluster.

felfunktion gentemot Nagaokakoefficienten och är här i sin tur trungerade gentemot den ursprungliga formeln då minskad noggrannhet har visat sig ge större precision [11].

Med hjälp av ekvation (2.14) kan nu induktansen i ett strömark beräknas. Idealiseringen från spole till strömark kräver dock som tidigare nämnt att vindingarna sker tätt och för spolar där så inte är fallet är detta en felfaktor och korrekationer behöver göras för att ta hänsyn till såväl självinduktans som ömsesidig induktans. Rosa publicerade 1907 en korrektion för detta som ses i ekvation (2.15) där  $\Delta L$  är den totala korrektionen och  $L$  är induktansen i ett strömark och  $L_{Spole}$  induktansen i en spole med runda ledare [12].

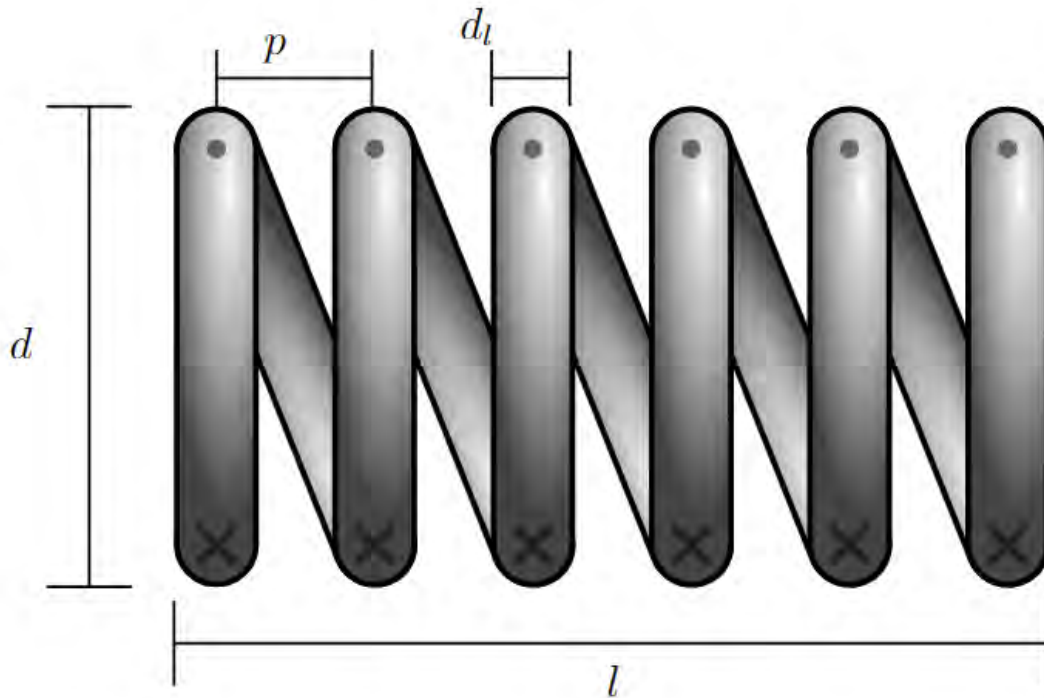
$$L_{Spole} = L - \Delta L \text{ (H)}. \quad (2.15)$$

Som nämnt består  $\Delta L$  av två delar, dels självinduktansen i ledaren i sig gentemot ett strömarks självinduktans,  $k_S$ , dels i den ömsesidiga induktansen mellan ledare i en spole och i ett strömark,  $k_M$  och totala faktorn ges av ekvation (2.16). Se Figur 2.4 för de två situationerna och där avståndet mellan arken och ledarna ger upphov till korrektionsfaktorerna.

$$\Delta L = 0,004\pi r N(k_s + k_m) \text{ (H)}. \quad (2.16)$$

Korrektionen  $k_S$  fås av Fredrick Grovers *Inductance Calculations-Working Formulas*

and Tables från 1946 som ger ekvation (2.17) där  $p$  är vindningsavstånd, avståndet mellan två ledare i spolen, och  $d_l$  är diametern på ledaren, se Figur 2.3 för spolens uppbyggnad.



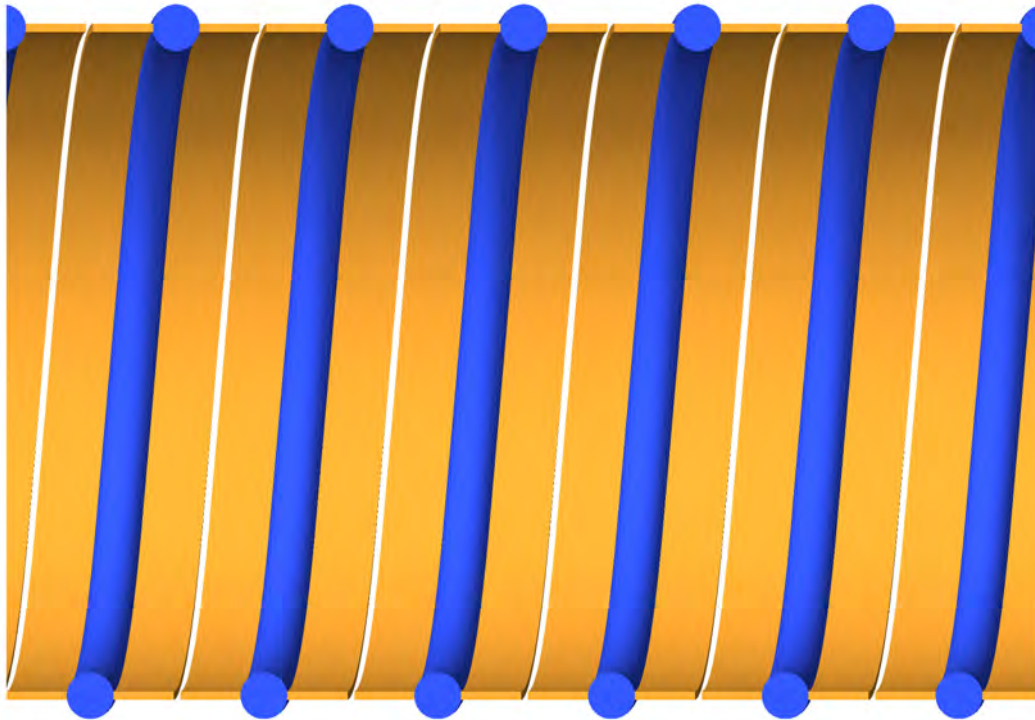
**Figur 2.3:** De olika parametrarna för en enkellagrig solenoidspole. Observera att antalet varv,  $N$  inte är utmärkt. Modifierad figur från Wikimedia Commons. [7] CC BY-SA

$$k_S = \frac{5}{4} - \ln\left(\frac{2p}{d_l}\right). \quad (2.17)$$

Korrekturen för den ömsesidiga induktansen baseras på kvoten mellan den geometriska medeldistansen för runda ledare och för strömskiktsledare.

Efter en genomgång av Weaver 2008 av Rosas ursprungsformel kan denna skrivas som en dubbelsomma enligt ekvation (2.18) [13].

$$k_M = \frac{2}{N} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_i^{\inf} \frac{N-m}{(2i+1)(i+1)2im^{2i}}. \quad (2.18)$$



**Figur 2.4:** Visualiserande på skillnaden mellan strömark och runda ledare där den större ytarean mellan de runda ledarna gör att induktansen minskar. Figur från Weaver, [11].

Med  $N$  för antalet varv, så är detta den enda oberoende variabeln i formeln men dubbelsummeringen förklaras från den geometriska medeldistansen samt definitionen av ledarpar [13]. Den geometriska medeldistansen kan uttryckas med logaritmer och dessa logaritmer har utvecklats till infinita summor vilket ger den innersta sumeringen [14]. Därefter kan  $m$  ses som antalet par som finns i spole med  $N$  varv. Då ett par avser två olika varv oavsett avstånd, påverkas varje ledare av  $N - 1$  andra ledare och som då ger den andra summationen.

Den yttre faktorn förklaras av att induktansen är ömsesidig och att varje ledare påverkar varandra vilket dubblar faktorn och  $\frac{1}{N}$  är en beräkningsteknisk korrektion från Rosas originalformel [13].

Ekvation (2.18) har sedan via empirisk databehandling av David Knight förenklats till ekvation (2.19) med en felmarginal på 1,1 ppm [12].

$$k_m = \left(\ln 2\pi - \frac{3}{2}\right) \left[1 - \frac{1 - 0,017111}{N - 0,017111}\right] + \ln(N) \left[\frac{-0,16641}{N} + \frac{0,00479}{N^2} + \frac{0,001772}{N^3}\right]. \quad (2.19)$$

Med dessa korrektionsfaktorer kan därmed slutligen ett uttryck för induktansen i enkellagrig spole med runda ledare och vindingsavstånd,  $L_{\text{Spole}}$  ges av ekvation

(2.20).

$$L_{\text{Spole}} = 2\pi d N^2 \cdot 10^{-2} \left( \ln\left(1 + \frac{\pi}{2k}\right) + \frac{1}{2,3 + 3,427k + 1,764k^2 - \frac{1}{2(0,847+k^{-1})^{\frac{3}{2}}}} \right) -$$

$$0,004\pi r N \left( \left( \frac{5}{4} - \ln\left(\frac{2p}{d_1}\right) + (\ln 2\pi) - \frac{3}{2} \right) \left[ 1 - \frac{1 - 0,017111}{N - 0,017111} \right] + \right.$$

$$\left. \ln(N) \left[ \frac{-0,16641}{N} + \frac{0,00479}{N^2} + \frac{0,001772}{N^3} \right] \right) \text{ (H)}. \quad (2.20)$$

Ekvation(2.20) kan i sin tur utvecklas ytterligare med korrektioner för vindingsvinkel och längd beroende på design och situation men ger trots det en grund som kan användas analytiskt optimera och maximera induktanser. I sin tur finns det dock flertalet faktorer och fenomen som påverkar induktionen vid spollindning och förlusterna från dessa gås igenom i följande avsnitt.

### 2.1.3 Spollindningsfaktorer och förluster

Vid spollindning finns primärt tre stycken större fenomen som orsakar effektivitetsförluster, resistansförlust genom Joulevärmning, yteffekten samt närhetseffekten [15].

Resistansen  $R$  i en cirkulär ledare för likström ges av ekvation (2.21) med  $\rho$  som elektrisk resistivitet och  $l_{\text{kabel}}$  för ledarens längd.

$$R = \frac{l_{\text{kabel}}\rho}{r_{\text{kabel}}^2\pi} \text{ (}\Omega\text{)}. \quad (2.21)$$

Där ledarens längd i sin tur genom genom Pythagoras sats kan approximeras enligt ekvation (2.22) där  $p$  är som nämnt avståndet mellan vindingsledarnas mitt [16].

$$l_{\text{kabel}} = N\sqrt{(2\pi r)^2 + p^2} \text{ (m)}. \quad (2.22)$$

Förluster uppkommer genom resistansen som därmed sänker spänningen beroende på distansen. Från Joules ekvation för elektrisk upphettning kan värmeenergin,  $Q$ , som uppkommer beskrivas enligt ekvation (2.23) med  $t$  för passerad tid [17].

$$Q = I^2 R t \text{ (J)}. \quad (2.23)$$

Förlusten genom värmegenerering i ledare för växelström är beroende på fler faktorer än enbart den karakteristiska resistansen. Vid växelström påverkar nämligen även skineffekten i sin tur hur strömmen fördelar sig över den totala ledarens tvärsnittsarea [18].

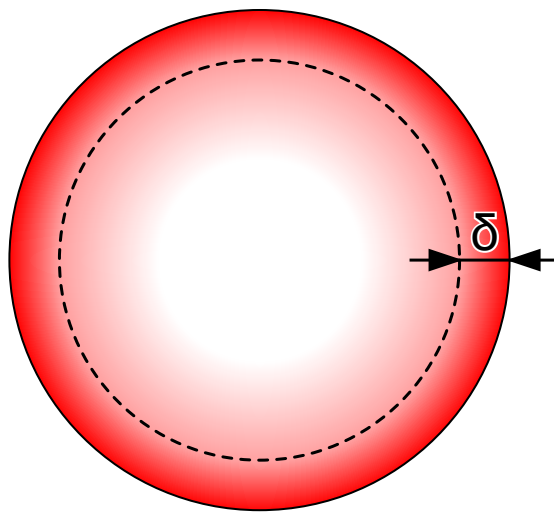
Yteffekten är effekten att elektronerna i allt större grad tenderar att fördela sig över ytan på ledaren. Med andra ord, ju högre frekvens desto högre strömtäthet på



den yttre delen av ledaren [19]. Skindepth noteras med  $\delta$  och approximeras enligt ekvation (2.24) med  $\rho$  för elektriska resistansen [19].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_{\text{ledare}} \mu}} \text{ (m)}. \quad (2.24)$$

Denna effekt, där ett penetrationsdjup  $\delta$  definieras som avståndet där strömdensiteten har minskat med en faktor på  $\frac{1}{e}$ , gör att den effektiva arean kan approximeras som en cirkelremsa, se Figur 2.5.



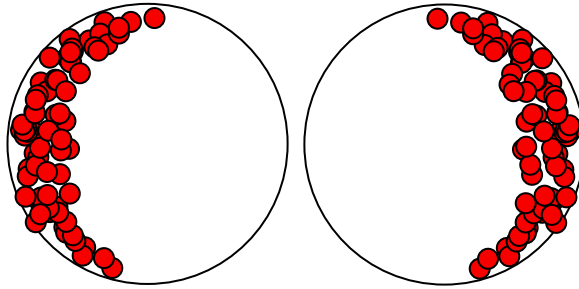
**Figur 2.5:** Skineffekt där arean kan approximeras som en cirkelremsa med  $\delta$  i bredd. [20] CC0

Med den effektiva arean,  $A_{\text{effektiv}} = \pi(2r_{\text{kabel}}\delta - \delta^2)$ , kan därmed ekvation (2.21) skrivas om till ekvation (2.25) för att inkludera skineffekten från växelström [18].

$$R_{\text{växelström}} = \frac{l\rho}{\pi(2r_{\text{kabel}}\delta - \delta^2)} \text{ (}\Omega\text{)}. \quad (2.25)$$

Vid induktans uppkommer dock ytterligare en tredje faktor som påverkar resistans och därmed förlust, närhetseffekten.

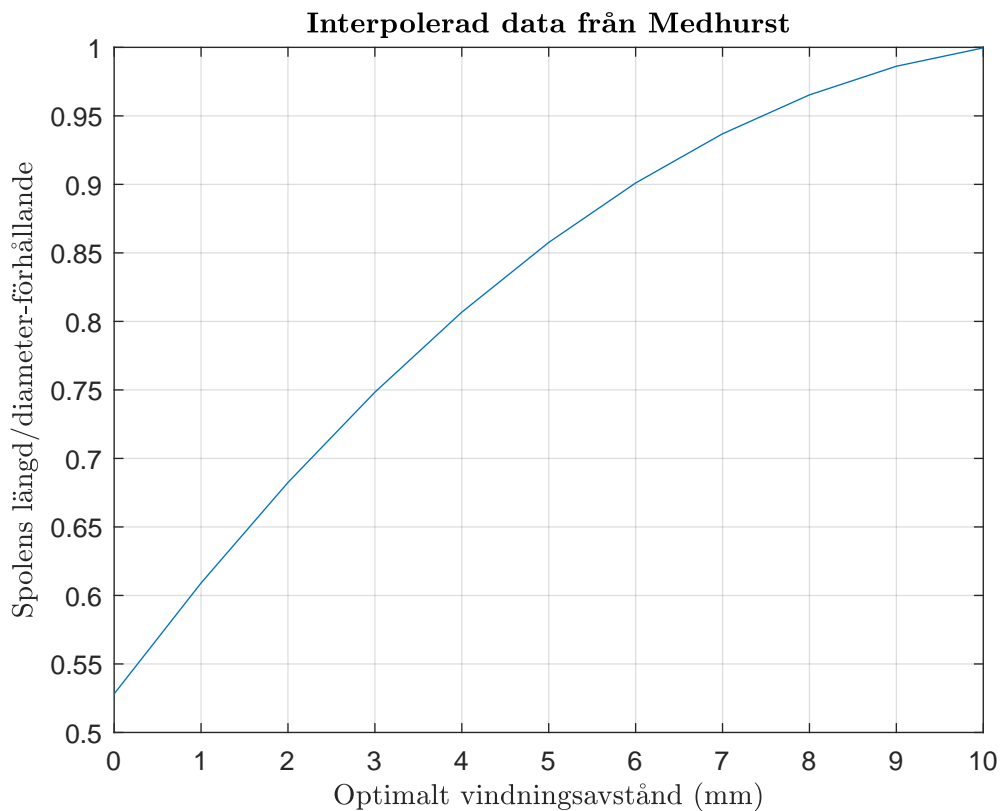
Närhetseffekten,  $\Psi$ , uppkommer av samma fenomen som utnyttjas för värmningen, virvelströmmar. På grund av strömflödet uppstår dessa och skapar magnetfält som i sin tur ger upphov till strömmar i närliggande ledare. Dessa strömmar orsakar en halvmånsliknande asymmetrisk strömfördelning som ger ytterligare förluster i ledaren, se Figur 2.6 [18].



**Figur 2.6:** Närhetseffektens påverkan på strömtäthetens asymmetriska fördelning. Högre strömtäthet symboliseras av fler punkter.

Effekten av strömmarna är dock inte möjliga att reducera till en allmänt applicerbar formel utan kan istället lösas med datorsimulering [18]. Däremot finns empirisk data som sammanställts från Medhurst 1947 som ger ett optimalt förhållande mellan kabeldiameter och vindningsavstånd beroende på spolens längd till diameterratio, se Figur 2.7 samt ekvation (2.26) som är en andragskurskurvanpassning av Medhursts graf där vindningsavståndet  $p$  ges som funktion av förhållandet mellan längd och diameter med ett R-värde på 0,99 [18].

$$p(x) = -0,00375x^2 + 0,08464x + 0,52818 \text{ m.} \quad (2.26)$$



**Figur 2.7:** Optimal kvot mellan kabeldiameter,  $2r_{\text{kabel}}$  och vindningsavstånd  $p$  beroende på mellan spolens längd och diameter.

Med närhetseffekten kan då den totala resistansen i ledaren ges enligt ekvation (2.27) som insatt i ekvation (2.23) ger den totala förlusten för ledaren.

$$R_{\text{kabel}} = \frac{l_{\text{kabel}}\rho\Psi}{\pi(2r_{\text{kabel}}\delta - \delta^2)} (\Omega). \quad (2.27)$$

Förutom ovan nämnd teori har även värmegenereringen vid olika förhållanden mellan arbetsstyckets och spolens höjd undersökts och där Rikhter, A and Fogler, M. M i *Influence of workpiece height on the induction heating process* kom fram till en optimal ratio på 1,14 gånger större höjd på arbetsstycke gentemot spole för maximal värmegenerering [21].

### 2.1.4 Effektgenerering och Poyntingvektor

Induktionsvärmning baseras primärt på att effekt från spolen överförs till arbetsstycket genom så kallade virvelströmmar [22]. Den överförda effektens uttryck och effektivitet baseras till stor grad på geometri och frekvens men generellt används Poynting vektorn i ekvation (2.28),

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}, \quad (2.28)$$

som beskriver energiflödet i rymden [23]. Från Poynting kan sedan den totala komplexa effekten fås från ekvation (2.29) där Gauss sats har använts för att skriva om ytintegralen och genom att skriva ut ekvation (2.29) fås ekvation (2.30) [23].

$$-P_s = \int_V \nabla \cdot \mathbf{S} dV. \quad (2.29)$$

$$-P_s = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2}\mu H^2 dV\right) - \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2}\epsilon E^2 dV\right) - \int_V \mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^* dV. \quad (2.30)$$

Från ekvation (2.30) kan den aktiva respektive reaktiva effekten fås. Den aktiva delen beskrivs av den sista termen med strömtätheten  $\mathbf{J}$  respektive elfältet  $\mathbf{E}$  och ger de ohmska förluster och energin som då överförs till stycket, den aktiva effekten [23]. De reaktiva delarna beskrivs av de andra två termer där termen innehållande  $H$  beskriver energin i magnetfältet och termen innehållande  $E$  beskriver energin i elfältet och då dessa enbart oscillerar i fältet är de reaktiva delar [23].

Den aktiva delen,  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*$  kan i sin tur med Maxwell's ekvationer och att nyttja komplexa konjugat, skrivas om till ekvation (2.31) som då ger uttrycket för Joulevärmningen i arbetsstycket,  $P_v$  [23].

$$P_v = \rho J^2 \text{ (W)}. \quad (2.31)$$

Dock har härledningen ovan antagit momentana förhållanden och vid växelström kan det tidsgenomsnittliga effektflödet vid sinusodial period ges av ekvation (2.32) där  $\mathbf{E}_{\text{am}}$  och  $\mathbf{H}_{\text{am}}$  är enbart positionsberoende med exempelvis förhållandet  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\text{am}} e^{j\omega t}$  där då  $\mathbf{E}_{\text{am}}$  representerar maximala amplituden för elfältet i varje position och exponentermen avgör perioden i tiden med frekvensen  $\omega$ . [22].

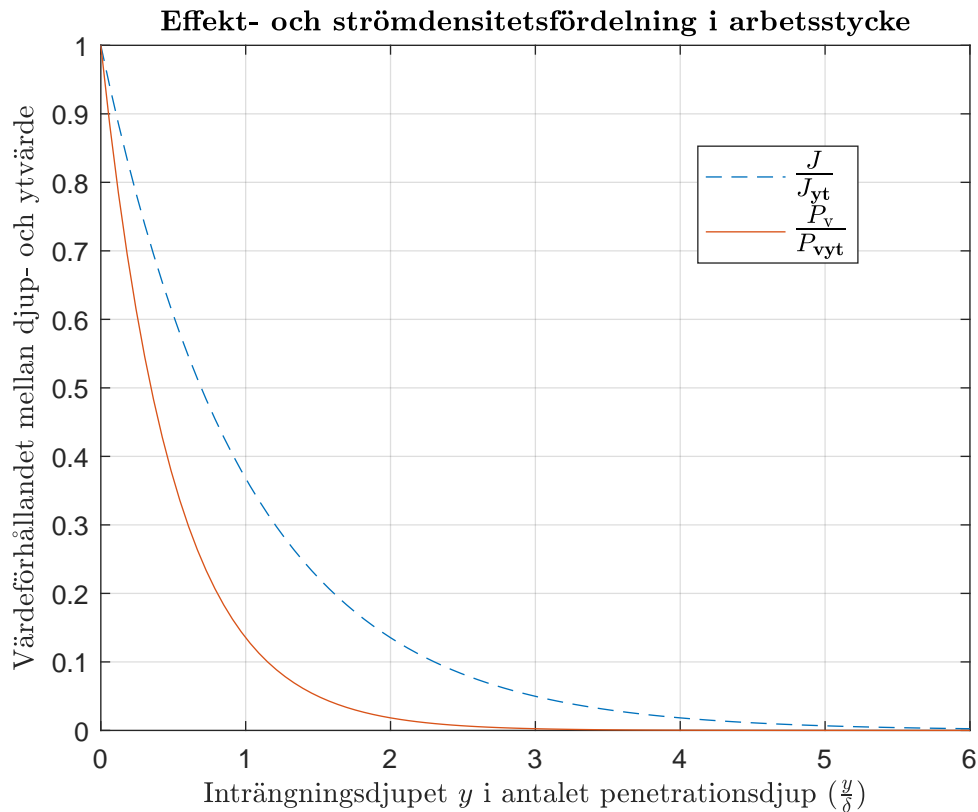
$$\langle P_v \rangle = \frac{1}{2} \Re\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\} \text{ (W)}. \quad (2.32)$$

### 2.1.5 Effektöverföring vid induktionsvärmning

Vid induktionsvärmning används de tidigare nämnda  $B$ ,  $H$  och  $J$ -fälten för att beskriva strömmar i materialet. Dessa fält är dock, förutom på arbetsstyckets material och geometri, även beroende på frekvensen och därmed penetrationsdjupet  $\delta$ . Strömfördelningen i materialet kommer vara icke-linjärt fördelat där strömmen med ytstyrkan  $J_v$  vid en viss punkt på djupet  $x$  ges av ekvation (2.33) [24].

$$J(x) = J_{yt} e^{-\frac{x}{\delta}} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.33)$$

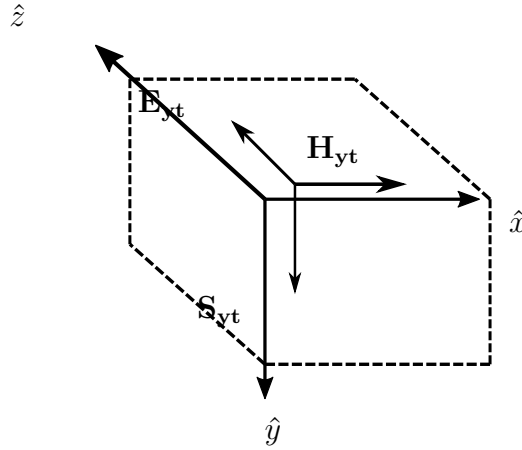
Med effekten kvadratiskt proportionellt mot strömtätheten ges värmningseffekten av ekvation (2.34), se Figur 2.8 för både effekt- och strömdensitetsfördelning [24].



**Figur 2.8:** Effekt- och strömdensitetsfördelning som funktion av antal penetrationsdjup.

$$P_v = P_{yt} e^{-\frac{2y}{\delta}} \text{ (W)}. \quad (2.34)$$

I sin elementära form sker beräkningarna av  $H$  samt  $E$  genom användandet av Maxwells fyra ekvationer som ger en partiell differentialekvation och efter lösningen av magnet- och elfält kan den aktiva och reaktiva effekten beräknas genom Poyntingvektorn i ekvation (2.28). Dessa ekvationer är analytiskt lösbara enbart för vissa geometrier och idag används i huvudsak datorsimuleringar [25]. Ett av de mest grundläggande fallen är med en semiinfinitt kropp där materialet är homogent och konstant, strömmen är sinusodial och kan skrivas på komplex form, exempelvis  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{am} \cdot \sin(\omega t) = \mathbf{H}_{am} \cdot e^{i\omega t}$  samt att  $\mathbf{J} \gg \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  och  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ , se Figur 2.9 [25].



**Figur 2.9:** Semi-infinit kropp med förhållanden mellan vektorenheter för elfält  $E_{yt}$ , magnetfält  $H_{yt}$  och Poynting  $S_{yt}$  vid kroppens yta.

Då kan den partiella differentialekvationen som uppstår genom Maxwells ekvationer skrivas enligt ekvation (2.35) med  $k^2 = j\omega\mu\sigma\rho$  där  $k = \frac{1}{\delta}$  är attenuationskonstanten som beskriver hur en elektromagnetisk våg dämpas i ett material [25]. Ekvation (2.35) kan sedan skrivas om till ekvation (2.36) genom att utnyttja  $\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial^2 y}$  för planvågor som rör sig i y-riktningen och lösa ekvationen generellt [25].

$$\nabla^2 H = k^2 H. \quad (2.35)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 \cdot e^{-ky} + \mathbf{C}_2 \cdot e^{ky} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}. \quad (2.36)$$

Ekvation (2.36) löses sedan specifikt med randvilkoren där magnet- och elfältet på ytan är känt,  $H_{yt}$  och  $E_{yt}$ . Magnetfältet är tangentiellt och varierar inte mellan ledande och dielektriska material samt att magnetfältet är enbart riktat i ett led som i detta fall är i x-led, vilket ses i Figur 2.9.

Tillsammans med faktumet att  $\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = 0$  vid konstant y-värde gör att enbart z-komponenten består vid  $\nabla \times \mathbf{H}$  och genom analys av (2.36) där  $e^{-ky}$  ses som vågen som penetrerar ett medium och  $e^{ky}$  vågen som reflekteras kan nu uttrycken för fälten i kroppen ges av ekvation (2.37) och (2.38) där konstanten  $\mathbf{C}_1$  getts av randvilkoren till  $H_{y\text{tam}}$  vilket är det momentana värdet för magnetfältets amplitud på materialets yta [25].

$$\mathbf{H} = H_{y\text{tam}} e^{j\omega t} e^{-ky} \cdot \hat{x} = H_{y\text{tam}} e^{j\omega t - ky} \cdot \hat{x} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}, \quad (2.37)$$

$$\mathbf{E} = k\rho \cdot H_{y\text{tam}} e^{j\omega t} e^{-ky} \cdot \hat{z} = k\rho H_{y\text{tam}} e^{j\omega t - ky} \cdot \hat{z}, \text{ (V} \cdot \text{m}^{-1}\text{)} \quad (2.38)$$

där ekvation (2.38) fås genom sambandet i ekvation (2.4) . Koefficienten k, i detta fall dämpningskoefficienten för vågen och som definierats ovan, kan sedan skrivas om till  $k = \frac{1+j}{\delta} = \frac{\sqrt{2}}{\delta} = e^{j\frac{\pi}{4}}$ . Instoppat i ekvation (2.37) och (2.38) tillsammans med faktumet att de varierar sinusodiallyt kan fälten för varje tidpunkt, momentana fälten  $H_{y\text{tam}}$  och  $E_{y\text{tam}}$ , fås genom ekvation (2.39) och (2.40).

$$\mathbf{H} = H_{\text{ytam}} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\frac{(1+j)y}{\delta}} = H_{\text{ytam}} \cdot e^{j(\omega t - \frac{y}{\delta})} \cdot e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \hat{x} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}, \quad (2.39)$$

$$\mathbf{E} = \frac{\sqrt{2}\rho H_{\text{ytam}}}{\delta} \cdot e^{j\frac{\pi}{4}} \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{-\frac{1+j}{\delta}y} \cdot \hat{z} = \frac{\sqrt{2}\rho H_{\text{ytam}}}{\delta} \cdot e^{j(\omega t - \frac{y}{\delta} + \frac{\pi}{4})} \cdot e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \hat{z} \text{ (V} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}. \quad (2.40)$$

Med sambandet  $\mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho}$  fås uttrycket för den momentana strömdensiteten i ekvation (2.41).

$$\mathbf{J} = \frac{\sqrt{2}H_{\text{ytam}}}{\delta} \cdot e^{j(\omega t - \frac{y}{\delta} + \frac{\pi}{4})} \cdot e^{-\frac{y}{\delta}} \cdot \hat{z} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.41)$$

Ekvation (2.41) kan skrivas om via den komplexa exponentialtermen till en sinusvåg vilket ger uttrycket för RMS-värdet för strömtätheten inuti den semiinfinita metallkroppen via ekvation (2.42) [25].

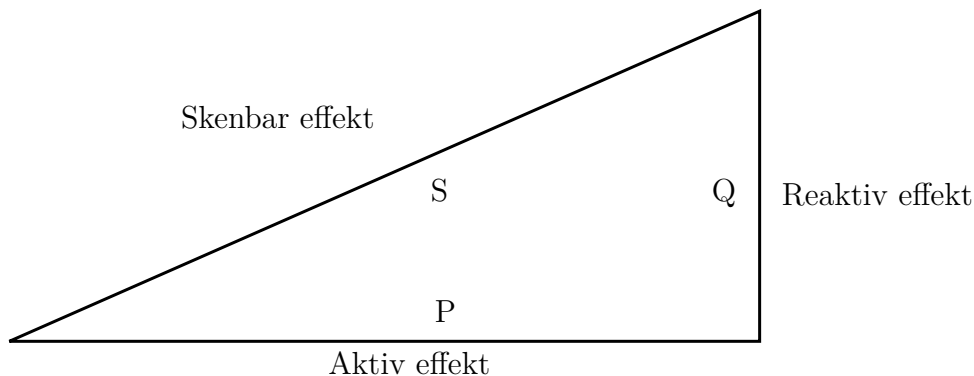
$$J_{\text{RMSam}} = \frac{H_{\text{ytam}}}{\delta} \cdot e^{-\frac{y}{\delta}} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.42)$$

Från ekvation (2.42) ses det exponentiella avtagandet av strömdensiteten gentemot inträngningsdjupet vilket även visades i Figur 2.8 [25].

För att i sin tur beräkna effektfaktorn, kvoten mellan den aktiva och den totala effekten, används vågimpedansen  $Z$  [25]. Vågimpedansen beskriver den totala elektriska resistansen per kvadratmeter och kan skrivas om enligt ekvation (2.43) med en aktiv respektive reaktiv del [25].

$$Z = R + jX = \frac{E}{H} = \frac{H_{\text{yta}} \cdot \rho \cdot \frac{1+j}{\delta} \cdot e^{-\frac{1+j}{\delta}y}}{H_{\text{yta}} \cdot e^{-\frac{1+j}{\delta}y}} = \frac{\rho}{\delta}(1 + j) \text{ (}\Omega\text{)}. \quad (2.43)$$

Den aktiva effekten fås från den reella termen i effektfaktorn  $PF$  och den reaktiva från den imaginära termen i ekvation (2.43) som kan visualiseras via effekttriangeln enligt Figur 2.10[25].



**Figur 2.10:** Effekttriangel med den skenbara effekten  $S$ , den aktiva delen  $P$  samt den reaktiva delen  $Q$ . Observera att  $P$  är den reella komponenten och  $Q$  den komplexa.

$$PF = \frac{\frac{\rho}{\delta}}{\sqrt{(\frac{\rho}{\delta})^2 + (\frac{j\rho}{\delta})^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (2.44)$$

Med uttrycken för  $\mathbf{H}$  samt  $\mathbf{E}$  kan nu medeleffekten beräknas genom Poyntingvektorn som presenterades i ekvation (2.28) tillsammans med det sinusoidala antagandet. Insättning av  $\mathbf{H}$  samt  $\mathbf{E}$  från ekvation (2.37) respektive (2.38) ger ekvation (2.45) där  $\langle \mathbf{S} \rangle$  då är tidsgenomsnittet av Poyntingvektorn.

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{H_{\text{ytam}}^2 \rho (1 + j)}{2\delta} \cdot e^{-\frac{2y}{\delta}} \cdot \hat{y} \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.45)$$

Den aktiva respektive reaktiva delen ges som tidigare nämnt av den reella respektive imaginära komponenten och är i detta fall lika stora.

För att fastställa magnetfältets maximala värde vid ytan,  $H_{\text{ytam}}$ , behövs ytterligare antaganden. Vid en infinit lång spole runt en semi-infinit metallkropp kan magnetfältet approximeras direkt till antalet varv per meter multiplicerat med strömmen i varje varv och dess magnetiska permeabilitet,  $\frac{N}{l} I \mu$ , [26]. Vid finita spolar uppkommer dock effekter vid ändarna där magnetfältet avtar samt byter riktning och den maximala fältstrykan är i spolens mitt, ett fenomen som kallas ändeffekten [27]. Detta gör att magnetfältet varierar med positionen i spolen vilket sågs i Figur 2.1. Fältdistribution i Figur 2.1 beror även på plats och ringeffekten. Platseffekten är i sin tur effekten där magnetfältet kan tryckas ihop och manipuleras då föremål förs in i spolen. Ett arbetsstycke, exempelvis ett rör, som förs in i spolen kommer då att koncentrera magnetfältet vilket ökar fältdensiteten vid ytan på rörets yttre [27]. Ringeffekten påverkar i sin tur magnetfältets distribution då runda ledningar såsom en kabel inducerar ett magnetfält runt ledaren, när denna sedan böjs som i en spole koncentreras då större mängd fält inuti spolen än utanför [27]. Detta ger då uttrycket för  $H_{\text{ytam}}$  i ekvation (2.46).

$$H_{\text{ytam}} = \frac{N}{L} I_{\text{am}} = \frac{N}{L} \sqrt{2} I_{\text{RMS}} \text{ (A} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}. \quad (2.46)$$

Med uttrycket för  $H_{\text{ytam}}$  kan ekvation (2.45) skrivas om i termer av strömmen  $I_{\text{RMS}}$  och kvoten av antalet varv per meter  $\frac{N}{L}$  vilket ger ekvation (2.47).

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \left( \frac{I_{\text{RMS}} N}{L} \right)^2 \cdot \frac{1 + j}{\delta} \cdot e^{-\frac{2y}{\delta}} \cdot \rho \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.47)$$

Med definitionen av penetrationsdjupet från ekvation (2.24) med  $\omega = 2\pi f$  och  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu_r$  kan uttrycket från ekvation (2.47) skrivas om ytterligare till ekvation (2.48).

$$\langle \mathbf{S} \rangle = 2 \cdot 10^{-3} \left( \frac{N}{L} \cdot I \right)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \cdot (1 + j) \cdot e^{-\frac{2y}{\delta}} \cdot \rho \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.48)$$

Från ekvation (2.48) kan i sin tur Joulevärmningen från ekvation (2.7) till ekvation (2.49) via ekvation (2.42) för den genomsnittliga värmeeffekten vid en sinusoidal fördelning i en semi-infinit kropp,  $P_{\text{Semiinf}}$ .

$$P_{\text{Semiinf}} = \rho \left( \frac{\sqrt{2}IN}{L\delta} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2y}{\delta}} \text{ (W)}. \quad (2.49)$$

Via ekvation (2.49) kan sedan värmegenereringen på olika djup beräknas där sambandet följer tidigare presenterade Figur 2.8. Vid exempelvis ett djup motsvarande ett penetrationsdjup,  $y = \delta$  fås en faktor på  $e^{-2} \approx 0,135$  vilket innebär att  $1 - 0,135 = 86,5\%$  av effekten sker vid ett penetrationsdjup. Däremot är strömdensiteten vid ett penetrationsdjup  $e^{-1} \approx 36,8\%$  vilket ger att  $1 - 36,8 = 63,2\%$  av strömmen befinner sig inom ett penetrationsdjup [23].

### 2.1.6 Ferromagnetiska material

Beräkningarna ovan har utförts med antagandet om konstanta permeabiliteter och resitiviteter för icke-magnetiska metaller. Detta ändras dock när ferromagnetiska material används [28]. Ferromagnetiska material är material som kan bli permanent magnetiserade när de utsätts för magnetiska fält. De fortsätter sedan att vara magnetiska tills de uppnår en materialspecifik temperatur som kallas Curietemperaturen där materialets magnetiska egenskaper avtar och blir icke-magnetiskt tills att den återigen svalnat av [29]. För ferromagnetiska material som då påverkas av såväl temperatur som magnetisk fält kan den relativa magnetiska permeabiliteten,  $\mu_r$  minska med en faktor mellan 5-1000 och elektriska resitiviteten,  $\rho$  öka med en faktor på 2-7 [28].

Flera olika sätt för att hantera dess icke-linjära beteenden finns. Initialt kan exempelvis materialet delas upp i tre olika områden: kallt, mellan och varmt med specifika antaganden och egenskaper i varje områden. Mellanområdet börjar när Curietemperaturen uppnås i någon del av materialet och övergår till det varma när hela materialet har blivit avmagnetiserat [28].

De olika approximationerna för analytiska lösningar är återigen geometriberoende men vid exempelvis ett ferromagnetiskt semi-infinit stycke kan magnetiseringen approximeras som en parabolisk funktion med materialkoefficienter. Tidsberoendet kan sedan approximeras bort genom att beskriva den föränderliga amplituden via enbart den första harmoniska faktorn av  $B$ - respektive  $H$  -fältet och de två tidigare approximationerna ger möjlighet att beskriva den relativa magnetiska permeabiliteten via den yttre magnetiska permeabiliteten dividerat på en djupfaktor [28]. Antaganden leder sedan till analytiskt lösliga differentialekvationer beroende på geometrin. Likväl återfinns ytterligare exempel i Davies *Conduction and induction heating* med exempelvis Bowdens approximation i ekvation (2.50) [30].

$$P_v = \frac{k^2}{2} \sqrt{\frac{\rho\omega}{2} H_s^{\frac{\sqrt{8}}{\delta}} (\beta_n K_b)} \text{ (W)}. \quad (2.50)$$

Där  $\beta_n K_b$  är kvalitativt inverst beroende gentemot  $\frac{\sqrt{2}}{\delta}$  och  $k = \sqrt{\frac{2j}{\delta}}$  [30]. Från Bowdens experimentella data kan ytterligare en metod användas där värdet i ekvation (2.7) vid ett platt metalliskt arbetsstycke multipliceras med 1,47 och  $\mu$  bestäms från en materialtabell [30].



I dag används dock simuleringsprogram och datorberäkningar för dessa geometrier men formler kan ge vägledning vid designval [28].

### 2.1.7 Solida cylindrar

Medan tillvägagångssättet är liknande det som presenterats i avsnitt 2.1.3 och förluster beräknas enligt samma ekvationer skiljer sig ekvationerna för  $B$ - och  $H$ -fält och därmed även effektfaktor och övriga beroenden.

För solida cylindriska arbetsstycken med antaganden om sinusoidal tidsvariation som kan uttryckas komplext och där materialet är homogent, konstant och ledande kan Maxwells ekvationer för cylindriska geometrier användas. Analogt med ekvation (2.35) med skillnaden att den cylindriska laplacianen används ges lösningen för fält som enbart varierar i radiellt led till ekvation (2.51) [31].

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} - j \frac{\omega \mu \mathbf{H}}{\rho} = 0. \quad (2.51)$$

Ekvation (2.51) kan sedan lösas ut via Besselekvationer vilket ger ekvation (2.52) där  $J_0$  respektive  $Y_0$  är besselekvationerna av första samt andra typen och av nollte ordningen. Konstanterna  $\mathbf{C}_1$  och  $\mathbf{C}_2$  ges av randvilkoren och  $m = \frac{\sqrt{2}r_{\text{yttre}}}{\delta}$  samt  $\xi = \frac{r}{r_{\text{yttre}}}$  används för att förenkla notationen.

$$\mathbf{H} = \mathbf{C}_1 \cdot J_0(\sqrt{-jm}\xi) + \mathbf{C}_2 \cdot Y_0(\sqrt{-jm}\xi) \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.52)$$

Elfältet ges sedan av Maxwells ekvationer tillsammans med förhållandet att derivatan av en nollte ordningens besselekvation ger en modifierad förstaordningens besselekvation av samma slag, exempelvis  $J'_0(x) = -J_1(x)$  [31]. Detta leder till ekvation (2.53).

$$\mathbf{E} = -\frac{\sqrt{-2j}\rho}{\delta} [\mathbf{C}_1 \cdot J_1(\sqrt{-jm}\xi) + \mathbf{C}_2 \cdot Y_1(\sqrt{-jm}\xi)] \cdot \hat{\varphi} \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.53)$$

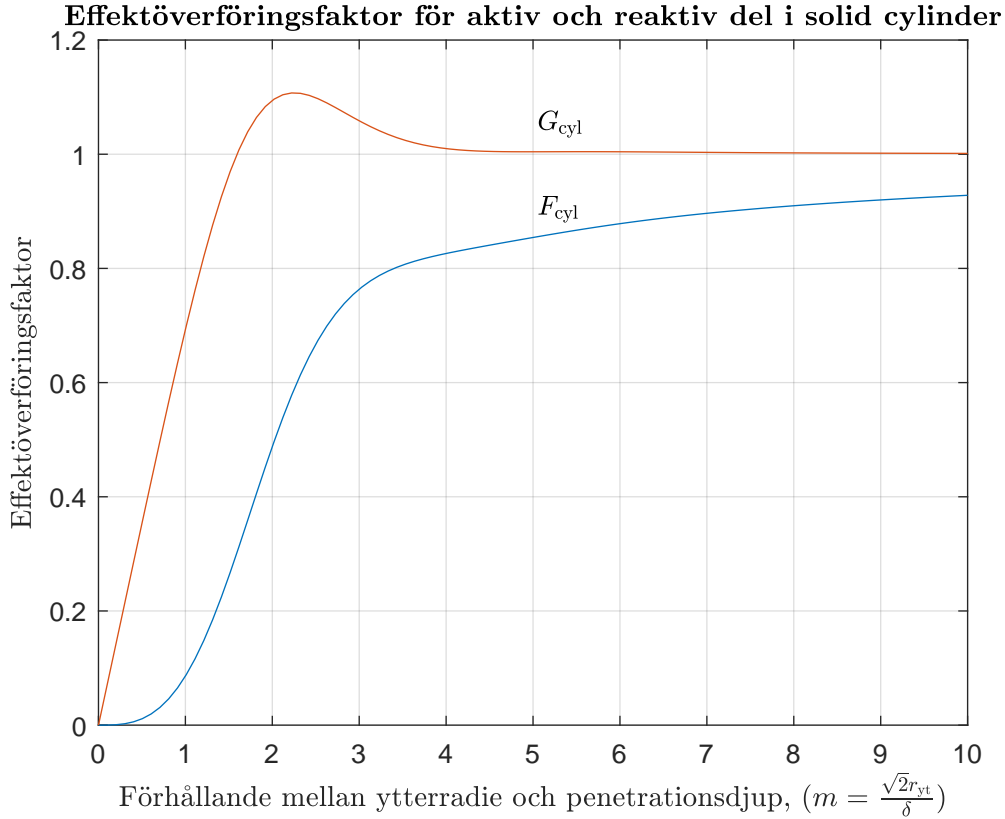
Randvilkoren kan sedan bestämmas via utnyttjandet av  $\xi$  tillsammans med faktumet att  $H$ -fältet är känt vid dess yta,  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\text{yta}}$  när  $\xi = 1$  och att magnetfältet i cylinders center inte går mot oändligheten,  $\mathbf{H} \neq \infty$  när  $\xi = 0$ . Konstanten  $\mathbf{C}_2 = 0$  fås genom det senare villkoret då  $Y_0(0) = -\infty$  och det tidigare ger  $\mathbf{C}_1 = \frac{\mathbf{H}_{\text{yta}}}{J_0\sqrt{-jm}}$ . Med de framtagna konstanterna kan då ekvationerna för momentanvärdena för  $H$ ,  $E$  och  $J$ -fälten vid olika radiella positioner ges i ekvationerna (2.54), (2.55) samt (2.56) via ovan nämnda samband [31].

$$H = \frac{H_{\text{ytaam}} J_0 \sqrt{-jm} \xi}{J_0 \sqrt{-jm}} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.54)$$

$$E = \frac{\rho \sqrt{-j^2} H_{\text{ytaam}} J_1 \sqrt{-jm} \xi}{\delta J_0 \sqrt{-jm}} \quad (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.55)$$

$$J = \frac{\sqrt{-j^2} H_{\text{ytaam}} J_1 \sqrt{-jm} \xi}{\delta J_0 \sqrt{-jm}} \quad (\text{A} \cdot \text{m}^{-2}). \quad (2.56)$$

Ekvationerna (2.55) samt (2.56) kan förenklas genom att skriva om besselekvationerna och den komplexa faktorn till ett reellt och imaginärt uttryck,  $F_{cyl}$  samt  $jG_{cyl}$ , se ekvation (2.57). Fördelning och storlek på de två effektöverföringsfaktorerna beroende på cylinderns ytterrädie förhållande till penetrationsdjupet visas i Figur 2.11 med en tydlig peak för den reaktiva effekten vid drygt två stycken penetrationsdjup.



**Figur 2.11:** Effektöverföringsfaktor för aktiv respektive reaktiv effekt. Observera den initialt stora skillnaden i reaktiv och aktiv effekt som avtar med ökad cylinder-radie.

$$\frac{\sqrt{-j^2} J_1 \sqrt{-jm\xi}}{J_0 \sqrt{-jm}} = F_{cyl} + jG_{cyl}. \quad (2.57)$$

Från ekvation (2.28) kan sedan medeleffekten för ett sinusdialt tidsberoende beräknas. Vid dess yta fås det totala energiflödet för den solida cylindern i ekvation (2.58) som ger det totala flödet då all energi som penetrerar ytan tas upp av kroppen [31].

$$S_{ytcyl} = \frac{H_{yta}^2 \rho}{2\delta} (F_{cyl} + jG_{cyl}) \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)}. \quad (2.58)$$

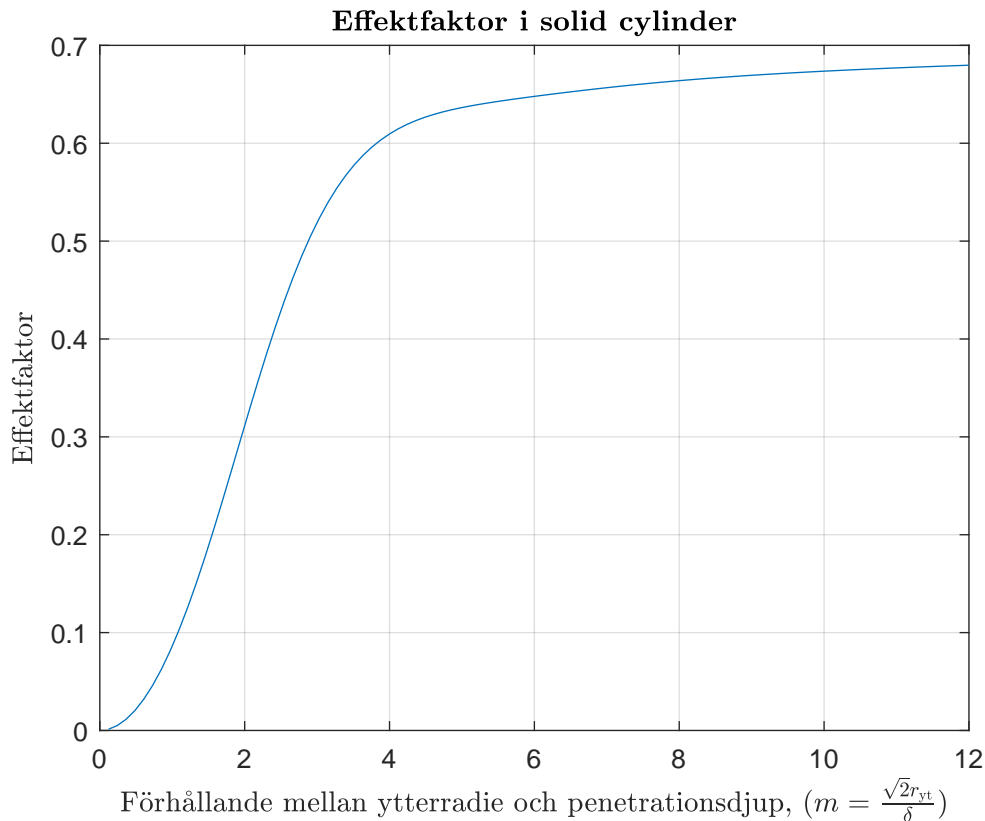
Som tidigare nämnt ges uppvärmningen av den reella, aktiva, delen av Poyntinguttrycket och därmed fås ekvation (2.59) via utnyttjandet av samma omskrivning som i ekvation (2.49) för värmningen per ytenhet.

$$P_{cyl} = \frac{H_{yta}^2 \rho}{2\delta} F_{cyl} = 2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{N}{L} \cdot I\right)^2 \cdot \sqrt{\rho \mu_r f} \cdot F_{cyl} \text{ (W)}. \quad (2.59)$$

För att förenkla ytterligare vid beräkningar kan uttrycket i ekvation (2.59) förlängas med  $2\pi r_e$  för att ersätta effekt per cylinderyta till effekt per cylinderlängd. Effektfaktorn vid antagande av förlustfri överföring ges av ekvation (2.60),

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{G_{\text{cyl}}}{F_{\text{cyl}}}\right)^2}}, \quad (2.60)$$

där sedan förhållandena mellan  $F_{\text{cyl}}$  och  $G_{\text{cyl}}$  beroende på  $m$  varierar vid tunnare elektromagnetiska egenskaper för att sedan stabiliseras runt 0,707, se Figur 2.12 [31].



**Figur 2.12:** Effektfaktor som funktion av yterradien för en solid cylinder. Observera den initialt lägre uppvärmningen vid mindre radier för att därefter öka och stabiliseras efter ca fyra penetrationsdjup.

### 2.1.8 Ferromagnetiska cylindrar

Vid solida ferromagnetiska cylindrar ökar oftast det magnetiska flödet  $H$  in mot cylinderns mitt medan permeabiliteten minskar vid vissa förutsättningar [32]. För att approximera den relativa permeabiliteten kan ekvation (2.61) användas där  $K$  samt  $\alpha$  är materialkonstanter [32].

$$\mu_r = K \cdot H^\alpha \cdot \text{m}^{-1}. \quad (2.61)$$

Beroende på värdet av  $m_{\text{yt}}$  används olika approximationer men när  $m_{\text{yt}} > 3$  kan den aktiva och reaktiva komponenten approximeras genom den semi-infinita kroppens

excitering vid planvågor tillsammans med en faktor vilket ger ekvationerna (2.62) samt (2.63).

$$f_{\text{semiakt}}(n) = \sqrt{2}(1 + \frac{\alpha}{2})^{-0,25} \cdot (2 + \frac{\alpha}{2})^{-0,5}. \quad (2.62)$$

$$f_{\text{semireakt}}(n) = f_{\text{semiakt}}(n) \cdot (1 + \frac{\alpha}{2})^{0,5}. \quad (2.63)$$

Med uttryck för dessa approximationer kan sedan delarna i Poyntingvektorn,  $F_{\text{ferrocyl}}$  och  $G_{\text{ferrocyl}}$ , approximeras genom ekvation (2.64) och (2.65).

$$F_{\text{ferrocyl}} \approx (1 - \frac{1}{\sqrt{2}m_2}) \cdot f_1. \quad (2.64)$$

$$G_{\text{ferrocyl}} \approx f_2. \quad (2.65)$$

För typiska ferromagnetiska material exempelvis kolstål och jämförelser mot material med konstanta permeabiliteter ger den ferromagnetisk en större koefficient och även effektfaktor, speciellt vid högre  $m_{\text{yt}}$  [32].

### 2.1.9 Rör

Induktion i rör baseras på samma ekvationer som vid solida cylindrar med skillnaden att det även existerar ett internt elfält inuti röret [33]. Lösningen till Maxwells ekvationer är initialt samma som vid en solid cylinder, ekvation (2.52). Därefter skiljer sig uttrycken åt då fälten i rörets inre ihållighet ger upphov till en reflekterad våg och  $C_2$  kan inte sättas till noll [33]. Genom randvilkoren där magnetfälten på den externa ytan,  $H_{\text{ytex}}$  samt interna ytan  $H_{\text{ytin}}$  är kända, kan koefficienterna beräknas via substitution och detta ger ekvation (2.66) för  $C_1$  och ekvation (2.67) för  $C_2$ . Observera att  $m_{\text{ytex}}$  samt  $m_{\text{ytin}}$  är  $m$  med externa eller interna ytradie av röret samt att uttrycken ger direkta skaläruttryck analoga med ekvationerna (2.54), (2.55) samt (2.56).

$$C_1 = \frac{H_{\text{ytex}}Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - H_{\text{ytin}}Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.66)$$

$$C_2 = -\frac{H_{\text{ytex}}J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - H_{\text{ytin}}J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytex}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.67)$$

insatt i ekvationerna (2.52), (2.53) fås ekvationerna (2.68), (2.69) och (2.70) för  $H$ ,  $E$  respektive  $J$  där sambandet  $\mathbf{J} = \frac{\mathbf{E}}{\rho}$  återigen har utnyttjats.

$$H = H_{\text{ytex}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} - H_{\text{ytin}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.68)$$

$$E = \frac{\sqrt{-2j\rho}}{\delta} \left[ H_{\text{ytin}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} - H_{\text{ytin}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} \right] (\text{V} \cdot \text{m}^{-1}). \quad (2.69)$$

$$J = \frac{\sqrt{-2j}}{\delta} \left[ H_{\text{ytin}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} - H_{\text{ytin}} \frac{J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} \right] (\text{V} \cdot \text{m}^{-2}). \quad (2.70)$$

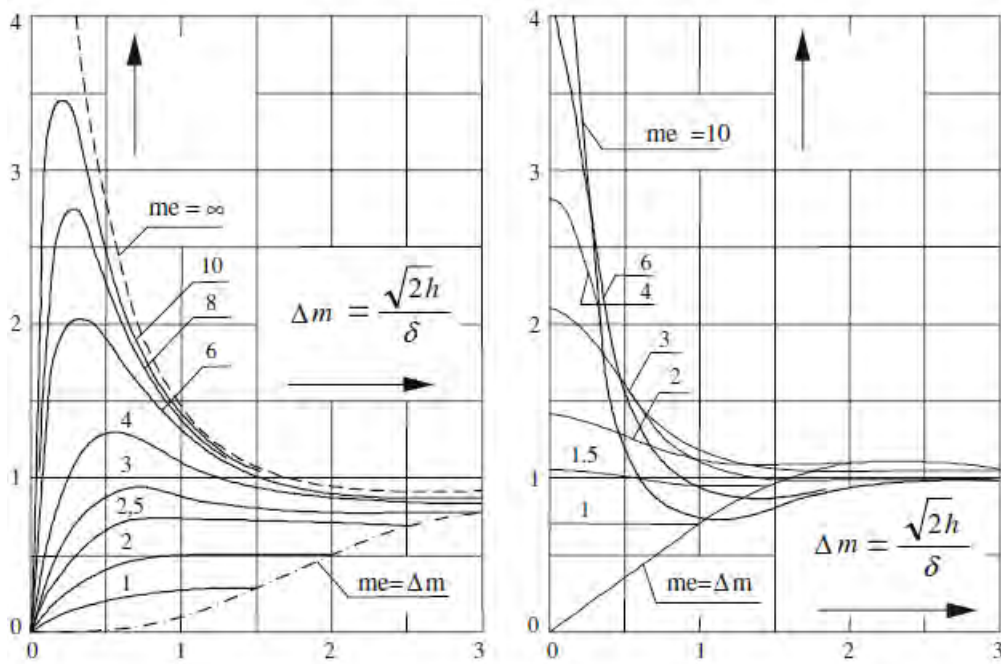
Den interna magnetiska flödestätheten  $H_{\text{ytin}}$  kan sedan relateras direkt till den externa genom sambandet i ekvation (2.71) [33]. Här skiljer sig även uttrycken beroende på om en intern induktans används eller ej. Vid enbart en extern induktans är det interna magnetfältet konstant och kan ges av ekvation (2.71) [33].

$$H_{\text{ytin}} = \frac{H_{\text{ytin}}}{\pi m_{\text{ytin}}^2 (J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}))} \cdot \frac{2j\mu}{J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) + J_1(\sqrt{-j}m_r)Y_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}}) - Y_1(\sqrt{-j}m_r)J_0(\sqrt{-j}m_{\text{ytin}})} (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (2.71)$$

Med detta kan nu återigen uttrycket i ekvation (2.58) utnyttjas med skillnaden att de aktiva och reaktiva effektöverföringsfaktorerna,  $F_{\text{rör}}$  och  $G_{\text{rör}}$  härleds från ekvationerna presenterade ovan. Till skillnad från det cylindriska fallet beror här faktorn även på kvoten mellan tjockleken på röret och penetrationsdjupet,  $\frac{\sqrt{2}h}{\delta}$ . Maximum inträffar när kvoten är ca  $\frac{2}{5}$  och där ökad  $m_{\text{ytin}}$  ger såväl större effektsöverföringsfaktor som effektfaktor. Beräkningar av effektfaktorn sker analogt med ekvation (2.60) med utbytta faktorer [33]. . Se Figur 2.13.

### 2.1.10 Ferromagnetiskt rör

För ferromagnetiska rör där penetrationsdjupet är tillräckligt stort för att kunna approximeras som en cylinder kan den ferromagnetiska påverkan approximeras med samma ekvationer som för den ferromagnetiska solida cylindern [34]. Däremot uppstår icke-analytiska lösningar när  $\delta$  går mot ungefärliga tjockleken på materialet. Med andra ord varierar området där tjockleken ses som elektromagnetisk tjock eller tunn. Definitionen av elektromagnetiskt tunn respektive tjock sker genom kvoten mellan godstjockleken gentemot penetrationsdjupet,  $\frac{h}{\delta}$ . När  $h > 6\delta$  kan materialet ses som elektromagnetiskt tjock då i princip 100 % av effekten stannar i materialet från insättande av sex penetrationsdjup i (2.49) men även  $h > 3\delta$  kan ibland ses som elektromagnetiskt tjockt [27] [35].



**Figur 2.13:** Effektflödesfaktorerna som funktion av kvoten mellan tjocklek på arbetsgodset,  $h$  och penetrationsdjup,  $\frac{\sqrt{2}h}{\delta}$ . Observera den tydliga spiken för den aktiva effekten (vänster) vid ett förhållande på  $\frac{\sqrt{2}h}{\delta} \approx \frac{2}{5}$ . Figur från Induction and Direct Resistance Heating [33]

Om detta däremot inte uppfylls kan materialet ses som elektromagnetiskt tunt. Vid exempelvis en tjocklek som motsvarar ungefär ett penetrationsdjup eller lägre absorberas inte delar av fältet och materialet börjar bli elektromagnetiskt transparent. Det innebär att fälten inte påverkar materialet lika mycket och därmed minskar uppvärmningen. Vid elektromagnetiskt tunna material penetrerar fältet djupare och mer homogent till priset av minskad energieffektivitet då en större andel av fältet ligger utanför materialet [35].

Vid dessa tillstånd kan inte heller den ferromagnetiska egenskapen utvärderas analytiskt utan istället används numeriska metoder via simuleringsprogram, exempelvis COMSOL för att simulera effekterna [34].

### 2.1.11 Effektivitet och förluster för enkellagrig solenoidspole

Ett induktionssystemets totala energieffektivitet beror på en mängd faktorer som baseras på icke-ideal verklighet. System kan exempelvis effektiviseras med kylning och isolering men i själva spolfallet finns en grundläggande effektfaktor. Som tidigare nämnt finns ett antal olika effekter där skineffekten, närhetseffekten, ringeffekten, ändeffekter och platseffekter spelar roll [27]. Yteffekten samt närhetseffekten kan öka förlusterna genom ekvation (2.27). Tillsammans med spåreffekten innebär att vid

uppvärmning av material är även kopplingsdistansen central då närmare avstånd ger upphov till mer strömmar i arbetsstycket och därmed högre effekt vid värmning [27].

Med dessa effekter kan ett uttryck för den elektriska effektiviteten,  $\eta_r$  ges genom ekvation (2.72)[27]. Anmärk att antaganden om i en solid cylinder med en tydlig yteffekt och enkelvirad solenoidspole med elektromagnetisk tjock kopparledare som inte är placerad i närheten av elektroniskt ledande material, approximativt för att ekvationen skall gälla.

$$\eta_r = \frac{1}{1 + \frac{D_{Si} + \delta_{Spole}}{D_{Ry} - \delta_{rör}} \sqrt{\frac{\rho_{Spole}}{\rho_{rör} \mu_r}}} \quad (2.72)$$

uttrycken med  $D_{Si}$  samt  $D_{Ry}$  ger med användandet av penetrationsdjupet dess effektiva diameter. Den andra faktorn ger förhållandet mellan spolens och rörets resistivitet [27]. Detta ger då en total uppskattning för förlusterna i spolen genom uppvärmning och liknande i spolen [27]. Detta uttryck kan även användas för att approximera förlusterna vid ett elektromagnetiskt tjockt rör även om effekten blir något sämre. Detta så länge inte strömmarna vid den yttre och inre ytan påverkar varandra till större grad och därmed kancellera varandra. Vid sådana situationer ökar förlusterna men uttrycket i ekvation (2.72) kan användas som en guide för att minimera förluster och approximera ett övre tak av eleffektivitet analytiskt.

## 2.2 Värmeöverföring via inducerat arbetsstycke

Det finns fyra olika primära typer av värmeöverföring: konduktion, konvektion, förångning samt strålning [36]. Vid värmeöverföring från ett uppvärmt ihåligt arbetsstycke, exempelvis rör, till ett objekt i denna hållighet sker värmeöverföringen främst genom strålning och konduktion beroende på temperaturområdet men systemet påverkas också av konvektion som kyler spole och arbetsstycke. Systemet tillåter då att även icke-magnetiska material som är mindre lämpade för induktion kan värmas genom induktion genom en intermediär.

Värmeöverföring via konduktion sker när ett material har en högre temperatur och är i kontakt med ett material med lägre temperatur. Värmekonduktion kan matematiskt beskrivas genom ekvation (2.73) där  $Q$  är den totala värmeenergin. Hastigheten  $\frac{Q}{t}$  ges sedan av vänsterledet som beror på temperaturskillnaden mellan  $T_1$  och  $T_2$ , kvoten mellan arean och tjockleken  $\frac{A}{d}$  som överföringen sker över och en värmeledningsförmåga  $\kappa$  som är ett mått på hur lätt eller svårt värme färdas i materialet [36].

$$\frac{Q}{t} = \frac{\kappa A (T_1 - T_2)}{d} \text{ (W)}. \quad (2.73)$$

Förutom konduktion kan även värmning ske genom strålning. Strålningen är i detta fall elektromagnetisk infraröd och värmeenergin överförs genom att ett objekt emitterar strålningen som sedan absorberas av ett annat objekt. Processen kan initialt

beskrivas genom svartkroppsstrålning där den överförda värmen per tidsenhet,  $\frac{Q}{t}$  ges av ekvation (2.74) där en svart kropp antas omsluta en annan kropp [37].

$$\frac{Q}{t} = \epsilon \sigma A (T_{\text{varm}}^4 - T_{\text{kall}}^4) \text{ (W)}. \quad (2.74)$$

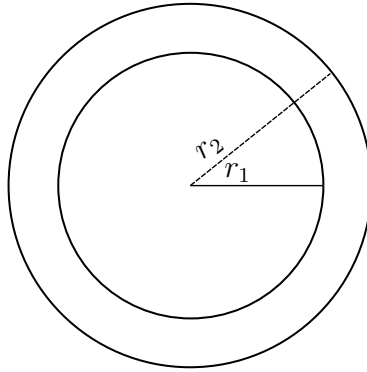
Konstanten  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$  är Stefan-Boltzmanns konstant och  $\epsilon$  är en emissionsfaktor. Denna är mellan noll och ett och representerar hur väl objektet emitterar strålning. En perfekt svartkropp har en emissionsfaktor på ett och en perfekt reflekterande kropp har en emissionsfaktor på noll [37]. Kroppar mellan dessa två fall kan kallas gråkroppar om också  $\sigma$  är oberoende av våglängden [37].

När en emitterad våg sedan träffar en annan kropp kan vågen absorberas eller reflekteras samt även transmitteras för transparenta material. Antaganden i följande teori är dessutom att kroppen är icke-transparent och vinkeloberoende. Energibevaring ger att den instrålade mängden energi är ekvivalent med summan av den absorberade och reflekterade energin,  $E_{\text{in}} = E_{\text{abs}} + E_{\text{ref}}$ . Absorptionen är också oftast oberoende på temperaturen på materialet som absorberar men däremot beroende på materialet som emitterar, vilket ger att samma material vid samma temperatur kan ha olika absorptionskoefficienter,  $\alpha_1 \neq \alpha_2$  [37]. Vid jämvikt kan Kirchhoffs strålningslag användas som säger att  $\epsilon = \rho$  men denna approximation försämrats desto större temperaturskillnaden mellan ytan och källan är och runt 100 K är den oanvändbar [37]. Beteenden vid dessa temperaturer är sammanlänkade med material, exempelvis cement och trä i absorption vid en ökad temperaturskillnad medan vissa plaster ökar [37] [38]. Likväl kan absorptionen för olika ljus öka samt minska. Exempelvis kan IR-absorptionen minska medan absorptionen för hela synligt ljus kan öka [38]. Vid mat kan sedan emissionen och absorptionen förändras under processen genom att exempelvis grillyta tillkommer. Mat har överlag en koefficient på  $\epsilon = 0,95 - 0,98$  och specifikt rå kyckling har ungefär en koefficient på  $\epsilon = 0,91$  för mellan infraröda regionen medan den tillagade  $\epsilon = 0,68$  och en icke-linjär process där emellan [39] [40]. Denna koefficient kan sedan i sig förändras beroende på materialet. Ökad temperatur kan innebära ökad emission då molekylernas kinetiska energi ökar vilket kan innebära ökad temperatur [41].

Transienta förlopp innebär i sin tur att emissionen och absorptionen är olika där exempelvis en absorption högre än emission innebär att energi tillförs kroppen och därmed ökar den i temperatur eller tvärtom. Med andra ord är faktorerna beroende av varierande värden och processerna behöver undersökas empiriskt för att få rätt koefficient vid en specifik användning och tillvägagångssätt för uppvärmning [39].

Förutom emission och absorptionskoefficienter spelar även synfaktorn  $F_{ij}$  en roll i andelen överförd strålning från objekt  $i$  till objekt  $j$ . Denna faktor baseras på geometrin och ger ett mått på hur stor andel strålning som når ytan av objektet som strålas [42]. Två infinita plan parallella mot varandra har då synfaktorerna,  $F_{12} = 1$  och  $F_{21} = 1$  då varandras synfält är helt fyllda av den andra ytan. Subskripten ger i sin tur från vilken yta perspektivet utgår ifrån och vilket objekt som synvinkel dras till [42]. Faktorerna är som nämnt helt geometriberoende och varierar beroende på konstellationer men för exempelvis koncentriska cylindrar beskrivs synfaktorerna i





**Figur 2.14:** Synfaktor för koncentriska cylindrar där  $r_1 < r_2$ .

ekvation (2.75) med ytorna enligt Figur 2.14 [42].

$$F_{12} = 1, F_{21} = r, F_{22} = 1 - r. \quad (2.75)$$

Med gråkroppar och synfaktorerna kan nu ekvation (2.74) skrivas om med korrekationer vilket ger ekvation (2.76) för uttrycket av värmeenergiöverföringen mellan två ytor där den totala strålningen för varje yta ges av summan av den emitterade värmen samt den reflekterande där  $E_{bi} = \sigma T_i^4$  [42].

$$\frac{Q}{t} = A_i F_{ij} (\epsilon_i E_{bi} + \rho_i G_i - \epsilon_j E_{bj} + \rho_j G_j) \text{ (W)}. \quad (2.76)$$

Ekvationen (2.76) ger den överförda strålningen men från att absorberas via ytan kan olika typer av strålning penetrera olika djup. Inträngningsdjupet för elektromagnetisk strålning baseras på Beer-Lamberts lag i ekvation (2.77) där intensiteten vid ett visst djup  $z$  beskrivs genom en attenueringskonstant  $\alpha$  som är ett mått på hur mycket strålningen avtar i när den färdas i materialet [43].

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}. \quad (2.77)$$

Attenuationskonstanten är primärt materialberoende men kan också variera beroende på temperatur. Denna konstant kan beräknas via ekvation (2.78) där den komplexa relativa dielektriska konstanten används  $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$  med  $\epsilon'$  är den reella delen och även kallad den dielektriska konstanten och den imaginära delen  $\epsilon''$  även kallas dielektriska förlustfaktorn [44]. Dessa två komponenter kan sedan utnyttjas i attenuationsformeln som ger attenuationskonstanten genom ekvation (2.78) [44].

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\frac{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1} \text{ (Np/m)}. \quad (2.78)$$

Med ekvation (2.78) i kombination med ekvation (2.77) kan då värmefördelningen vid värmeöverföring genom strålning ges som en funktion av materialens dielektriska egenskaper. Vid exempelvis mat kan dessa förändras vid tillagning genom att vatten avdunstar eller att materialet ändrar egenskap på andra sätt [44].

Den tredje formen av värmeöverföring är så kallad konvektion. Denna typ av överföring innebär att exempelvis luft eller andra fluider blandas eller ersätts av fluider

med annan temperatur [45]. Denna process kan vara fri eller forcerad där det senare innebär att processen forceras att genomgå konvektion. Exempelvis hur en fläkt tvingar luft att färdas snabbare. Uttrycket för värmeöverföring via konvektion mellan en yta och en fluid ges av ekvation (2.79) där  $\alpha$  är värmeövergångstalet som beror på strömningsförhållandena och  $T_y$  samt  $T_{om}$  ytan respektive den omgivande fluiden [27].

$$\frac{Q}{t} = \alpha(T_{yta} - T_{om}) \text{ (W)} \quad (2.79)$$

Ekvation (2.79) används som grund för att beräkna värmeöverföringen via konvektion men vid beräkningar kan formler för specifika geometrier användas för grova uppskattningar, exempelvis ekvation (2.80) för fri konvektion vid solida cylindrar eller simuleringsprogram för en mer precis process [27].

$$\frac{Q}{t} = 1,86(T_{yta} - T_{om})^{1,3} \text{ (W)} \quad (2.80)$$

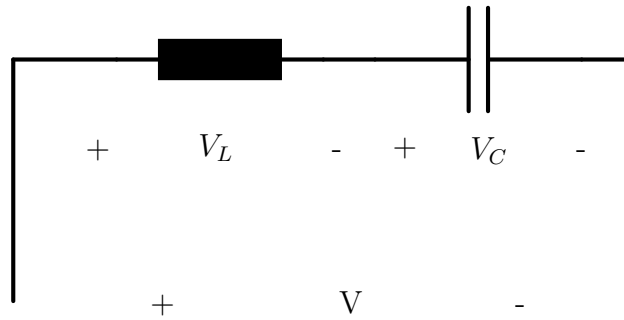
## 2.3 Korvkoeficienter och materialkonstanter

Det finns en rad olika korvar där ingredienserna spelar en stor roll för korvens egenskaper och för exakta värden behöver korven i sig mätas men för grova uppskattningar finns vissa förenklingar att göra. För uppvärmningssyften kan en köttkorv av fläsk eller nötkött uppskattas ha en specifik värmekapacitet på 2,38-3,35 J/g och en vegetarisk korv lägre om protein- och fettinnehållet är lägre [46] [47] [48]. I sin tur kan även dess värmekonduktivitetskonstant uppskattas till  $k \approx 0,52 \text{ W/mK}$ [47].

Den dielektriska konstanten och dielektriska förlustfaktorn beror såväl på temperatur som på frekvens och behöver mätas för specifika våglängderna som används. Övre tak uppskattas genom forskning på dielektriska koeficienter vid mikrovågsstrålning där  $\epsilon' \approx 30$  och  $\epsilon'' \approx 15$  mellan 900-2500 MHz vilket med en avtagande trend för högre frekvenser ger ett övre tak för det infraröda bandet som börjar vid ca 300 GHz [49] [50]. Däremot kan korven ses som icke-ferromagnetisk med  $\mu_r = 1$ . För vidare detaljer kan innehållsförteckningen användas i kombination med de uppskattade värden för proteiner, kolhydrater, lipider och vatten för att uppskatta produkterna mer precist utan användandet av experimentell data [48].

## 2.4 LC-tank

I en AC-krets kan resonans uppstå då kretsen innehåller induktiva och kapacitiva komponenter. En LC-tank består av en induktiv komponent och en kapacitiv komponent [51]. En seriekopplad LC-tank visas i Figur 2.15.



**Figur 2.15:** Kretschema över en seriekopplad LC-tank.

Den totala spänningen över komponenterna kommer alltid att vara den samma som summan av spänningen över de enskilda komponenterna,  $V = V_L + V_C$ . Dock kan spänningen över en enskild komponent vara större än den totala spänningen om spänningen över den andra komponenten är motriktad. Induktiva komponenter försöker förskjuta spänningen  $90^\circ$  före strömmen och kapacitiva förskjuter spänningen  $90^\circ$  efter strömmen. Det medför att spänningen över den induktiva komponenten kommer vara  $180^\circ$  före den kapacitiva komponenten. Den induktiva delens impedans fås ur ekvation (2.81) och ekvation (2.82) visar den kapacitiva delens impedans.

$$X_L = 2\pi fL \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.81)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (2.82)$$

Den totala impedansen för en resonanskrets blir då som visas i ekvation (2.83).

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.83)$$

Då de båda komponenternas impedanser är frekvensberoende, vilket syns enligt ekvationerna (2.81) och (2.82), uppstår en frekvens där de imaginära delarna tar ut varandra vilken kallas för resonansfrekvens. När de imaginära delarna tar ut varandra kan resonansfrekvensen lösas ut vilket visas i ekvation (2.84). Vid den frekvensen har de båda komponenterna tillsammans varken induktiv eller kapacitiv karaktär. Det medför att spänningen kommer vara förskjuten  $180^\circ$  över de båda komponenterna vilket kommer resultera i resonans. Enbart aktiva förluster återstår då vid resonansfrekvensen eftersom de reaktiva tar ut varandra.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (Hz)} \quad (2.84)$$

## 2.5 Q-värde

Q-värdet, även ibland kallat Q-faktor eller godhetstalet Q, används ofta i system som är lätt dämpade då det är ett mått på frekvenskänsligheten[52]. Definitionen av

Q-faktorn är kvoten mellan den energi som maximalt laddas upp i en resonanskrets och förlusterna under en period[51]. För en spole anses Q-värdet vara kvoten mellan induktiv impedans och resistans enligt ekvation (2.85).

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (2.85)$$

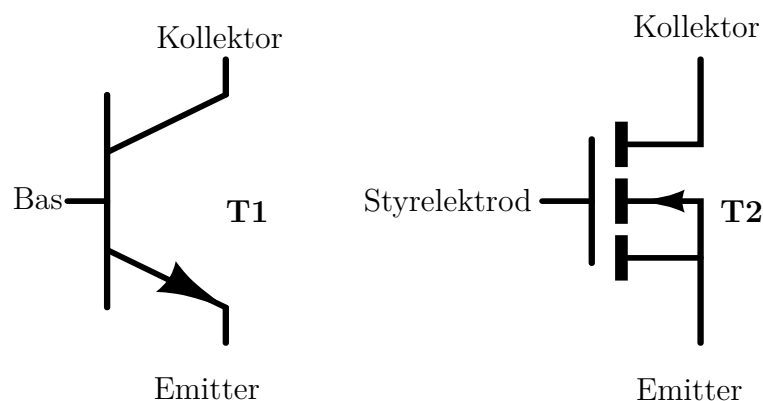
Ekvation (2.85) kan skrivas om genom insättning av ekvationen för beräkning av resonansfrekvensen (2.84) vilket ger ekvation (2.86).

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.86)$$

För en spole kan sedan ett maximalt Q-värde uppnås när förhållande mellan spolens diameter och halvlängdsförhållande på 2,46 [53].

## 2.6 Transistorer

En transistor är en halvledarkomponent som har ett brett användningsområde men vanligtvis används den som strömbrytare[54]. Huvudgrupperna som transistorer delas in i är bipolära- och fälteffekttransistorer. Se Figur 2.16 för en schematisk bild av båda sorter. Oavsett vilken typ av transistor det är bygger principen på att en styrsignal kopplas till basen eller styrelektroden och när en tröskelnivå har uppnåtts kan en ström gå mellan kollektorn och emmitern.



**Figur 2.16:** En BJT, T1, och en MOSFET, T2, med deras in och utgångar.

### 2.6.1 Bipolära transistorer

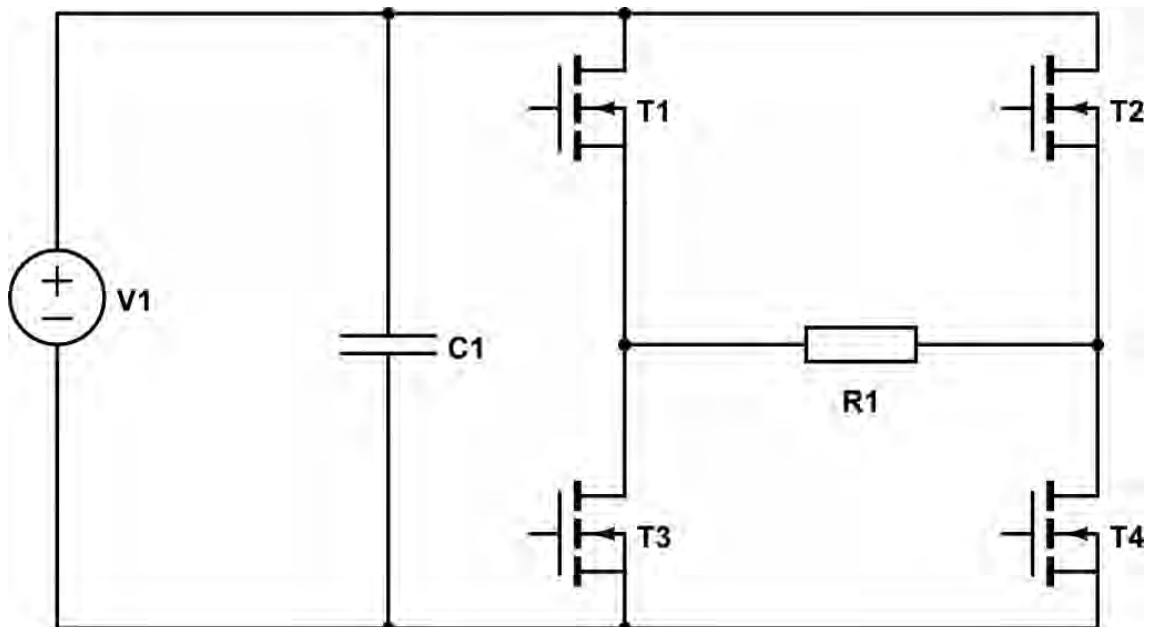
En BJT har tre elektriska anslutningar som kallas bas, emitter och kollektor [55]. Då BJT:s är strömstyrda krävs det en viss strömnivå in till basen för att det ska leda mellan emittorn och kollektorn. BJT:s har omkopplingstider i intervallet några hundra nanosekunder upp till några mikrosekunder [56].

### 2.6.2 MOSFET

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, även kallat MOSFET är en typ av fälteffekttransistorer [57]. Den här typen av transistorer har en styrelektrod, en emitter och en kollektor. Styrelektroden är isolerad från övriga delar i transistoren med ett lager av kiseldioxid. Då spänningen på styrelektroden överstiger tröskelspänningen börjar det leda mellan emitter och kollektor. Omkopplingstiden för MOSFET:s ligger vanligtvis mellan tiotals nanosekunder upp till hundratals nanosekunder [56].

## 2.7 Växelriktare

Växelriktare används för att skapa växelspanning från likspänning. För att styra frekvensen skickas styr signaler till transistorer som sätts på och stängs av. Växelriktare finns i många olika utformningar där två vanliga modeller är halvbyggen och helbyggen [58]. Helbyggen består av fyra transistorer som slår på och av i par medans halvbyggen enbart består av två transistorer. Ett krettschema för en helbyggen går att se i Figur 2.17.

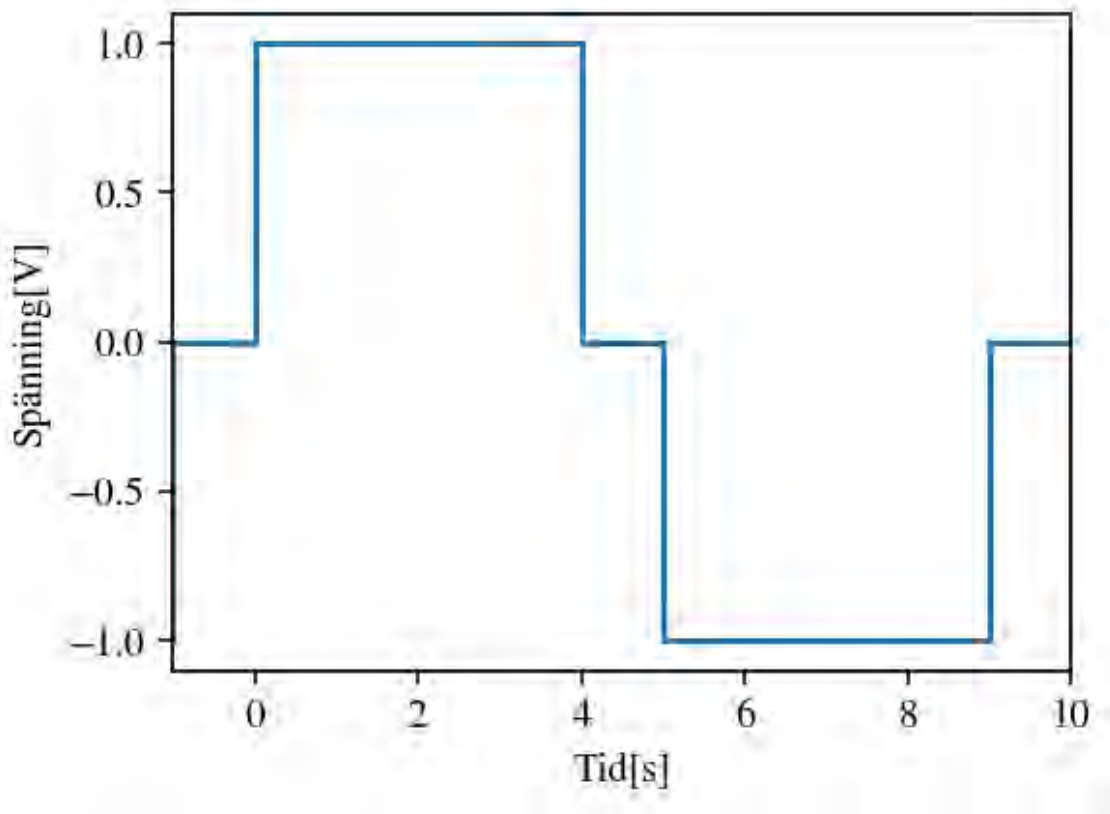


Figur 2.17: Krettschema för en helbyggen.

I Figur 2.17 matas helbyggen med en likspänning. Transistorerna  $T_1$  och  $T_4$  slås på samtidigt vilket gör att en positiv spänning läggs över lasten  $R_1$ . Sedan när  $T_1$

och T4 är avstängda sätts T2 och T3 på vilket medför en negativ spänning över lasten. Detta gör att utsignalen över lasten blir fyrkantsformad i den frekvens som styrsignalerna skickas in till transistorerna. Kondensatorn C1 är till för att minska strömriplet som uppstår då det går ström genom ledaren som transistorn stänger av [59].

För att få en kontinuerlig utsignal från växelriktaren behöver T1 och T4 ha en styrsignal med arbetscykeln 50% samtidigt som T2 och T3 har en arbetscykel på 50% som är inverterad. I praktiken fungerar inte detta då transistorerna har en omkopplingstid vilket kommer leda till en kortslutning en kort stund vid varje omkoppling [60]. För att lösa det problemet kan en dödtid läggas in vilket minskar båda arbetscyklarna. Då blir det ingen kontinuerlig signal men effektiviteten ökar. I Figur 2.18 visas ett exempel på en signal där 20% dödtid har implementerats varje period.



**Figur 2.18:** Fyrkantsvåg med total arbetscykel på 80% med 20% dödtid.

## 2.8 Temperaturmätning

Mätning av temperatur kan göras analogt, där en metalls mekaniska egenskaper utnyttjas för att vid temperaturförändringar expandera eller krympa metallen i ett kärl vilket därefter kan avläsas manuellt [61]. Mätning kan även göras digitalt, då används ett flertal metoder [62]. En av dessa metoder innefattar mätning med en

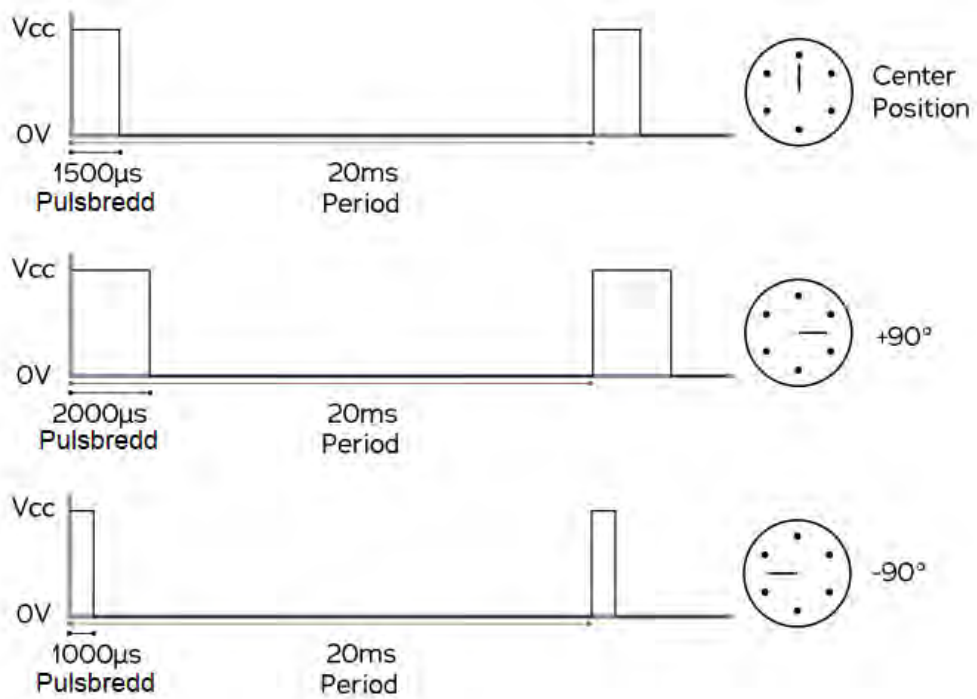
strålningspyrometer. En sådan, även kallad IR-termometer, bestämmer ett föremåls temperatur genom mätning av dess värmestrålning. Ett resultat av detta är att föremålet inte behöver beröras av mätinstrumentet [63].

En annan metod utnyttjar en termistor, som innefattar en resistor vars resistans beror på temperaturen [64]. Genom mätning av spänningsskillnaden kan temperaturen avläsas ur empirisk tabell [64]. Resistorn består ofta av keramik eller polymer vilket skiljer termistorn från en resistanstermometer som bygger på samma princip men istället använder en metallisk resistor [64][65]. En ytterligare metod innefattar ett termoelement bestående av två isolerade metalltrådar av olika material som vid mätpunkten kopplats ihop för att utnyttja Seebeckeffekten [66]. Denna säger att i en krets där två olika metaller är kopplade vid två punkter uppstår en elektromotorisk kraft då temperaturen skiljer sig mellan lödpunkterna [66]. En temperaturskillnad vid mätpunkten ger därför upphov till en mätbar spänningsskillnad. Spänningsskillnaden är linjärt beroende på temperaturskillnaden och metoden kräver ingen extern strömförsörjning [66].

## 2.9 Servomotorer

En servomotor, även kallat servo, är en vanligtvis elektrisk motor med syfte att generera rotation i en jämn hastighet och med precision. Det finns olika typer av servomotorer, t.ex. vinkelservon och kontinuerliga servon [67]. Ett vinkelservo kan rotera till en given vinkel och har intern återkoppling för säkerställa precision. Ett kontinuerligt servo är en servomotor som kan rotera kontinuerligt med en given hastighet [67].

Styrning av servomotorer sker oftast genom PWM - 'Pulsbreddsmodulering'. Det innebär att det skickas en signal till en servomotor med varierande pulsbredd. Storleken på pulsbredden skapar olika vridmoment hos servomotorn. För ett vinkelservo ger olika pulsbredd olika vinklar och för ett kontinuerligt servo ger olika pulsbredder olika hastigheter [68]. I Figur 2.19 ses hur ett vinkelservo styrs med PWM.



**Figur 2.19:** Pulsviddsmodulation för ett vinkelservo. [69] CC BY



# 3

## Metod

Nedan presenteras först i avsnitt 3.1 den process som användes för att ta arbetet från problemformuleringen till ett slutkoncept som sedan tillverkades. Efter det hanteras de materialval som förekom vid realiseringen av de olika komponenterna i avsnitt 3.2 och hur dessa begränsades av de föreskrifter som förekommer vid hantering av livsmedel i avsnitt 3.3. Vidare presenteras hur alla ingående komponenter i slutprodukten utvecklats och tillverkats.

### 3.1 Designprocess

För att säkerställa att problemet blev utförligt analyserat utifrån all funktionalitet och alla krav som önskades från produkten gjordes en kravspecifikation, se Bilaga A.1. Kravspecifikationen utfördes genom individuell reflektion över den nödvändiga samt önskade funktionaliteten av produkten utifrån problemformuleringen. Därefter diskuterades och kombinerades idéerna till en komplett kravspecifikation. För att vidare bestämma ungefärlig prioritet av de bestämda önskemål viktades varje önskemål på en skala.

Med kravspecifikationen som grund inledes en injengörsmässig produktutvecklingsprocess, där första steget utgjordes av en lösningssökning. Utifrån problemformuleringen identifierades alla produktens delproblem och ett processflöde illustrerades, se Bilaga A.1. Dessa användes därefter för att skapa en morfologisk matris, en matris där alla lösningsförslag till varje delproblem listades. Dessa dellösningar genererades genom individuell brainstorming, samt sökning efter existerande lösningar. Utifrån de genererade dellösningarna kunde den Morfologiska matrisen sammanställas, se Bilaga A.2. Vidare genererades tre koncept utifrån matrisen för att sedan kombineras till den slutgiltiga lösningen. Kombinationen av de tre existerande lösningskoncepten framställdes utifrån en avvägning av faktorer såsom kostnad, komplexitet och vikt i kravspecifikationen för att framställa det slutgiltiga konceptet, se Tabell 3.1.

Vid vidare utveckling av koncepten sållades vissa komponenter och andra ändrades från slutkonceptets design. Exempelvis ansågs brödmagasinet vara överflödigt och korbtransportationen sker istället med ett spett. Utifrån de justeringar modellerades slutkonceptet i CAD för att säkerställa att idén var genomförbar med de mått som specificerats i kravspecifikationen samt för att ge en överblick på systemet och dess delsystem genom en sammanställd monteringsmodell. Några av dessa modeller kun-

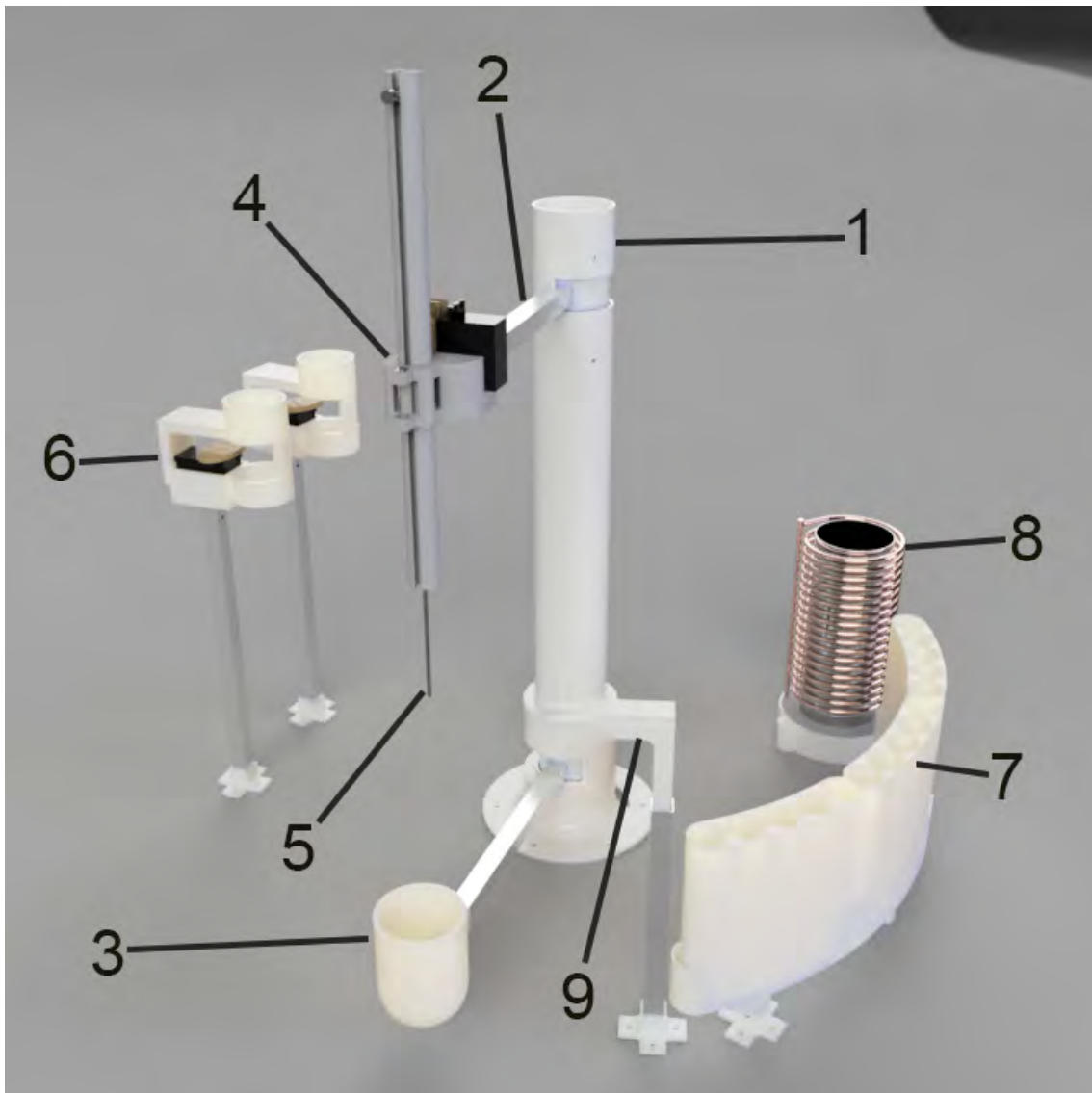
**Tabell 3.1:** Det valda slutkonceptets alla dellösningar.

Delproblem	Slutlösning
Förvara korv	Magasin med fack
Förvara korvbröd	Magasin med fack
Värma korv	Korv i rör (induktion)
Tillsätta dressing	<i>obestämt</i>
Form på konstruktion	Halvcirkel
Välja korv	Två-fackssystem
Välja dressing	Olika stationer
Värma korvbröd	Värmevägg
Gränssnitt	Analoga knappar
Hålla korv i värmning	Robot uppifrån/nedifrån
Presentera färdiga korven	Brödklo
Temperaturmätning	Sticka fäst i korvklon
Montera korv i bröd	Tryck med korvklon
Placera bröd i papper	Manuellt i brödskopan
Transportera korvbröd	Skopa på arm
Transportera korv	Klo på arm

de sedan användas till att tillverka verkliga komponenter i plast med 3D-skrivare. Andra komponenter ställde andra krav på hållfasthet, matsäkerhet eller temperaturlåghet och tillverkades av andra material eller köptes in färdiga. En rendering av den fullt monterade produkten med de olika komponenterna numrerade ses i Figur 3.1 och en lista av komponenterna ses i Tabell 3.2. Hela produkten monterades slutligen på en rullvagn för enkel transportering, ihop med ett analogt gränssnitt där användaren väljer typ av korv och sås samt startar tillagningen.

**Tabell 3.2:** Komponenter i den färdiga produkten.

- 1 | En central baspelare som armar roterar runt.
- 2 | En arm fäst i baspelaren (1), med syftet att transportera korv mellan de olika stationerna.
- 3 | En skopa, med syftet att hålla brödet fastmonterad, på en arm fäst i baspelaren (1), med syftet att transportera bröd mellan de olika stationerna.
- 4 | En korvhiss monterad på korvarmen (2), med förmågan att höja och sänka korven.
- 5 | En sticka på korvhissen (4) som penetrerar korven vilket tillåter den att hissas och samtidigt mäter korvens inre temperatur.
- 6 | Två stationer där olika sås kläms ut ur en spene ned i brödet.
- 7 | Tre korvmagasin som korvarmen (2) hämtar korv ifrån.
- 8 | Ett värmeelement, där korven tillagas.
- 9 | En korvavtagare där korven tas av från stickan (5).



**Figur 3.1:** Rendering av hela produkten med ballonger för att identifiera de olika komponenterna, se Tabell 3.2.

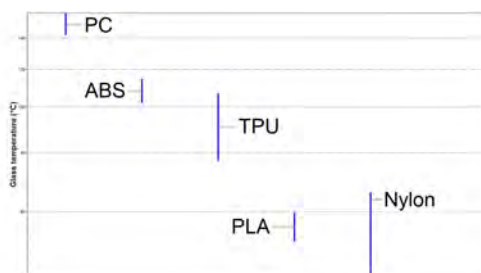
## 3.2 Materialval

Genom arbetets gång skapades en stor och omfattande produkt, bestående av flera olika komponenter. Dessa komponenter skulle uppfylla olika funktioner och utsättas för olika krafter och temperaturer. Därmed skulle dess material ställas inför olika krav. Dessa olika krav var att hantera höga temperaturer (upp till 600 °C), att kunna formas efter önskad design, att vara starka och stabila samt att vara matsäkra. Alla material hade dock ett gemensamt krav på en låg kostnad. Vissa toleranser på kraven förekom vid materialvalen eftersom målet enbart var en prototyp. Därmed var det inte av samma vikt att kraven blev fullständigt tillfredsställda, samt att vissa krav exempelvis gällande produktionsmetod inte ansågs relevanta. Med de bestämda krav i grund tydliggjordes behovet på flera olika material. Nedan beskrivs de material som var tillgängliga under arbetet, följt av en jämförelse av dessa material.

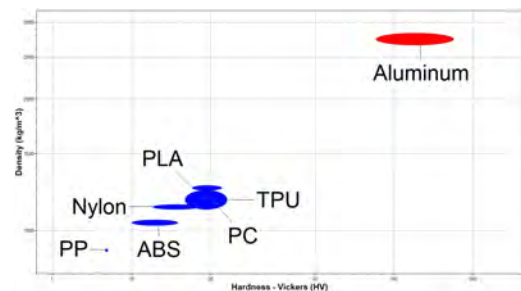
Under arbetet fanns 3D-skrivare samt ett flertal olika plastfilament, plast som 3D-skrivare extruderar, tillgängliga. Då produkten till stor del utgjordes av skraddarsydda komponenter som skulle behöva tillverkas med precision, på kort tid och för ett lågt pris, var dessa material något som ansågs bra för produkten. De filament som valdes att vidare analysera var: PLA, ABS, PC, PP, TPU och Nylon. Vidare ansågs PVC och aluminium vara potentiellt användbara på grund av deras lättillgänglighet och låga pris.

De materialegenskaper som ansågs vara av största vikt var glasövergångstemperatur, densiteten och hårdheten. Glasövergångstemperatur, temperaturen då en polymer övergår från glasartat till gummiartat tillstånd, ansågs viktig gällande de komponenter på kort avstånd från värmeelementet. Hårdheten var av relevans då det krävdes stabilitet samt precision av komponenten. Vidare ansågs densiteten relevant kopplat till hårdheten för att säkerställa att produkten inte översteg viktkravet.

Nedan visas och jämförs ett urval av de möjligtvis lämpliga materialen. Se Figur 3.2 för jämförelse av de olika materialens glasövergångstemperatur och i Figur 3.3 visas materialens densitet gentemot dess hårdhet.



**Figur 3.2:** Jämförelse av materialens glasövergångstemperatur.



**Figur 3.3:** Jämförelse av materialens densitet gentemot hårdhet.

Utifrån jämförelsen redovisad ovan kombinerat med vidare undersökning drogs följande slutsatser. Vid komponenter som kommer i nära kontakt med värmeelementet är PC och ABS rimliga alternativ. Vid komponenter där struktur och stabilitet är av relevans är PVC och aluminium rimliga alternativ [70]. Vid komponenter där det krävs mjukt och flexibelt material anses PP vara det bästa alternativet. Vid resterande komponenter, som inte utsätts för några större krafter eller temperaturskillnader är alla analyserade polymerer förutom PP rimliga alternativ med pris som den avgörande faktorn.

### 3.3 Matsäkerhet

Flera av produktens komponenter kommer att vara i direkt kontakt med mat och med det följer risk för kontaminering och bakteriespridning. Kontamineringsrisken ökar då komponenterna är 3D-skrivna. Detta eftersom att vid 3D-skrivning extruderas plasten ut i tunna lager och mellan dessa lager skapas det tunna skårar där

bakterier lätt kan fastna [71]. För att motverka denna spridning och säkerställa en hygienisk produkt behövdes dessa komponenter matsäkras på något vis.

Tre matsäkrings alternativ analyserades: Acetonslipning, resinbeläggning och silikonbeläggning. Acetonslipning fungerar genom att fräta ner lagerkanterna på 3D-skrivna komponenter. Det hjälper till att minska bakteriespridningen, dock inte tillräckligt för att anses helt matsäkert [71]. Silikonbeläggning fungerar genom att ett tunt lager silikon appliceras på komponenten för att ge ett fulltäckande och lättdiskat lager, vilket minskar bakteriespridningen avsevärt. [71]. Resin fungerar likadant som silikon och med liknande resultat men på grund av enkelheten och tillgängligheten av silikon, valdes det till detta arbete [71].

## 3.4 Baspelare

Som grund till hela det autonoma systemet behövdes en typ av struktur som alla komponenter kunde kopplas samman i. Eftersom hela systemet skulle operera cirkulärt valdes det att använda en cylinder som baspelare.

Baspelaren bestod av ett PVC-rör enligt 3.2 som kapades till en bestämd längd. I röret sågades rektangulära hål för armarna, dessa hål kunde armarna sedan röra sig i, se Bilaga B.15. Armarna kunde rotera i baspelaren med hjälp av ett 'puckpaket'. Puckpaketet bestod av tre stycken 3D-skrivna cylindrar benämnda 'puckar'. Den nedersta pucken benämnd 'servopuck', användes för att montera servot i. Mittpucken benämnd 'rotationspuck', monterades armen i. Den översta pucken benämnd 'stabilitetspuck', har ett kullager för minskad friktion mellan puckarna och används för stabilitet genom att pressa ihop puckpaketet för att undvika oönskade moment skapade av armarna. Se Figur 3.4 för ihopsättning av puckpaketet.

Stabilitetspucken och servopucken tillsammans med ett servo monterades i baspelaren med muttrar och därefter kunde en arm monteras i rotationspucken som sedan monterades mellan stabilitetspucken och servot i servopucken. Detta gav resultat vilket kan ses i Figur 3.5. Baspelaren monterades sedan på en MDF-platta med hjälp av monteringsstrukturen vilken syns i Figur 3.6. Monteringsstrukturen möjliggjorde enkel montering samt stabilitet för baspelaren, vilket krävdes för att uppnå systemets precisionskrav.

## 3.5 Brödsropa

En av produktens nödvändiga funktioner var att transportera ett bröd mellan dess olika stationer. Det fanns flera idéer om hur detta skulle kunna åstadkommas: genom en klo styrd av ett servo som klämmer åt runt brödet, någon elastisk mekanism som klämmer åt när brödet trycks ner, en skopa med flärpar på insidan som anpassar sig något efter brödets form. Anledningen till att det krävdes viss komplexitet i designen var variansen i brödets form och storlek samt hålets placering, se Bilaga A.2, och brödhållaren måste kunna anpassa sig. Det var även kritiskt viktigt att brödet var komplett lodrätt då korven skall penetrera brödet. CAD-modell av brödskopan kan



**Figur 3.4:** Puckpaket med servomotor.



**Figur 3.5:** Puckpaket och arm monterat i baspelare.



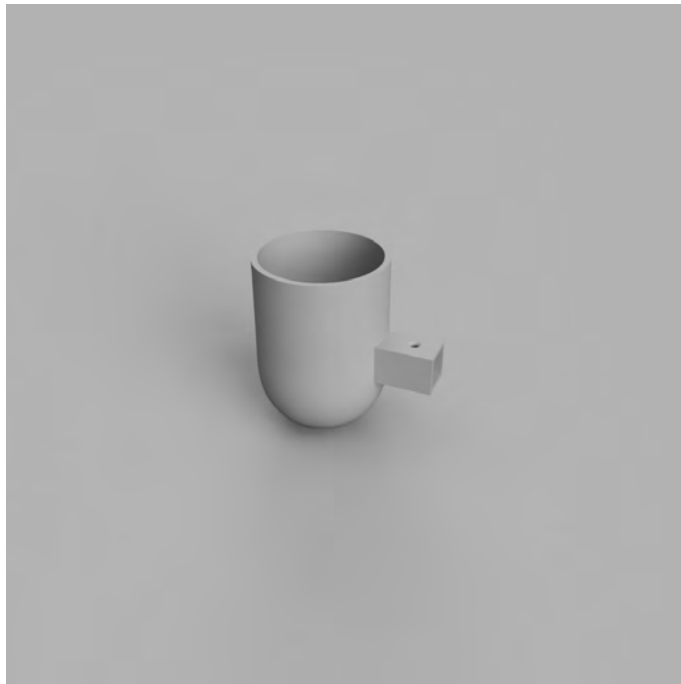
**Figur 3.6:** Baspelare i monteringsstruktur

ses i Figur 3.7.

En cylindrisk skopa som har en större diameter än brödet för att för att få plats med spröt. Sprötens funktion är att centrera samt hålla brödet lodrätt oavsett brödets form och storlek. För att fästa spröten borrades hål i brödskopans överkant där spröten sedan kunde föras genom och limmas fast. För att kunna fästa skopan i baspelarens nedre puckpaket designades ett fäste för armen. Skopan är 3D-skriven och då inga stora krafter kommer påverka skopan valdes PLA som material. Spröten, vilka behövde vara mjuka och flexibla är avklippta bitar av PP-filament. Båda dessa materialval är i linje med rekommendationerna i avsnitt 3.2. Vidare behövdes brödskopan matsäkras då den kommer i direkt kontakt med brödet, detta gjordes med bestämd metod enligt avsnitt 3.3.

## 3.6 Korvhiss

För att möjliggöra upphöjning och nedsänkning av korg i magasin, bröd och induktionsrör behövdes någon typ av 'hiss' för korven. Ett kontinuerligt servo valdes för



**Figur 3.7:** Rendering av brödskopan utan spröt

att hissa upp och ner korven då ett beslut sedan tidigare hade tagits om att basera systemet på servomotorer. Själva hissen designades med CAD, de olika delarna 3D-skrevs ut och monterades sedan ihop så att en cylinder med en kuggstång kunde hissas upp och ner med hjälp av ett kugghjul som monterades på servomotorn. Detta sattes sedan ihop i en struktur som höll ihop allt. För att ge styrdatorn positionssignaler vid hög- och lågpunkt installerades två knappar på hissen som cylindern kunde aktivera. Signalerna från knapparna kunde läsas in i vår styrdator och vid aktiv signal kunde servot stoppas i rätt tillfälle.

Det behövdes fortfarande ett sätt att få korven att följa med cylindern upp och ned. Till detta användes ett termoelement, se avsnitt 3.7, som var utformat som ett spett. Termoelementet monterades i cylindern och kunde därmed spetsa korven vid nedsänkning in i korven. Med hela strukturen klar kunde korven hissas upp och ner när så önskades.

Ett problem kvarstod dock fortfarande. När korven väl var spetsad av termoelementet behövdes det ett sätt att få av korven därifrån när korven skulle serveras. För detta uppfördes en komponent, en 'korvavtagare', som kunde kilas in ovanför korven och hamna runt termoelementet. När korvhissen då kördes upp stannade korven under korvavtagaren och korvhissen kunde köra upp.

## 3.7 Temperaturmätning

För att veta korvens tillagningsgrad under uppvärmningen behövde en termometer användas. Valet föll på att använda ett termoelement typ K. Termoelementet som beskrivs i avsnitt 3.6 fick i syfte att spetsa korven samt mäta temperatur. Datan



**Figur 3.8:** Rendering av korvhissen.

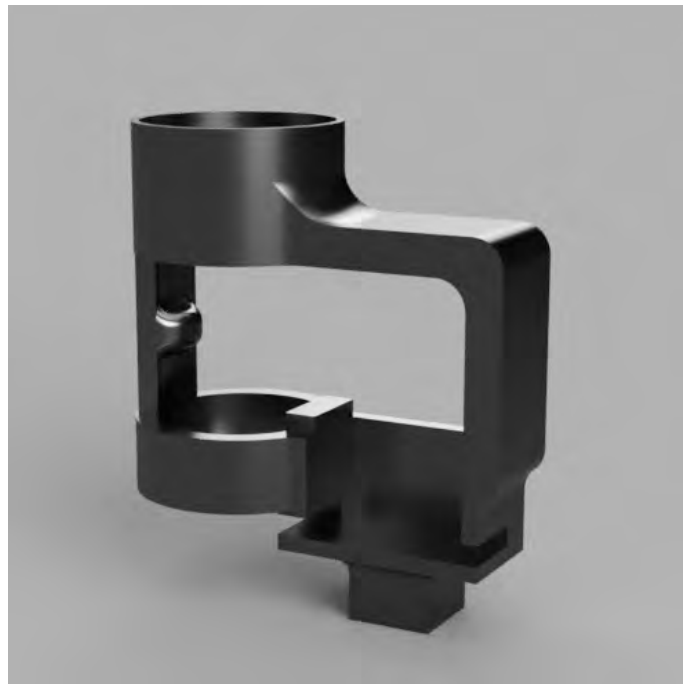
från termoelementet behövde läsas in i styrdatorn för att reglera värmen. Signalen behövde först processeras i en förstärkare som sedan matade ut en digital signal för datorn att läsa. Under värmning avlästes datan från termoelementet med en hög uppdateringsfrekvens för att kontrollera när korven var tillagad. När önskad temperatur var uppmätt ansågs korven tillagad och uppvärmningen avslutades för att bespara energi.

## 3.8 Såsstation

Ett krav på produkten var möjligheten för användaren att välja sås. Såspumpen genomgick flera lösningsmetoder och flera koncept framställdes. Några var följande: användning av tryckluft, vakuüm, vattenpump och ett flertal olika servo-konfigurationer. Det bestämdes att en servodriven klämmekanism på en mjuk behållare skulle vidare



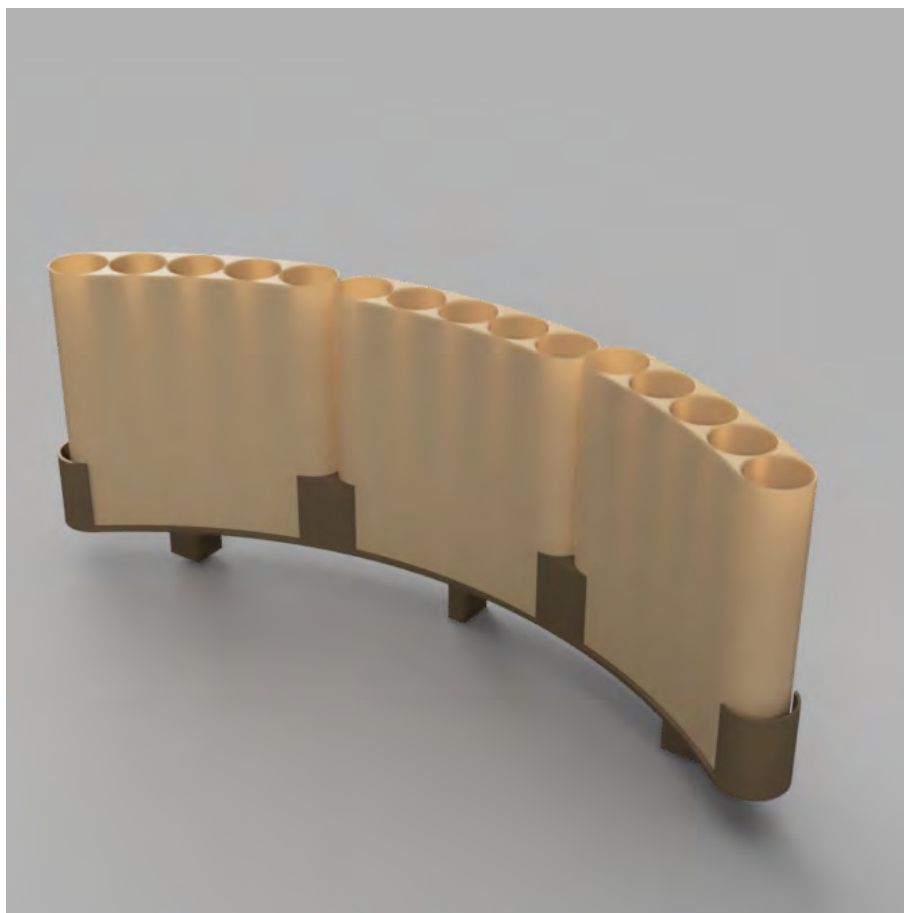
undersökas. Initialt testades plastflaskor men styvheten på dessa krävde ett moment som inte kunde uppnås av servomotorerna till hands. Med avsikt att sänka det krävda vridmomentet byttes flaskorna ut till spenar av silikon, ett mindre styvt material. En CAD-modell designades för att positionera spenen och servot korrekt och stabilt. För att färdigställa komponenten laserskars ben av akryl för att positionera spenen ovanför höjden på brödet. Då viss kraft skulle appliceras på komponenten valdes PLA som material, se avsnitt 3.3 för motivering. En rendering av komponenten ses i Figur 3.9.



**Figur 3.9:** Rendering av såspumpen utan servo och spene.

## 3.9 Korvmagasin

Korvmagasinet, där korvarna förvaras under användningen av maskinen, genomgick ett flertal olika designiterationer. Initialt undersöktes roterande cylindrar med fack för korvarna, det ansågs dock onödigt komplext då det krävdes motorer, relativt komplex design, programmering och mycket material. Lösningen som slutligen implementerades i slutprodukten var tre stycken böjda magasin. Dessa tre magasin har en kapacitet på fem korvar vardera. För att säkerställa korrekt positionering av magasinen under hela användningsprocessen designades en hållare vilket de tre magasinen kan placeras i, se Figur 3.10.



**Figur 3.10:** De tre korvmagasinen placerade i hållaren.

Den totala bredden på komponenten begränsades av kravet på att den skall rymmas mellan värmeelementet och avlastningsstationen. Syftet med de tre separata magasinerna var att underlätta möjligheten att separera olika sorters korvar samt att kunna fylla på ett magasin medans ett annat används.

Då inga stora krafter, varken fysiska eller termiska, kommer att appliceras på varken magasinet eller hållaren, valdes enligt avsnitt 3.2 PLA som material. Då magasinerna kommer att vara i direkt kontakt med mat matsäkrades de enligt metoden beskriven i avsnitt 3.3.

## 3.10 Användargränssnitt

För att låta användaren interagera med systemet krävdes någon form av användargränssnitt. Det bestämdes i designprocessen att gränssnittet skulle vara analogt, på grund av kostnad och komplexitet. De funktioner som behövde kunna styras av gränssnittet var val av korg och sås, start och för operatör av prototypen påfylld av korvmagasin. I en designprocess togs flera alternativa layouter på knappar fram.

Av dessa valdes en som den slutgiltiga designen genom en omröstning. Det skulle vara så lätt som möjligt att förstå och använda systemet samtidigt som alla funktioner skulle vara tillgängliga med en tillfredsställande och ergonomisk utformning.

Till valen av korvtyp och dressing valdes vippströmbrytare då de ger en tydlig visuell återkoppling. Vidare användes en stor upplyst grön knapp som startknapp. Startknappen placerades i mitten för att dra användarens uppmärksamhet. Detta görs även genom att startknappen lyser när systemet är redo att köra. Ytterligare användes även tre lysdioder för att förmedla information till användaren. Två för att slå larm när kött- respektive vegetariskt korvmagasin är tomt och den tredje dioden för att indikera när värmeelementet uppnått brukbar temperatur. Två knappar placerades bredvid de två lysdioderna vars funktion var för operatören att släcka larmlampan och bekräfta att magasinet fyllts på.

Knapparna placerades på en laserskuren panel i akryl som tillverkats utifrån en ritning, se Figur 3.12. Laserskärning möjliggjorde gravyr av förklarande text till knapparna. Panelen skruvmonterades i en låda se Figur 3.11 med en lämplig betraktningssvinkel. Lådan innehöll alla kablar och en transistor som lötts ihop för att uppnå önskad funktion samt upphöjningar för montering av de knappar som inte kunde monteras på panelen. Alla knappar och vippströmbrytare kopplades till jord och en GPIO pin på RPi:n. Ytterligare monterades även ett nödstopp på vagnen med en monteringsbricka i aluminium som tillverkades av en vattenskarare från en 2D-ritning se Bilaga B.18. Detta för att kunna stoppa systemet vid nödfall.



**Figur 3.11:** Låda till användargränssnitt.



**Figur 3.12:** Panel till användargränssnitt.

## 3.11 Värmeelement

För att designa värmeelementet optimerades faktorerna teoretiskt primärt utifrån ett snabbhetsperspektiv och sekundärt utifrån energieffektivitet. Utifrån geometrin på korv som begränsade faktor bestämdes geometri och dimensioner på spole och arbetsstycke. Med den presenterade teorin optimerades varje modul separat för att därefter integreras i systemet. Där designval stod mot varandra, exempelvis storlek på spole och rör utfördes kvalitativa analyser med de aktuella ekvationerna för att bestämma dominerande faktorer. Därefter arbetades en design fram med bestämda parametrar för tillverkning.

### 3.11.1 Spole

Spolen lindades för hand av tjockväggigt kopparrör. Mått på spolen togs fram genom beräkningar av teorin i avsnitt 2.1.1. För att kunna linda spolen så nära de uträknade måtten som möjligt designades en hjälpmall, se Bilaga B.13 som 3D-skrevs. Mallen gjorde det möjligt att linda spolen med ett konstant vindningsavstånd och en konstant diameter. Ändarna på den slutgiltiga spolen passerar genom monteringskivan där de böjdes på undersidan för att monteras på kretskortet.

### 3.11.2 Arbetsstycke

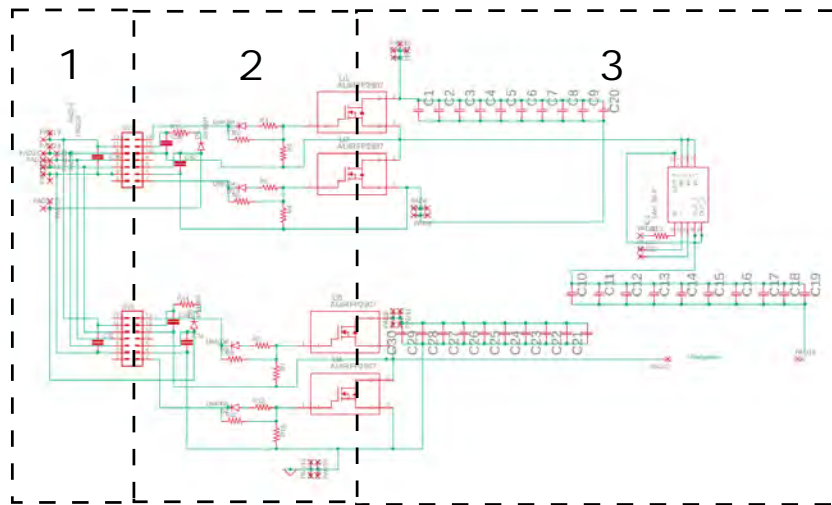
Två krav ställdes på röret för att uppnå önskad effekt, grundade på teorin om induktion. Röret behövde vara ferromagnetiskt för att uppnå den efterfrågade värmeutvecklingen. Detta begränsade materialvalet till typer av stål med hög relativ magnetisk permeabilitet  $\mu_r$ , för teorin bakom detta se avsnitt 2.1.2. Röret behövde även tåla snabba temperaturförändringar på upp till 600 °C vilket avgränsade stålets sprödhet. Med kraven som ställdes fanns tre alternativa sätt att framställa röret på: beställa ett rör med önskad diameter och godstjocklek och kapa till önskad längd, beställa plåt med önskade dimensioner, kallvalsa till önskad diameter för att sedan svetsa eller beställa överdimensionerat rör och svarva och kapa till önskade dimensioner.

En ur teorin motiverad önskad godstjocklek på under 1 mm innebar svårigheter med flera av dessa metoder. För det andra alternativet krävs en rundvals vars minsta tillåtna diameter inte överstiger önskad diameter. Detta avgörs av övervalsens diameter och utsvängbarhet. Svets av under 1 mm tunna plåtstycken kräver även en hög precision. För det tredje alternativet krävs särskilda åtgärder vid svarvning om den önskade godstjockleken understiger 1 mm. Detta för att undvika risken att röret kollapsar av det utvändiga verktygets skärkraft. Kvoten mellan rörets diameter och längd behöver tas hänsyn till då invändiga verktyg har en begränsad längd.

Flera av dessa metoder utnyttjades i arbetet. Tre rör svarvades och kapades till olika dimensioner som önskades under olika stadier av arbetet. Ett rör beställdes med önskad diameter, godstjocklek och längd.

### 3.11.3 Kretskort

Kretsen som designades för uppvärmingen kan delas in i tre delar vilket visas i Figur 3.13.



**Figur 3.13:** Kretsschema över induktionskretsen uppdelat i tre delar baserat på spänningsnivå.

Den första delen är 5 V logik delen bestående av insignaler från en Arduino som genererar två fyrkantsvågor samt styr en avstängningssignal. De signalerna tillsammans med en ledare för 5 V strömtillförsel för logiken ansluts till två drivkretsar för MOSFET:s och bildar den första delen av kretsen. I den andra delen av kretsen krävs en högre spänningsnivå för att kunna driva MOSFET:s och därför sätts den till 15 V. Denna delen innefattar strömtillförsel till drivkretsarna och utsignaler från drivkretsarna som kopplas till styrelektroden på fyra MOSFET:s. Mellan drivkretsarna och MOSFET:s finns det pull down motstånd, dioder och motstånd för att skydda komponenterna. Den tredje delen av kretsen designades för en inspänning på 48 V likspänning som konverteras till växelspänning genom att strömmen går genom de fyra MOSFET:s som tillsammans bildar en helbrygga. För att minska strömrippel vid växlingarna av MOSFET:s används kondensatorer som är parallellkopplade med spänningskällan. På växelspänningssidan är spolen som värmer metallröret monterad och inkopplad i serie med kondensatorer som tillsammans bildar en LC-tank.

Efter att kretsdesignen var framtagen påbörjades processen att utforma kretskorstlayouten. Initialt var tanken att kretskortet skulle vara uppbyggt av två lager varav det ena var ett jordlager. Efter ett flertal iterationer upptäcktes att endast ett lager krävdes. Storleken på ledarna som skulle klara större strömnivåer försökte maximeras. Kondensatorerna försökte placeras så att deras fotavtryck skulle minimeras så mycket som möjligt på kortet samtidigt som dess in- och utgångar var diagonalt placerade för att fördela belastningen likvärdigt över alla kondensatorer. För att minska

påverkan på kondensatorerna vid lödning implementerades termiska avlastningsdynor. Även avståndet mellan drivkretsarna och MOSFET:sen försökte minimeras för att förbättra signalkvaliteten. Designen som frästes kan ses i Bilaga B.19

## 3.12 Styr dator

För att kunna styra hela systemet behövdes någon typ av mångsidig styr dator. Datorn behövde exekvera kod för att styra servomotorer, tolka temperaturvärden från ett termoelement, skapa en signal till kretsen som styr induktionen och en användare skulle kunna interagera med den.

Ett fåtal mikrodatorer undersöktes i detta syfte. En av dessa var mikrokontrollern Arduino som ofta används för att kontrollera utomstående elektronik genom ett simpelt GPIO-gränssnitt. Ett andra alternativ som undersöktes var en Raspberry Pi vilket är en enkorts dator som även den har ett GPIO-gränssnitt. I slutändan togs ett beslut om att en Raspberry Pi svarade mot börkraven, främst eftersom den har större valmöjligheter av programmeringsspråk och större beräkningskapacitet än en Arduino. Utöver RPi:n valdes även en Arduino Nano för att reglera växelspanningens frekvens till induktionskretsen och ytterligare en för att styra servomotorer till såstillförelsen. Detta behövdes eftersom det finns mer utförlig information om hur frekvensreglering kunde utföras med en Arduino [72]. Utöver det fanns det färdiga bibliotek för att styra högmomentsservona som användes till såstillförelsen. [73] På grund av detta behövdes en Arduino som Raspberry Pi:n kunde kommunicera med.

Kommunikationen mellan Raspberry Pi:n och Arduinos sker genom seriell kommunikation via USB. På så sätt kan kommandon skickas från Raspberry Pi:n till Arduinon genom att skriva till seriell-porten på Raspberry Pi:n och kontinuerligt läsa seriell-porten på Arduinon. En frekvens läses av Arduinon som formar en signal och skickar dem till induktionskretsen. Mer om detta i avsnitt 3.14.1. För såstillförelsen skickades endast en etta eller tvåa till Arduinon, det lästa värdet tolkades och korrekt servomotor kördes.

## 3.13 Servostyrning

På grund av servomotorernas PWM-styrning krävs det att en signal med rätt pulsvidd skickas för att ställa och behålla rätt vinkel (eller hastighet för kontinuerligt servo). För att RPi:n ska styra en servomotor behöver den veta korrekt GPIO-pinne som servot är kopplat till samt vilken pulsvidd signalen till servot bör ha. Detta medför att det blir omständligt att styra servomotorerna med endast en RPi. Det bästa alternativet ansågs då vara att använda en styrenhet. Valet landade på att använda en Adafruit PCA9685 vilket är ett styrkort för servomotorer. Kortet kan styra upp till 16 servomotorer samtidigt och drivs dessutom via en extern strömkälla vilket skapar en mer stabil drift jämfört med att använda Raspberry Pi:n som strömkälla till alla servomotorer. Från Raspberry Pi:n skickades en vinkel-/hastighetvärde till en kanal på PCA:n som i sin tur skickade en signal med rätt pulsvidd kontinuerligt

till servomotorn som är kopplad till vald kanal. På så sätt kan flera servomotorer enkelt styras samtidigt med ett fåtal rader kod som inte blockerar programmet.

Ett problem som uppstod var att vinkelservona kördes ryckigt. När en PWM-signal skickades till ett vinkelservo roterade servot direkt till vald vinkel i högsta hastighet. Det medförde stora ryckningar i systemet vilket rubbade systemets precision. Att köra systemet ryckigt är inte heller energieffektivt och kan slita på servomotorer och andra delar [74]. För att motverka detta användes en mjukkörningsalgoritm. Eftersom vinkelservot körde direkt till vinkeln det var tilldelad behövdes en lista över vinklar som servot kunde iterera över. Vinklarna i listan behövde ändras så att mjukt start och stopp uppnås, alltså behövdes någon typ av polynomisk kurva utformas från listan. Pythonbiblioteket '*easing-functions*' användes för att uppnå detta med variablerna startvinkel, slutvinkel samt stegupplösning. Med bibliotekets användning gavs en mjukgjord lista som programmet sedan kunde iterera över och skriva varje vinkel till servomotorn med en fördröjning på 0,006 s.

Vilken stegupplösning som skulle användas i listan blev en kritisk del i mjukkörningen. Som start användes 1° som stegupplösning. Detta medförde att om en liten rotation skulle utföras gjordes detta fortfarande ryckigt. Vid till exempel en rotation från 0° till 5° blev antalet datapunkter bara fem. Med en fördröjning på 0,006 s innebär det en total tid för servot att rotera från 0° till 5° på endast  $5 \cdot 0,006 \text{ s} = 0,03 \text{ s}$  vilket medför en väldigt snabb rotation vilket uppfattas ryckigt. Därav behövdes ett sätt att generera fler datapunkter än antal vinklar i listan om antalet vinklar i listan var liten. En matematisk modell uppfördes för att möjliggöra just detta. Som invariabel användes det ursprungliga antalet datapunkter och modellen gav då ut ett nytt antal datapunkter som en stegupplösning sedan kunde beräknas utifrån.

## 3.14 Kod

För huvudprogrammet valdes Python som det primära språket. Detta valdes eftersom Python är ett relativt enkelt språk att jobba med och lära sig, det finns ett stort bibliotek av moduler för bland annat servokortet som är enkla att installera.

För att underlätta modularitet och översikt valdes det att skriva ett objektorienterat program. Klasser gjordes för servomotorerna, servokontroll, operationer, sekvenser, sekvensbyggare och sekvensexekverare. Att strukturera upp koden på detta vis möjliggjorde en enkelhet i att till exempel skapa ett objekt av servoklassen för varje servo som sedan kan kontrolleras genom att exekvera en körningsmetod på objektet.

Operationerna och sekvenserna användes för att organisera vad i programmet som skulle utföras och när. För varje del i programmet som skulle utföras skrevs en operation. Varje operation har en tilldelad funktion och en väntetid som väntas in när operationens funktion har körts. Det finns bland annat operationer som beskriver hur ett servo ska rotera till en viss vinkel, om induktionskretsen ska aktiveras, etcetera. Operationerna gör det möjligt att enkelt definiera vad som ska hända och kan läggas i en bestämd ordning i ett sekvensobjekt. Sekvensen håller koll på vad som

ska köras när. När en operation är helt färdig körs nästa operation.

I programmet behövde vissa operationer köras samtidigt. Till exempel behövde sekvensen för brödarmen och sekvensen för korvarmen köras samtidigt för att optimera tiden. Till detta användes Pythons flertrådning. I normal instruktionsexekvering exekveras en instruktion i taget och blockerar instruktionen som kommer näst. Vid användning av flertrådning kan ett antal instruktioner exekveras på en viss tråd parallellt med att en annan uppsättning instruktioner exekveras på en annan tråd.

Utöver att köra flera operationer samtidigt är det även flertrådning som gör att operationerna i sekvenserna exekveras asynkront. Det vill säga, för att en operation i en sekvens ska köras måste operationen innan den vara färdigkörd. Det är möjligt att definiera om ett antal operationer ska köras samtidigt eller om de ska vänta på varandra [75].

#### 3.14.1 Frekvensgenerering

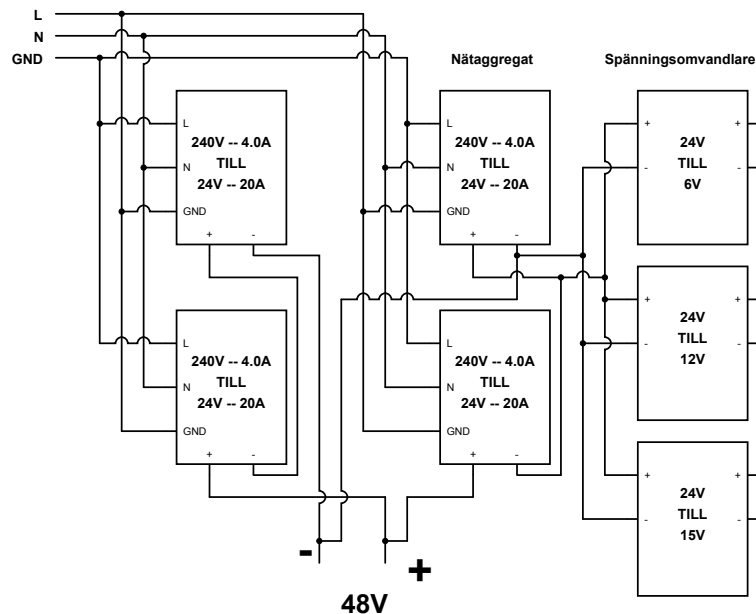
För att kunna styra frekvensen i kretsen användes en Arduino. Med Arduinos pulsbreddsmodulering kan två signaler genereras med dödtid mellan varandra. Det var nödvändigt med två olika signaler då drivkretsarna för MOSFET:s krävde en insignal för när transistorerna T1 och T4 skulle leda och en för T2 och T3, se Figur 2.18. Det innebar att den ena insignalen styrde när MOSFET:sen skulle släppa igenom strömmen i positiv riktning och den andra insignalen styrde när strömmen skulle gå i negativ riktning. Som säkerhetsskydd kopplades även drivkretsarnas avstängningspin in till Arduinon. Det medförde att om något blev fel kunde alla MOSFET:s stängas av samtidigt via kod som Arduinon exekverar.

### 3.15 Strömförsörjning

Produkten har ett flertal olika komponenter med olika ström och spänningskrav. Därmed har det krävts ett flertal olika lösningar för att svara till dessa krav. Huvudförsörjningen kommer från fyra stycken nätaggregat som omvandlar 230 V AC från eluttaget till 24 V DC 20 A vardera. För att kunna uppnå 48 V och 40 A som önskas av induktionskretsen seriekopplades nätaggregaten två och två för att sedan parallellkopplas, se Figur 3.14. Denna konfiguration var nödvändig då de skulle användas en specifik modell av nätaggregat som fanns tillgängliga.

Förutom 48 V krävde systemet även 6 V, 12 V och 15 V till bland annat servomotorerna, indikeringslampor, fläktar och olika styrsystem. Detta löstes genom att använda tre stycken ställbara spänningsomvandlare som kopplades från nätaggregaten och reglerade ner spänningarna till önskad nivå. Varje spänningsomvandlare kan leverera 3 A vilket är mer än tillräckligt för respektive ändamål.





**Figur 3.14:** Kopplingsschema för nättaggregat och spänningsomvandlare för strömförsörjning

### 3.15.1 Strömförsörjning av värmeelement

Konfigurationen kan leverera en total maximal ström på 40 A vilket är tillräckligt. Till induktionskretsen från nättaggregaten användes tjocka 4,0 mm<sup>2</sup> kablar för att klara av de höga strömmarna på max 20 A per kabel med marginal[76]. Med denna konfiguration kan en maximal effekt av 1920 W uppnås vid 48 V vilket är mer än tillräckligt. Styrkretsen för värmeelementet kräver 15 V vilket kommer från en utav de tre spänningsomvandlarna. Ytterligare en spänning som behövs är  $\pm 15$  V till Strömomvandlaren som används till att mäta strömmen i spolen. Detta löstes genom att använda en Spänningsomvandlare som omvandlar 12 V till  $\pm 15$  V. Där den inkommande 12 V kommer från en annan av de tre spänningsomvandlarna. Det är även den spänningsomvandlare som fläktarna kopplas till då de är 12 V fläktar.

### 3.15.2 Strömförsörjning av mikrodatorer och servomotorer

Raspberry Pi:n, vilket är produktens huvuddator, används för att både styra hela produkten och fördela spänning till andra komponenter. RPi:n är direkt kopplad till ett 240 V vägguttag med Raspberrys egna nättaggregat. I RPi:n är två Arduino Nanos inkopplade med USB-kabel. Då dessa mikrokontrollers drar relativt lite ström kan RPi:n stå för spännings- och strömtillförseln till dem båda.

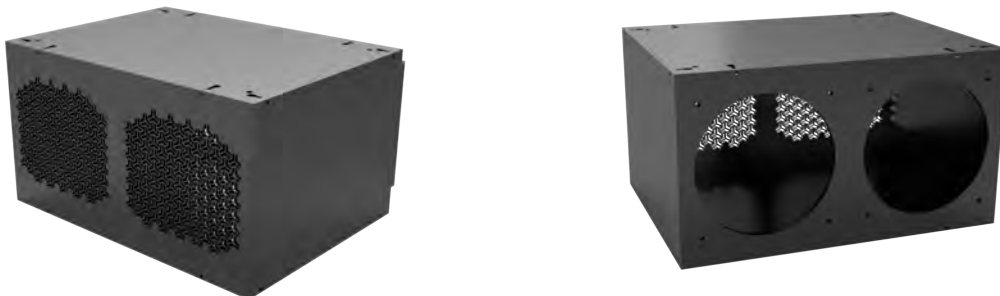
Även PCA-styrkortets processor drar såpass lite ström att RPi:n kan förse den di-

rekt. Det hade även fungerat att spännings och strömförse de servon som PCA:n styr genom RPi:n, dock hade detta möjligtvis medfört problemen: att RPi:n blir överbelastad, det går inte att säkerställa stabil strömförsörjning och att strömripping kan förekomma. Därmed valdes det att försörja servona på annat vis, via 6 V spänningsomvandlaren.

Användargränssnittet har ett flertal olika komponenter som måste förses med ström och spänning. I startknappen sitter en 12 V lysdiod. Eftersom 12 V är mer än RPi:n kan leverera behövs den kopplas till 12 V spänningsomvandlaren genom en BJT transistor som agerar strömbrytare kan den styras med en lägre spänning från RPi:ns GPIO. Ytterligare innehåller gränssnittet tre mindre lysdioder som försörjs direkt från RPi:ns 3,3 V GPIO genom 220  $\Omega$  motstånd för att minska strömmen från från skadliga 80 mA ner till säkra 5 mA för RPi:ns GPIO buss. Slutligen strömförsörjs även strömförstärkaren direkt genom RPi:n.

## 3.16 Kylning

På grund av hög värmeutveckling i MOSFET:s på kretskortet behövdes kylning för att undvika överhettning av komponenterna. På MOSFET:sen monterades kylflänsar för bortledning av värme. Kretskortet monterades i ett laserskuret chassi med två chassifläktar för att skapa ett välfungerande och riktat luftflöde över kretsen vilket kylar den genom konvektion. Se Figur 3.15 för en bild på chassit. Vidare



**Figur 3.15:** Chassi för kretskort med ventilationshål respektive fläkthål.

behövdes kylning för de tre spänningsomvandlare som matade servot, fläktar och andra driv- och styrkretsar. De tillsammans med RPi:n och servokortet monterades i en kopplingslåda vilket en fläkt sedan monterades i för att generera ett luftflöde genom lådan.

## 3.17 Basstruktur

Ett krav som ställdes på konstruktion senare under arbetet var mobilitet av systemet. Dels för att möjliggöra transport in och ut ur laboratoriet där arbetet utfördes och dels för att underlätta vid demonstration av den färdiga produkten. Ett önskemål var även enligt kravspecifikationen att konstruktionen skulle ta upp en maximal

### 3. Metod

---

area på  $700 \times 700$  mm och inte ha en höjd på över 1 m. Vidare fick inga kretsar eller vassa delar vara exponerade.

En lösning som tillfredsställde dessa krav och även beaktade önskemålen var en rullvagn. En vagn konstruerades med fyra hjul och två bordsskivor. En undre skiva med nätaggregat, kretskort och styrdator och en övre skiva med plats för övrig konstruktion enligt Figur 3.1. Skivorna förstärktes med tjock MDF för att möjliggöra stabil montering av komponenter. Den övre skivans dimensioner utökades för att tillåta konstruktion enligt Figur 3.1. Två DIN-skenor monterades på vagnens sidor för upphängning av nätaggregat. Rullvagnen ses i Figur 3.16.



**Figur 3.16:** Rullvagnen före montering.



# 4

## Resultat

Nedan presenteras resultaten av initial teoretisk optimering och tillverkning av prototyp.

### 4.1 Initiala parameterintervall via teoretiska och praktiska begränsningar

Den första begränsningen som upptäcktes var i kombination med produkten som skulle värmas och kravet om en så snabb uppvärmning som möjligt oavsett tid mellan beställningar. Maximal uppvärmning av arbetsstycket innebär minimal massa på arbetsstycket och ferromagnetiska egenskaper hos materialet, med hög magnetisk permeabilitet. Längden på arbetsstycket avgjordes av produkten som uppgick till ungefär 180 mm samt marginal för stabil montering. Det slutgiltiga röret uppmättes till 220 mm.

Dessutom gjordes röret så tunt som möjligt samtidigt som materialet kunde hantera fluktuerande temperaturer mellan 25-500 °C för att dels minimera mängden material och dessutom minimera en oenhetlig upphettning där yteffekterna från frekvenserna spelade mindre roll då värmen kunde sprida sig snabbt i materialet. En lämplig tjocklek på röret fanns till  $t_{\text{rör}} = 0,5$  mm. Diametern på arbetsstycket i ett rör är sedan avgörande för flera olika aspekter av värmningen. Spolens Q-värde, vilket ger ökade spänning i induktionen, och möjlighet till induktion har ett beroende via ekvation (2.85) där en ökad diameter innebär större Q-värde genom ökad induktans och större inducerad ström i röret vilket genom Joulevärmning leder till högre temperaturer.

Dessutom ökar ytarean som värmer korven kvadratisk gentemot synfaktorn som vid två koncentriskt cylindrar ökar linjärt vilket skulle kunna innebära att mer värme når korven snabbare. Däremot innebär en ökad ytarea att värmeförluster ökar via konvektion, strålning och konduktion där hela ytterdelen av röret utan reflekterande isolering ses som värmeförluster. Dessutom ökar mängden material kvadratisk vid ökad radie och därmed ökar tiden det tar för att värma materialet till rätt temperaturer. Det går inte heller att minimera röret och maximera spolen då enligt effektivitetsekvation ekvation (2.72) finns ett direkt beroende mellan avståndet mellan spolen och arbetsstycket och där magnetfältet är som störst precis vid spolen.

Dessutom måste korven kunna föras ner i röret med viss marginal och avstånd mellan röret och korven behövs dessutom för att inte bränna ytan. Med en kombination

av den optimala spol/halvlängdsration på 2,47 för Q-värden, en längdkvot mellan arbetsstycke och spole på 1,14 enligt ovan nämnd teori och praktiska möjliga konstruktioner införskaffades ett ferromagnetiskt stålrör,  $\mu_r \approx 200$  med en ytterdiameter på 57 mm och spolen lindades med en 5 mm marginal från spolens innerdiameter till stålrörets ytterdiameter där marginalen begränsades av tillverkningsprocessen och möjligheten till luftkyllning. Ledaren valdes till att bestå av koppar och för att maximera induktansen vilket i sin tur maximerar de inducerade strömmarna enligt ekvation (2.20).

Från ekvation (2.20) med rundledningskorrektionen ses strömarksapproximationen dominera då korrektionen i princip enbart minskar induktansen och i sin tur dominerar strömarksuttryckets varvberoende gentemot den ökande resistansen vid mindre ledardiamter genom vilket ses genom att använda sambandet  $l_{kabel} = N\sqrt{(2\pi r)^2 + p^2}$  och  $R_{kabel} = \frac{l_{kabel}\rho\Psi}{\pi(2r_{kabel}\delta - \delta^2)}$ . Den fysiska begränsningen för att minimera ledningstråden är den termiska förmågan beroende på effekten och med ett krav på att kunna hantera effekter upp till ca 2,3 kW gav detta en diameter på ca 6 mm från standardtabell. I sin tur ger denna diameter i kombination med Medhursts optimala vindingsavstånd, ett vindingsavstånd på 9,4 mm som då ger 18 varv. Totalt fås då en spole och arbetsstycke med parametrar presenterade i Tabell 4.1.

**Tabell 4.1:** Värden arbetsstycke och spole

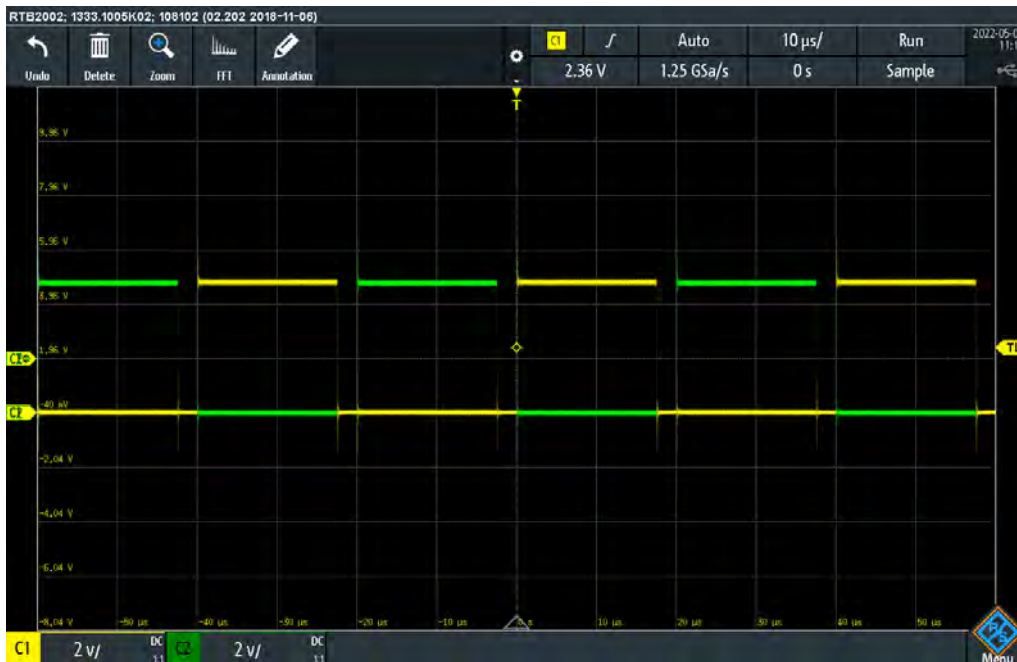
	Spole	Arbetsstycke
Längd	165 mm	220 mm
Vikt	650 g	321 g
Vindningsavstånd	9.4 mm	-
Godstjocklek	1 mm	1 mm
Varv	18 st	-
Yttre Rördiameter	6 mm	57 mm
Spoldiameter	72 mm	-

Från spolens bestämmelser räknades sedan induktansen ut genom programvaran *COIL32* som gav en induktans på  $L = 8,215$  H. Från denna induktans bestämdes därefter nu resonansfrekvensen i kombination med rörekvationerna med ett maximalt värde på  $F_{rör}$ . För att inte förlora effekt sattes ett golv på  $3\delta$  där  $\delta$  beräknades enligt ekvation (2.24) där den relativa magnetiska permeabiliteten på rörets uppskattades till  $\mu_r = 200$ .

## 4.2 Resultat inom induktion

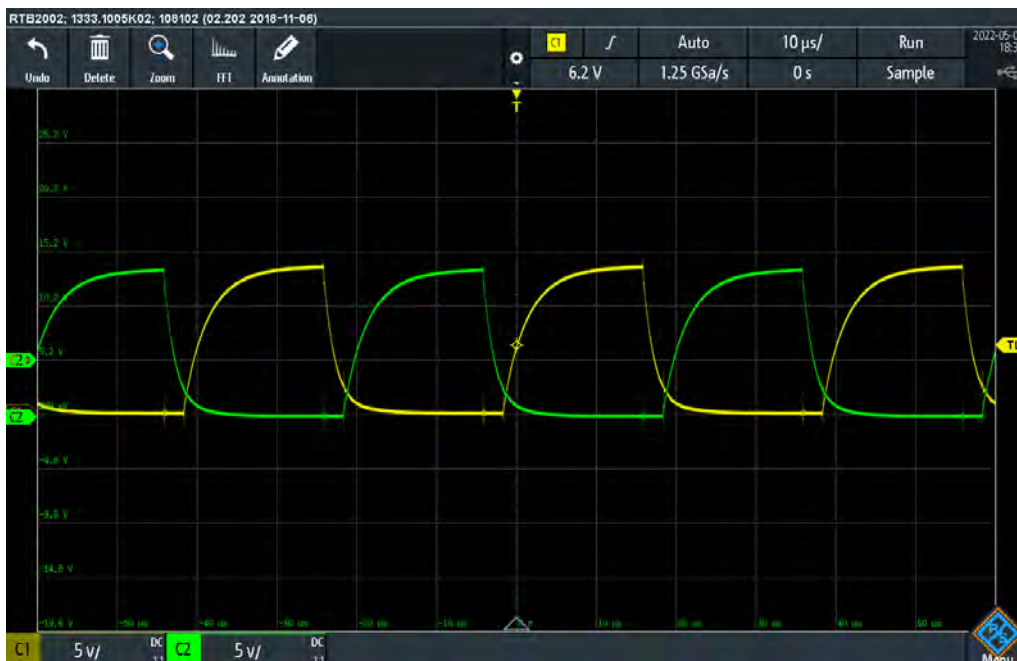
Kretskortet som designades för att växelrikta likspänning och sedan via induktion från en spole värma upp metallröret visas i Bilaga C.10. De viktigaste komponenterna som ingår i kretskortet går att se i komponentlistan i Bilaga 3.2. Två fyrkantsvågor genererades med en Arduino Nanon som kopplades in i kretskortet som insignaler till drivkretsarna för MOSFET:sen. Fyrkantsvågorna visas i Figur 4.1 där den implementerade dödtiden mellan de två signalerna framgår.

## 4. Resultat



**Figur 4.1:** De två utsignalerna från Arduinon med en dödtid på  $5\ \mu\text{s}$  varje period

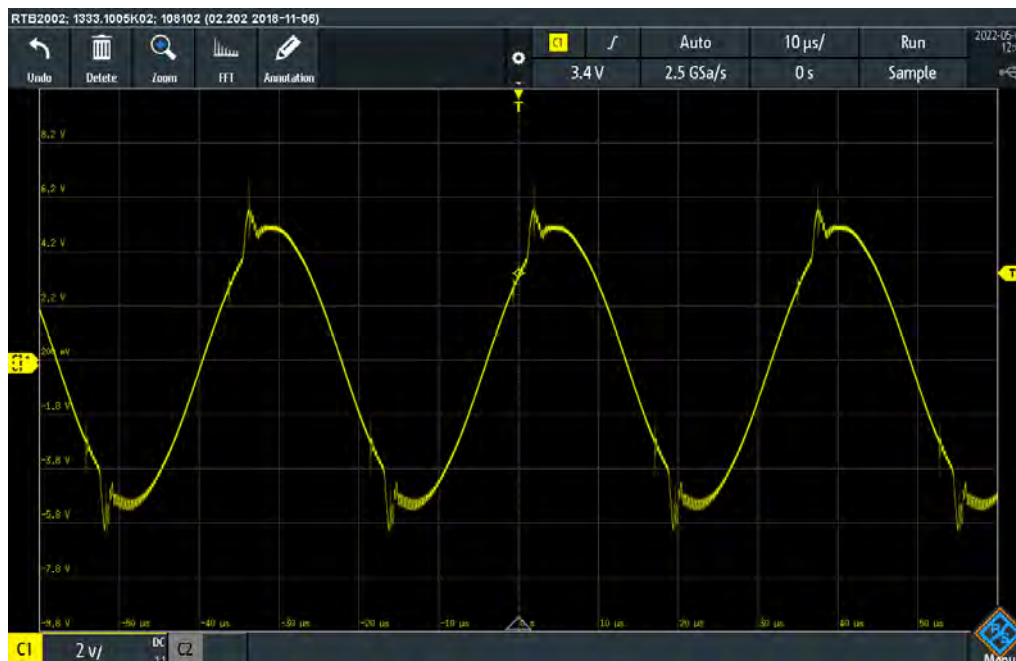
Signalerna som är kopplade till styrelektroderna på MOSFET:sen, det vill säga drivkretsarnas utsignaler, hade en mer vågliknande form jämfört med Arduinons utsignaler. De båda insignalerna till styrelektroderna visas i Figur 4.2 där det framgår att dödtiden gör det möjligt att byta vilka par av MOSFET:s som leder utan att göra någon inverkan på varandra.



**Figur 4.2:** De två insignalerna till styrelektroderna på MOSFET:sen

Drivkretsarnas utsignaler till MOSFET:sen i kombination med LC-tanken möjlig-

gjorde för den sinusformade utsignalen som uppstod då frekvens närmade sig den beräknade resonansfrekvensen på ca 27 kHz. Den genererade sinussignalen visas i Figur 4.3 där det framgår att någon form av störning uppstår precis innan varje topp och botten av spänningen.



**Figur 4.3:** Växleriktarens utsignal vid 27 kHz

Med signalgenereringen som tidigare nämnts har metallröret via induktion från spolen värmts upp med en effekt på ca 45 W. Några tester med högre effekter har inte varit möjliga att genomföra då spolen blev kortsluten av metallröret i ett test vilket skadade stora delar av kretskortet.

### 4.3 Resultat inom automation

Den autonoma delen av arbetet innefattade allt som inte hade med induktionen att göra. Det är alltså det som gör att produkten kan förbereda och servera korv och bröd, endast med mänsklig interaktion genom ett analogt gränssnitt. Automationen innefattade design, konstruktion, integration och programmering.

Substansiella mätresultat av systemets precision gick ej att säkerställa då systemet inte är färdigställt i sitt nuvarande skede. Servomotorerna som kontrollerar armarna vidhåller bra precision på grund av sin interna återkoppling. Problemet med systemets precision i nuläget är att komponenter inte är fullt optimerade för varandra, så integration av dessa kan innefatta glapp och oönskat spelrum.

#### 4.3.1 Programmering

Programmet som styr det autonoma systemet fungerar efter testning väl. Ett stort antal tester har utförts för att lokalisera buggar och fel i koden. Kodens struktur med

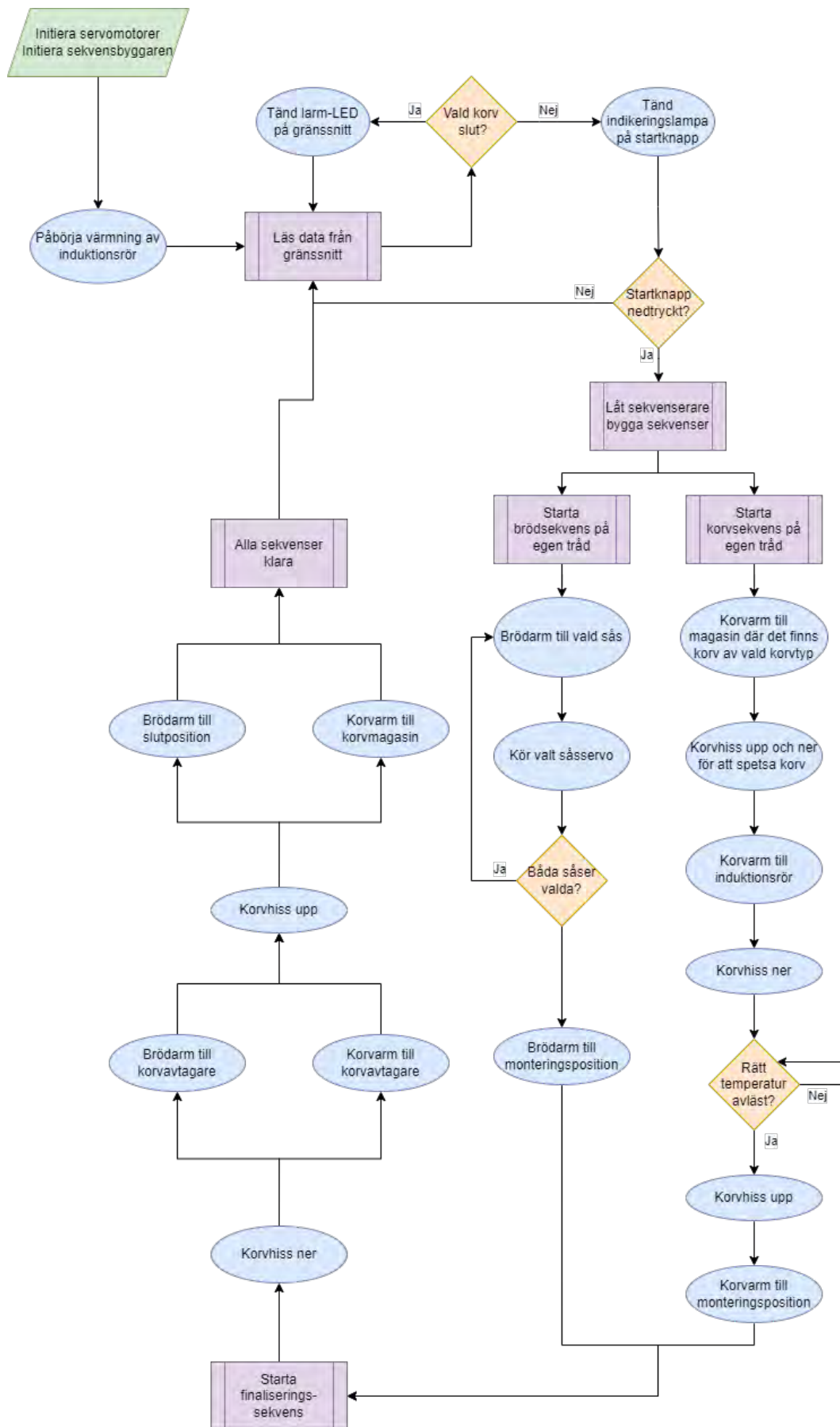


klasser och objekt fungerar bra i sitt syfte och gör testning av systemet så väl som vidareutveckling enkel.

Sekvenseringen och operationsstyrningen fungerar även den väl. I programmet kan det väljas hur sekvenserna ska köras såväl som operationerna. Programmet kan ses visualiserad som blockdiagram i Figur 4.4. Vid programstart initieras först alla servomotorer och en instans av sekvensbyggaren skapas. Sedan inleds initial uppvärmning av induktionsröret vid första interaktion med gränssnittet. Gränssnittets signaler läses sedan kontinuerligt tills dess att startknappen trycks ned. Då exekveras sekvensbyggaren utifrån signalerna från gränssnittet och ett par sekvenser genereras. Korv- och brödsekvensen startar simultant och alla operationer exekveras i turordning.

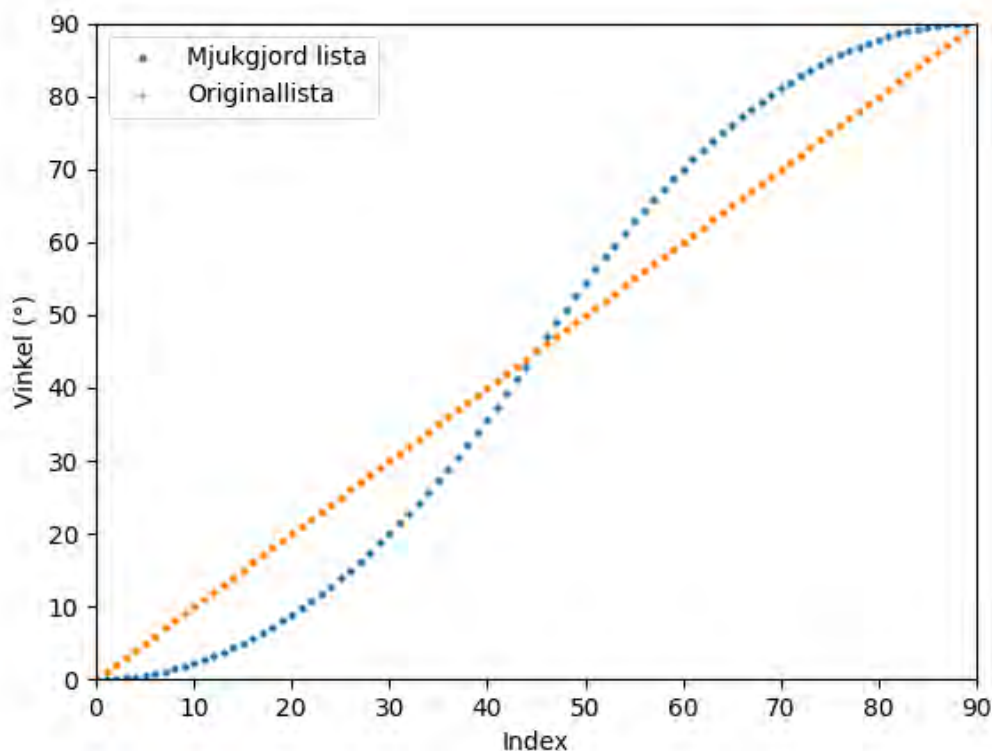
När korv- och brödsekvensen har exekverats klart startas finaliseringssekvensen. Den har som ansvar att först förflytta korven ner i brödet och sedan synkroniserat flytta både korv- och brödarm till korvavtagaren. Väl där kan korvhissen sedan köras upp och korv- och brödarm kan köras till sina respektive slutpositioner.

## 4. Resultat



Figur 4.4: Ett förenklat blockdiagram över funktionaliteten i programmet.

För att minska ryckningar och förbättra energi effektiviteten i armarna som styrdes av servomotorer användes en polynomisk kurva, mer specifikt en fjärdegradskurva, som utformades utifrån en lista av vinklar från start- till slutvinkel. Med den polynomiska kurvans verkan blev armarnas rörelser avsevärt mjukare. Resultatet av användningen av Pythonprogrammet *easing-functions* som användes för att uppnå detta kan ses i Figur 4.5.



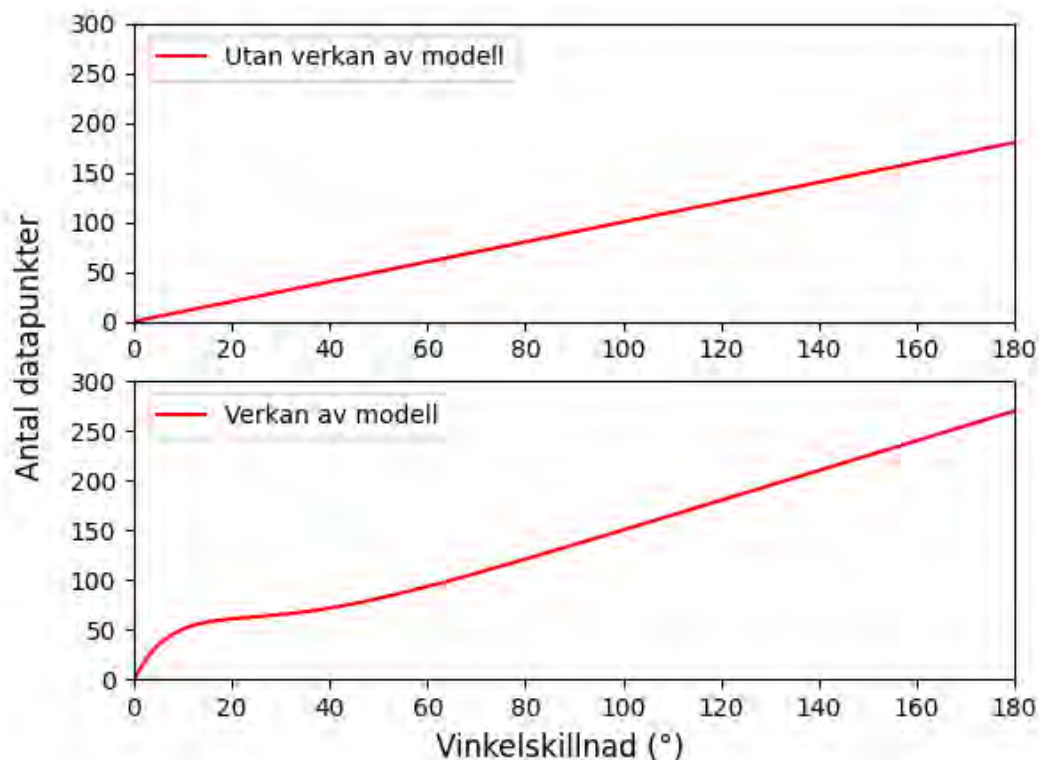
**Figur 4.5:** Mjukgjord samt icke mjukgjord lista över vinklar mellan  $0^\circ$  till  $90^\circ$ .

Observera att vi får en lista vars vinklar blir fjärdegradsökande och -avtagande vilket ger en mjukare rörelse för servomotorerna. Den mjukgjorda listan itereras över i programmet och vinkeln på varje index skrivs till servot med en fördröjning på 6 ms mellan varje iteration så att servot ska hinna nå till vinkeln som är skriven till det.

Modellen som uppfördes för att öka antalet datapunkter i listan för mindre rotationer kan ses i ekvation (4.1)

$$y(x) = 3xe^{\frac{1-x}{12}} + 1,5. \quad (4.1)$$

där  $x$  är det ursprungliga antalet datapunkter och  $y(x)$  antalet nya datapunkter. Modellen möjliggjorde att små rotationer fick ett ökat antal datapunkter vilket i sin tur gjorde att även de små rotationerna inte blev ryckiga. Modellen ökar även antal datapunkter för större vinkelskillnader för att skapa en jämnare rotation.



**Figur 4.6:** Antal datapunkter som fås med modellens verkan.

Som kan ses av modellens verkan i Figur 4.6 blir antalet datapunkter för mindre vinkelskillnader större jämfört med ingen modellverkan.

Sammantaget gjorde den polynomiska kurvan och modellen i ekvation (4.1) att servostyrningen blev betydligt mjukare och mindre ryckig. Detta var ett positivt resultat då slitningar på systemet kan minskas samt energieffektiviteten ökas.

### 4.3.2 Design, konstruktion och integration

Designen av produkten genomgick ett antal iterationer i arbetsprocessen. Den huvudsakliga designen förblev densamma, men detaljer och mindre delar ändrades. Den slutgiltiga designen av alla delar kan ses från Tabell 4.2.

**Tabell 4.2:** Tabell över designade komponenter och referenser till dess ritningar samt referenser till bilder på den konstruerade komponenten.

<b>Komponent</b>	<b>Ritning</b>	<b>Bild</b>
<b>Baspelare</b>	Bilaga B.15	Bilaga C.2
Monteringsstruktur	Bilaga B.1	-
Servopuck	Bilaga B.2	-
Stabilitetspuck	Bilaga B.3	-
Rotationspuck	Bilaga B.4	-
<b>Korvhiss</b>	-	Bilaga C.3
Struktur	Bilaga B.8	-
Cylinder	Bilaga B.9	-
Arm	Bilaga B.10	-
Kuggjul	Bilaga B.5	-
<b>Brödhållare</b>	-	Bilaga C.5
Skopa	Bilaga B.11	-
Arm	Bilaga B.12	-
<b>Korvmagasin</b>	-	Bilaga C.4
Magasin	Bilaga B.7	-
Hållare	Bilaga B.6	-
Såspump	Bilaga B.17	Bilaga C.7
Korvavtagare	Bilaga B.16	Bilaga C.8
Värmeelement	-	Bilaga C.9
Användargränsnitt	Bilaga B.14	Bilaga C.11

Tack vare att det huvudsakliga sättet att konstruera verkliga modeller av de CAD:ade modellerna var 3D-skrivning, hölls delarnas precisionsfel till viss del nere. 3D-skrivning kunde göras med ner till 0,06 mm i precisionsfel vilket gav väl konstruerade delar vilket var av stor vikt på grund av precisionen som krävdes av systemet.

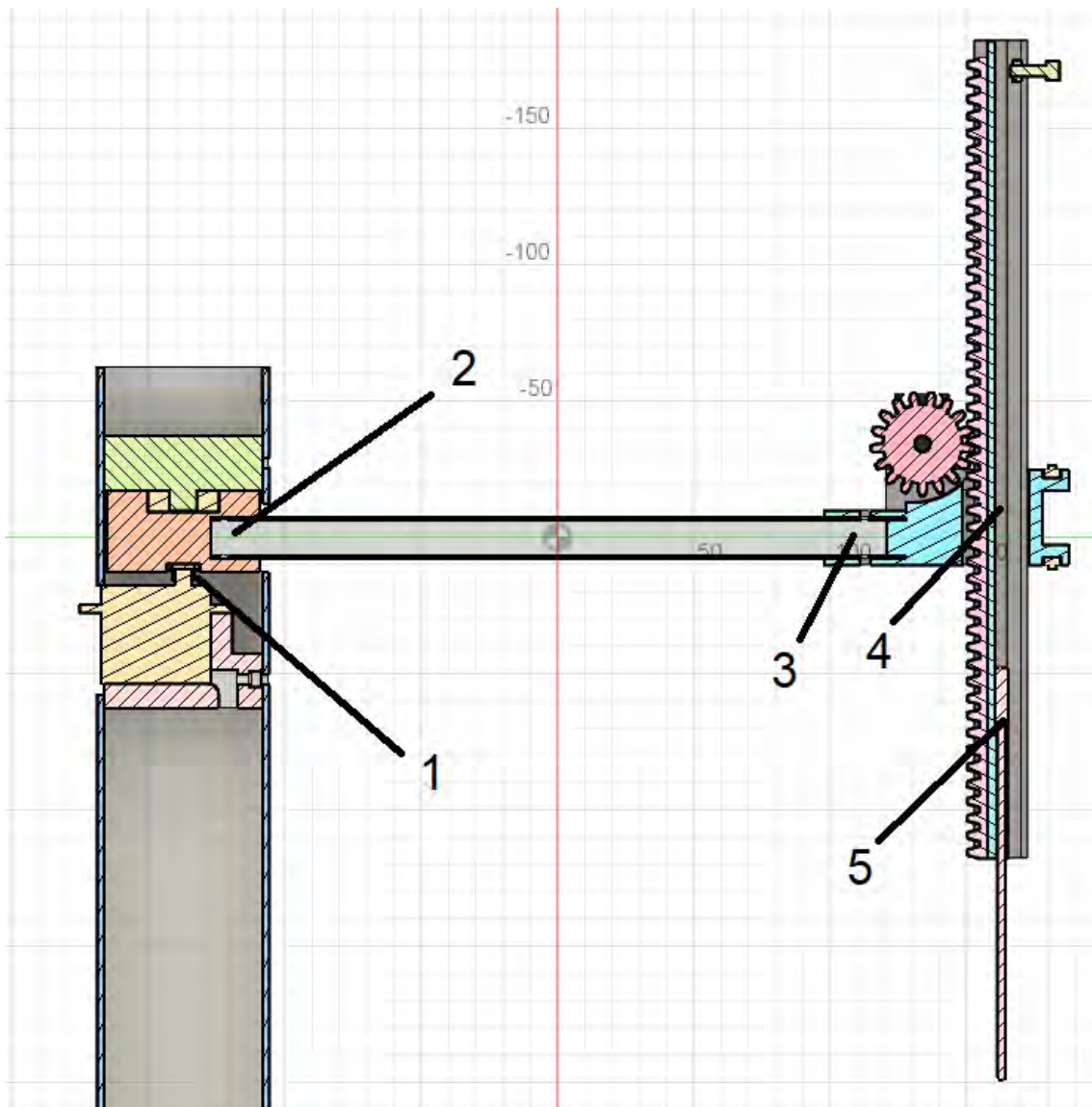
Delar som inte behövde 3D-skrivas, t.ex. baspelaren, behövde inte heller stor precision i konstruktionen vilket medförde att dessa delar kunde utarbetas med handverktyg. Det fanns även delar som blev laserskurna. Dessa kunde göras med ännu större precision än 3D-skrivningen på grund av laserskärarens precision och fungerade väl.

Integrationen av det autonoma systemet hade flera utmaningar. Det fanns många delar som skulle fungera i samverkan med varandra. Montering av baspelaren var kritisk då den behövde sitta i mitten av en cirkel med 300 mm i radie för att systemet skulle kunna samverka. Armarna räckte ut exakt 300 mm från baspelarens mittpunkt. Därav var det tvunget att alla komponenter som korvhissen eller brödhållaren skulle agera med låg exakt 300 mm ifrån baspelarens mittpunkt. Detta var av stor vikt och vid mindre tester av systemet har det visat sig hålla relativt bra precision.

Som nämnt i avsnitt 4.3 kunde substantiella tester inte utföras på det autonoma

systemet. Integrationen av systemet låg till stor del som grund för detta. Ett exempel på systemets integrationsfel är korvhissens precision. Från termoelementet som ska spetsa korven exakt i mitten, till servomotorerna som kontrollerar den, finns det ett antal felkällor, se Figur 4.7.

Ett internt glapp har upptäckts i servot som styr rotationspucken vilket ger korvvarmen lite spelrum i vertikal led (1). I armens infästning i rotationspucken kan ytterligare ett glapp ses (2). Dessa glapp återspeglas som en felmarginal i korvhissens vertikala position. Även infästningen för armen i korvhisstrukturen har ett litet glapp (3). Sist har även cylindern ett litet spelrum i korvhisstrukturen (4) och termoelementets infästning i cylindern är inte optimalt utformad (5). Alla dessa felkällor kan summeras till ett större mätfel i termoelementets position.



**Figur 4.7:** Ett tvärsnitt av korvhissen och baspelaren som visar olika källor till felmarginaler i korvhissens precision.

#### 4. Resultat

---

Dessa små fel har varierande källor. En av källorna är precision hos 3D-skrivaren. Trots skrivarens specificerade precision behövde komponenter som skrevs ut alltid ha en liten inräknad felmarginal om dessa skulle monteras ihop med någon annan komponent. Detta kunde leda till glapp, liknande det som beskrivs ovan.





# 5

## Slutsats och diskussion

### 5.1 Vidareutveckling av autonoma systemet

En utveckling på systemet i sin helhet är graden av autonomi. Kapaciteten på 15 korvar gör att korvmagasinen i nuläget måste fyllas på kontinuerligt. En möjlig lösning är att implementera mer långvarig förvaring i form av ett integrerat kylskåp. En möjlig förbättring hade då varit att systemet autonomt fyller på tomma magasin. Liknande problematik uppstår med brödet då ingen brödförvaring implementerats. Detta kan lösas med antingen ett brödmagasin som autonomt placerar brödet i skopan, eller någon större förvaring där användaren kan ta bröd från.

Vidare utveckling kan ske gällande materialvalet. Exempelvis är i dagsläget baspelaren tillverkad av PVC, vilket resulterar i att pelaren sviktav vridmomenten från armarna och därmed begränsar systemets precision. En åtgärd är att använda ett styvare material, exempelvis aluminium. En annan är en mer stabil monteringsstruktur. Likvärdigt hade ett styvare material på såspumpens ben ökat precisionen på dessa.

Även på systemets övergripande struktur ses utvecklingsmöjligheter. Den roterande designen med armar styrda av servomotorer skapar ett antal felkällor i systemet. Ta korvhissen som exempel. Eftersom dess masscentrum sitter med ett visst avstånd ifrån dess infästning i baspelaren skapas ett visst moment i armen som rubbar precision och skapar oönskade spänningar i konstruktionen.

Korvhissen i sig har i dagsläget relativt undermålig precision utöver systemets bristande strukturella design. Detta beror på flera olika faktorer, se avsnitt 4.3.2 för några av dessa. Dessa problem skulle kunna lösas med stabilare infästning mellan komponenter. En annan möjlighet är att konstruera komponenter med mindre modularitet, något som inte gjorts då syftet enbart varit att konstruera en prototyp. Vidare kan precisionsproblemet förbättras om höj- och sänkfunktionen ändras från kuggstång och kugghjul till ledarskruv och mutter eller kulskruv. Det hade potentiellt minskat vibrationer som uppstår när cylindern höjs och sänks men med problemet att termoelementets kabel och korven roterat vid höjning och sänkning.

Det finns alltså flera förbättringar att göra gällande integreringen av komponenter. Mycket av problematiken grundas i nivån av precision som följts vid framtagning av komponenterna. För att möjliggöra montering av komponenterna har ett önskat

spelrum varit nödvändigt vid tillverkning. Vid produktion av industriella komponenter i metall hade metoder som svarvning och fräsning medfört en högre precision.

I nuläget tar såspumpen relativt lång tid. I en vidare optimerad produkt, med en uppnådd uppvärmningstid på 10 s, hade antingen en förbättring av nuvarande metod eller en annan metod för att tillföra sås varit en nödvändig förbättring.

## 5.2 Vidareutveckling av induktionsvärmning

Med industriella processer hade en spole med exakta mått på diameter och vindningsavstånd kunnat tillverkas. För att stabilisera denna strukturellt kan en typ av ställning utnyttjas, dels mot oförutsedda krafter på konstruktionen dels mot de krafter som verkar på spolen då spänning tillförs. Ställningen, som hade bestått av ett icke-ledande material som fästs i spolen med nitar alternativt gjutits runt spolen, hade förhindrat kontakt mellan spolens varv samt mellan spolen och röret och därmed förhindrat kortslutning i kretsen. Med analytiska tumregler så har processen en bra grund för vidare simuleringar via fysiska simuleringsprogram då de större gränserna har dragits men för finare optimering krävs numeriska beräkningar. Systemets frekvensmatchning har ej heller uppnåtts och bättre precision i både tillverkning och resonansfrekvens kan ske för ökad effektivitet.

Vidare finns potential att både reducera massa i arbetsstycket, genom att framställa ett rör med tunnare väggtjocklek, och att öka den relativa magnetiska permeabiliteten  $\mu_r$  för att maximera effekt vid induktion. Ett material som teoretiskt bättre lämpat sig för arbetsstycket, med krav på styvhet, sprödhet och  $\mu_r$  är ett rostfritt stål i 400-serien, exempelvis SS 2320 [77].

En förbättring som bör göras på kretskortet är att minska avståndet mellan drivkretsarna och MOSFET:sen för att förbättra signalkvaliteten. Någon form av strömskydd bör även implementeras för att skydda komponenterna för eventuella fel som kan uppstå. En reglering av frekvensen baserad på effekten hade kunnat öka hastigheten som röret blir varmt på. Det hade även kunnat minska energiförbrukningen och kunnat hålla röret i en optimal temperatur. Vidare kan tydliga mätningar göras för att kunna indirekt även mäta temperaturen på arbetsstycket genom ström. Detta kräver mer mätning men ses som ett möjligt område för ett återkopplingssystem utan att involvera dyrare IR-sensorer.

## 5.3 Samhälleliga och etiska aspekter

I följande avsnitt analyseras systemets påverkan på relevanta samhälleliga och etiska frågor. Ett urval av frågor har besvarats där det anses finnas tillräckligt med information för att göra en värdefull analys.

### 5.3.1 Autonomi

Som följd av systemets autonomi kommer arbetsbördan minska jämfört med traditionell servering av korv. De uppgifter som krävs av försäljaren i systemets nuvarande fas är: påfyllnad av korvmagasin, tillförsel av bröd och service av produkten. En mindre arbetsbörda än traditionell servering då alla autonoma moment som att värma korven, tillföra sås och servera den då utförs manuellt. Om systemet hade vidareutvecklats mot full autonomi och använts inom kommersiellt områden hade det haft en påverkan på arbetsbördan samt möjligtvis behovet av anställning. Vid evenemang hade behovet av en kontinuerlig operatör försvunnit, och behovet av servicepersonal uppstått. Vid bensinmackar, närbutiker och andra liknande uppställningar där arbetsuppgifterna är fler, hade arbetsbördan endast minskat.

### 5.3.2 Matsvinn

Vid traditionell servering av korv med bröd är det vanligt att korven ligger på eftervärme, antingen på konduktionsgrill eller i vattenbad. Detta för att effektivt möta förändringar i efterfrågan genom att ha en stor buffert. Ett överskott av tillagade korvar tar inte hänsyn till det matsvinn som det ger upphov till. En effekt av kommersiell användning av autonom tillagning av korv är elimineringen av sådant matsvinn. Då varje korv tillagas på efterfrågan finns inget överskott av korvar som behöver slängas.

## 5.4 Slutsats

Slutsatsen är att arbetet är möjligt och görbart men andra, bättre lösningar går att åstadkomma. Autonomi i systemet svarar väl till projektets syfte. Maskinen klarar att autonomt hantera en korv med viss felmarginall orsakat av precisionsfel. Allt från att först upphämta en korv från magasin, till att föra ned korv i värmeelementet och sedan servera korven i bröd sköts autonomt på användarens beställning.

Eftersom ingen korv ännu tillagats med produkten har inga substansiella tester gjorts för att fastställa korrekt energieffektivitet, serveringstid och temperaturmätning. Tester på serveringsflödet exkluderat korvtillagningen visar att en korv kan serveras efter 33 s från det att kunden interagerat med produktens gränssnitt.

Arbetet har även påvisat att konceptet med induktionsdriven snabbtillagning av korv är möjligt. Induktionsparameterar har identifierats och grundläggande designval med kvalitativa samband utretts. Från detta ses stor förbättringspotential där designprocessen till den nuvarande prototypen ledde in på alternativ väg med direkt resistansvärmning. Designregler och teori är liknande för ett sådant system men med färre förluster. Detta genom att direkt konvertera elen till värme istället för att gå genom induktion men även möjlighet att isolera utan att förlora effekt genom kopplingsdistanser. Ett sådant system tillåter även ett mindre komplext system med billigare komponenter vilket måste ses som en stor fördel i en eventuell kommersialisering.



# Litteratur

- [1] C.R. Nave. *Inductance of a Coil*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/indcur.html#c1>. (hämtad: 2022-01-24).
- [2] Circuit Globe. *Difference Between EMF and Voltage*. Circuit Globe[Sida på internet]. 2017. URL: <https://circuitglobe.com/difference-between-emf-and-voltage.html>. (hämtad: 2022-01-24).
- [3] C.R. Nave. *Lenz's Law*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/farlaw.html#c1>. (hämtad: 2022-01-24).
- [4] C.R. Nave. *Maxwell's Equations*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/maxeq.html#c1>. (hämtad: 2022-01-24).
- [5] John Davies. "Fundamentals". I: *Conduction and induction heating*. Institution of Engineering och Technology, 2007, s. 4–7.
- [6] C.R. Nave. *Gauss' Law for Electricity*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/maxeq2.html#c1>. (hämtad: 2022-01-24).
- [7] Wikimedia Commons. *File:VFPT cylindrical loosely-wound coil 2.svg* — *Wikimedia Commons, the free media repository*. 2021. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPT\\_cylindrical\\_loosely-wound\\_coil\\_2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPT_cylindrical_loosely-wound_coil_2.svg) (hämtad 2022-05-12).
- [8] C.R. Nave. *Gauss' Law for Electricity*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/ferro.html#c1>. (hämtad: 2022-01-24).
- [9] TDK Corporation. *Inductors—Part 1 The Basics of Inductors*. TDK Corporation, Nihonbashi Takashimaya Mitsui Building, 2-5-1, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103-6128, Japan. 2022. URL: [https://www.tdk.com/en/tech-mag/electronics\\_primer/1](https://www.tdk.com/en/tech-mag/electronics_primer/1). (hämtad: 2022-01-24).
- [10] R Weaver. *Lorenz, Nagaoka and Solenoidal Current Sheets*. Bob's Electron Bunker[Sida på internet]. 2021. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods1a.html>. (hämtad: 2022-04-28).
- [11] R Weaver. *Empirical Formulae - Wheeler's Continuous Inductance Formula*. Bob's Electron Bunker[Sida på internet]. 2021. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods3b.html>. (hämtad: 2022-04-28).

- 
- [12] R Weaver. *Current Sheets and Round Wire Corrections*. Bob's Electron Bunker[Sida på internet]. 2021. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods2a.html>. (hämtad: 2022-04-28).
- [13] R Weaver. *Investigation of E.B. Rosa's Round Wire Mutual Inductance Correction Formula*. 2008. URL: <http://electronbunker.ca/eb/CalcMethods2a.html>. (hämtad: 2022-04-28).
- [14] D Knight. *An introduction to the art of Solenoid Inductance Calculation With emphasis on radio-frequency applications*. 2016. URL: <https://g3ynh.info/zdocs/magnetics/Solenoids.pdf>. (hämtad: 2022-04-28).
- [15] Coil32 (Coil64) - free inductor calculator. *About Q-factor of RF inductance coil*. Coil32 (Coil64) - free inductor calculator[Sida på internet]. Jan. 2015. URL: <https://coil32.net/theory/qfactor.html>. (hämtad: 2022-01-28).
- [16] Paul Dohrman. *How to Calculate the Length of Wire to Make a Coil*. Leaf Group Ltd. 1655 26th St Santa Monica, CA 90404, USA. April 2017. URL: <https://sciencing.com/calculate-length-wire-make-coil-5981060.html>. (hämtad: 2022-01-24).
- [17] Edvard. *Joule's Law*. Electrical Engineering Portal PR, Kralja Petra I Karadjordjevic 85, 23330 Nova Pazova, Serbia. oktober 2010. URL: <https://electrical-engineering-portal.com/resources/knowledge/theorems-and-laws/joules-law>. (hämtad: 2022-01-28).
- [18] Singlelayer air core coil winding formulas. *Joule's Law*. Coil64 (Coil32)[Sida på internet]. Jan. 2015. URL: [https://coil32.net/single-layer-coil.html#google\\_vignette](https://coil32.net/single-layer-coil.html#google_vignette). (hämtad: 2022-01-28).
- [19] Kurt Kosbar. *Skin Depth*. Emerson Electric Company Hall Missouri University of Science Technology Rolla, MO, USA. 2022. URL: [https://web.mst.edu/~kosbar/ee3430/ff/transmissionlines/LC\\_of\\_lines/resistance/skin.html](https://web.mst.edu/~kosbar/ee3430/ff/transmissionlines/LC_of_lines/resistance/skin.html). (hämtad: 2022-01-28).
- [20] Wikimedia Commons. *File:File:Skin depth.svg — Wikimedia Commons, the free media repository*. 2021. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skin\\_depth.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Skin_depth.svg) (hämtad 2022-05-12).
- [21] A Rikhter och M. M. Fogler. "Influence of workpiece height on the induction heating process". I: *Mathematical and Computer Modelling* 54.1-2 (sept. 2011), s. 50–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.01.033>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717711000513>. (hämtad: 2022-01-26).
- [22] John Davies. "Basic induction heating". I: *Conduction and induction heating*. Institution of Engineering och Technology, 2007, s. 75–77.
- [23] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Theorem and Poynting's Vector". I: (2015), s. 5–8.
- [24] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Phenomena Affecting the Current Density Distribution in Conductors". I: (2015), s. 8–12.
- [25] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Semi-infinite Body of Homogeneous Material". I: (2015), s. 23–33.
- [26] C.R. Nave. *Solenoid*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html>. (hämtad: 2022-04-24).

- [27] V Rudnev, D Loveless och R Cook L. "Theoretical Background from Handbook of Induction Heating". I: (juli 2017), s. 51–372. URL: <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/9781315117485-3>. (hämtad: 2022-05-07).
- [28] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Semi-infinite Body of Ferromagnetic Material". I: (2015), s. 40–45.
- [29] The Editors of Encyclopaedia. *Curie Point*. Juli 1998. URL: <https://www.britannica.com/science/Curie-point>.
- [30] John Davies. "Non-linear theory". I: *Conduction and induction heating*. Institution of Engineering och Technology, 2007, s. 130–132.
- [31] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Solid Cylindrical Workpieces of Homogeneous Material". I: (2015), s. 85–93.
- [32] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Induction Heating Solid Ferromagnetic Cylinder". I: (2015), s. 105–107.
- [33] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Induction Heating with External Exciting Magnetic Field". I: (2015), s. 109–114.
- [34] Sergio Lupi, Michele Forzan och Aleksandr Aliferov. "Hollow Cylindrical Workpieces of Ferromagnetic Material". I: (2015), s. 120–122.
- [35] V Nemkov. *Training courses Induction heating technique part 1 [Power Point på internet]*. URL: <https://fluxtrol.com/training-courses-Induction-Heating-Part-1>.
- [36] C.R. Nave. *Heat Transfer*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html#c1>. (hämtad: 2022-05-02).
- [37] R Cengel A Y och Turner H. *Chapter 12: Radiation Heat Transfer*. Microelectronics Heat Transfer Laboratory Department of Mechanical Engineering University of Waterloo. McGraw-Hill, 2007. URL: [http://www.mh1.uwaterloo.ca/courses/ece309\\_mechatronics/lectures/pdffiles/summary\\_ch12.pdf](http://www.mh1.uwaterloo.ca/courses/ece309_mechatronics/lectures/pdffiles/summary_ch12.pdf). (hämtad: 2022-05-04).
- [38] A Försth M och Roos. "Absorptivity and its dependence on heat source temperature and degree of thermal breakdown". I: *Fire and Materials* 35.5 (2010), s. 285–301. DOI: 10.1002/fam.1053.
- [39] J. Ibarra m. fl. "Cooked and raw chicken meat: Emissivity in the mid-infrared region". I: *Applied Engineering in Agriculture* 16 (mars 2000), s. 143–148. DOI: 10.13031/2013.5060.
- [40] ThermoWorks. *Infrared Emissivity Table*. ThermoWorks. 2022. URL: <https://www.thermoworks.com/emissivity-table/>. (hämtad: 2022-05-04).
- [41] Williamson. *Does Emissivity Change with Temperature?* Williamson. 2022. URL: <https://www.williamsonir.com/blog/does-emissivity-change-with-temperature/>. (hämtad: 2022-05-05).
- [42] I Martinez. *RADIATIVE VIEW FACTORS*. [Akademisk hemsida på internet]. 2022. URL: <http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/tc3/Radiation%20View%20factors.pdf>. (hämtad: 2022-05-05).
- [43] Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations.  $\alpha, \beta, \gamma$  Penetration and Shielding [Sida]. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations. 2022. URL:

- <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/%CE%B1-%CE%B2-%CE%B3-penetration-and-shielding>. (hämtad: 2022-05-05).
- [44] F.P Tang J och Resurreccion. “Electromagnetic basis of microwave heating”. I: *Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens* (2009), 3–38e. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845696573.1.3>. (hämtad: 2022-05-05).
- [45] C.R. Nave. *Heat Convection*. Department of Physics och Astronomy, Georgia State University, Atlanta, Georgia, USA. 2017. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html#c1>. (hämtad: 2022-05-02).
- [46] Engineering ToolBox. *Food and Foodstuff - Specific Heat [Sida på internet]*. Engineering ToolBox. URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d\\_295.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-food-d_295.html). (hämtad: 2022-05-02).
- [47] D Madsen S och Shelly. *Hot dogs, HOT Dogs, and more hot dogs...* [Power Point på internet]. Ira A. Fulton College of Engineering at Brigham Young University. URL: <https://www.et.byu.edu/~vps/ME340/PROJECTSW10/04.pptx>. (hämtad: 2022-05-03).
- [48] B.A Becker B.R och Fricke. “FREEZING | Principles”. I: *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)* (2003), s. 2706–2711. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00521-6>. (hämtad: 2022-05-05).
- [49] et.al Wang Yequ. “Radio frequency pasteurization and heating uniformity of canned pineapple”. I: *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition)* (maj 2022), s. 2706–2711. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16159>. URL: [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/foods/foods-11-01317/article\\_deploy/foods-11-01317-v3.pdf?version=1651829260](https://mdpi-res.com/d_attachment/foods/foods-11-01317/article_deploy/foods-11-01317-v3.pdf?version=1651829260). (hämtad: 2022-05-05).
- [50] Kamonpatana P Tepnatim W Daud W. “Simulation of Thermal and Electric Field Distribution in Packaged Sausages Heated in a Stationary Versus a Rotating Microwave Oven”. I: *Foods* 10 (4 juli 2021), s. 1622. DOI: [10.3390/foods10071622](https://doi.org/10.3390/foods10071622). URL: [https://mdpi-res.com/d\\_attachment/foods/foods-10-01622/article\\_deploy/foods-10-01622-v2.pdf?version=1626250116](https://mdpi-res.com/d_attachment/foods/foods-10-01622/article_deploy/foods-10-01622-v2.pdf?version=1626250116). (hämtad: 2022-05-05).
- [51] Abdus Salam och Quazi Mehbubar Rahman. *Fundamentals of electrical circuit analysis*. 1. utg. Singapore, Singapore: Springer, 2018, s. 410–412. ISBN: 978-981-10-8623-6.
- [52] Nationalencyklopedin. *Q-värde*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/q-v%C3%A4rde> (hämtad 2022-05-04).
- [53] A Rikhter och M. M. Fogler. “Inductor coil of the highest possible Q”. I: *Scientific Reports* 10.1 (sept. 2020). ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/s41598-020-72308-9](https://doi.org/10.1038/s41598-020-72308-9). URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-72308-9>. (hämtad: 2022-01-26).
- [54] Kjell O Jeppson. *transistor*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/transistor> (hämtad 2022-05-05).
- [55] Nationalencyklopedin. *bipolär transistor*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/bipol%C3%A4r-transistor> (hämtad 2022-05-05).

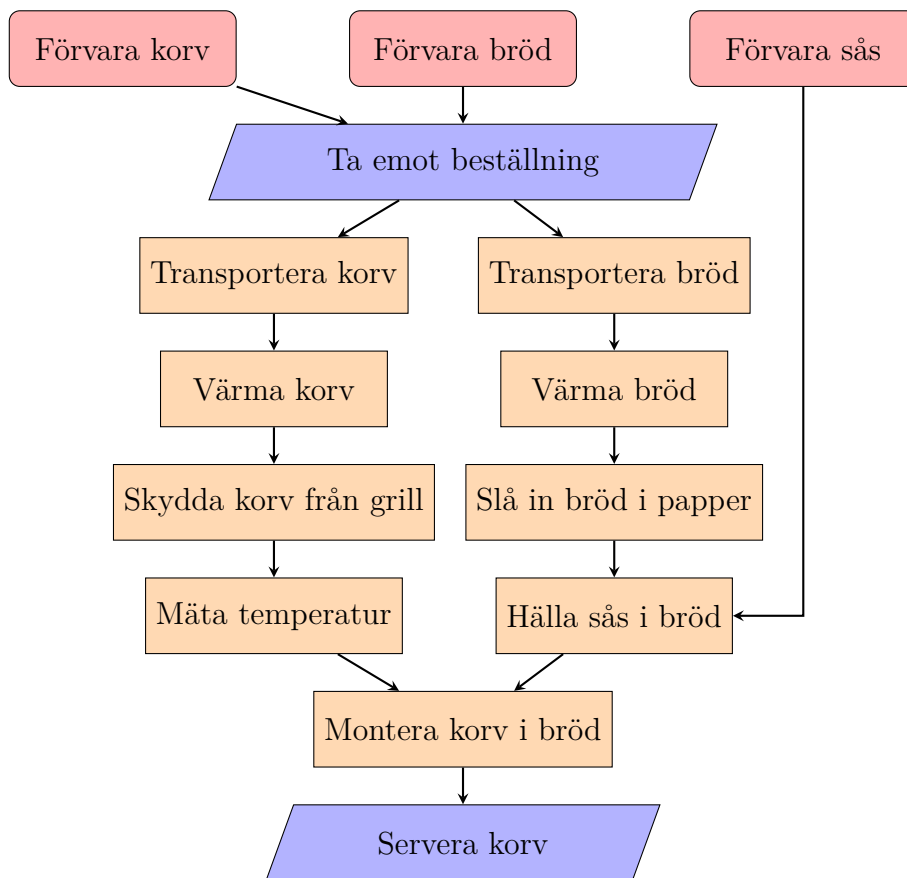


- 
- [56] Ned Mohan och Tore M. Undeland. *Power Electronics: Converters, applications and design*. 2. John Wiley amp; Sons, 1995, s. 24–26. ISBN: 978-0-471-58408-7.
- [57] Kjell O Jeppson. *fälteffekttransistor*. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/f%C3%A4lteffekttransistor> (hämtad 2022-05-05).
- [58] Ned Mohan och Tore M. Undeland. *Power Electronics: Converters, applications and design*. 2. John Wiley amp; Sons, 1995, s. 211–212. ISBN: 978-0-471-58408-7.
- [59] Michael Salcone och Joe Bond. “Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications”. I: *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2009, s. 1692–1699. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075431.
- [60] D. Leggate och R.J. Kerkman. “Pulse based dead time compensator for PWM voltage inverters”. I: *Proceedings of IECON '95 - 21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Vol. 1. 1995, 474–481 vol.1. DOI: 10.1109/IECON.1995.483455.
- [61] *Bimetallic strips*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/BiMet/BiMetallic.html> (hämtad 2022-05-11).
- [62] *Temperature sensors*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/TempHome/TempSensors.html> (hämtad 2022-05-11).
- [63] *Non-contact temperature sensors*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/NonContact/NonContact.html> (hämtad 2022-05-11).
- [64] *Thermistor temperature sensors*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermistor/Thermistor.html> (hämtad 2022-05-11).
- [65] *RTDs*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/RTDs/RTD.html> (hämtad 2022-05-11).
- [66] *Thermocouple theory*. URL: <https://www.capgo.com/Resources/Temperature/Thermocouple/Thermocouple.html> (hämtad 2022-05-11).
- [67] Darren Sawicz. URL: <https://www.princeton.edu/~mae412/TEXT/NTRAK2002/292-302.pdf>.
- [68] Nathaniel Pinckney. “Pulse-width modulation for microcontroller servo control”. I: *IEEE potentials* 25.1 (2006), s. 27–29. (Hämtad 2022-02-03).
- [69] Wikimedia Commons. *File:Servomotor Timing Diagram.svg* — *Wikimedia Commons, the free media repository*. 2021. URL: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Servomotor\\_Timing\\_Diagram.svg&oldid=584856309%7D](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Servomotor_Timing_Diagram.svg&oldid=584856309%7D) (hämtad 2022-04-16).
- [70] British Plastics Federation. *Polyvinyl chloride PVC*. URL: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pvc.aspx>.
- [71] British Plastics Federation. *Polyvinyl chloride PVC*. URL: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pvc.aspx>.
- [72] Mirko Pavleski. *DIY Simple Square wave generator up to 1mhz*. Febr. 2021. URL: <https://create.arduino.cc/projecthub/mircemk/diy-simple-square-wave-generator-up-to-1mhz-231375> (hämtad 2022-03-02).
- [73] Alex Frederiksen. *Alexfrederiksen/Meccanoidforarduino: An improved library written in C++ to allow an Arduino to interface with the MECCANOID*

- Robot Modules*. Juni 2019. URL: <https://github.com/alexfrederiksen/MeccanoidForArduino> (hämtad 2022-04-24).
- [74] Bengt Lennartsson. *Mjukare Rörelser Kapar Effekttoppar*. Utg. av Yvonne Jonsson. Nov. 2019. URL: <https://www.chalmers.se/sv/institutioner/e2/nyheter/Sidor/Mjukare-rorelser-kapar-effekttoppar.aspx>.
- [75] Quan Nguyen. *Mastering Concurrency in Python: Create faster programs using concurrency, asynchronous, multithreading, and parallel programming*. Packt Publishing Ltd, 2018.
- [76] *Hjälper Dig Att Välja Rätt Varje Gång*. URL: <http://kabelstickan.draka.se/k/56cc5bcb0c72b80003834d22>.
- [77] *SS-2320 Properties*. URL: <https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Special-Alloy/SS-2320.html> (hämtad 2022-05-12).

# A

## Lösningssökning



Figur A.1: Flödesdiagram över identifierade delfunktioner.

**Tabell A.1:** Kravspecifikation för produkten. K betecknar krav och Ö betecknar önskemål, där de senare är viktade på en skala 1-10.

Kategori	Kriterie	K/Ö	Vikt
Prestanda	Kunna värma en korv på under 20 sek	K	
	Tillbereda en french hotdog på under 1 min	K	
	Förvara minst 4 bröd	K	
	Förvara minst 4 korvar	K	
	Förvara korvarna kylda	Ö	4
Funktionalitet	Grilla korv	K	
	Mäta temperatur	K	
	Montera korv i bröd	Ö	10
	Tillföra Dressing	Ö	9
	Autonomt from beställning till servering	Ö	8
	Välja typ av korv	Ö	7
	Grilla bröd	Ö	6
	Välja typ av dressing	Ö	6
	Placera korvbröden i papper	Ö	5
Mått	Inte större än 70x70 cm i bas	Ö	5
	Inte högre än 100 cm	Ö	5
	Inte tyngre än 40 kg	Ö	5
Miljö	Inte avge för mycket restvärme	Ö	3
	Inte låta för mycket	Ö	2
Användning	Gränssnitt för att starta maskinen	K	
	Kunna fylla på med korv och bröd	K	
	Gränssnitt för att välja korv och sås	Ö	7
	Lättanvänt gränssnitt	Ö	3
	Ergonomiskt att fylla på korv och bröd	Ö	2
Underhåll	Lättstädad	K	
	Enkel att demontera	Ö	6
	Minimalt antal rörliga delar	Ö	4
	Robust	Ö	4
Kostnad	Produktionskostnad på högst 4000 kr	Ö	2
Säkerhet	Nödstopp	K	
	Enklare robot som hanterar korv	K	
	Livsmedelssäkert	K	
	Inga exponerade elektriska komponenter	Ö	6
	Inga vassa delar	Ö	2
Utseende	Se bra ut	Ö	3

Tabell A.2: Morfologisk matris.

Förvara korbv	Horisontellt fack	Cylinder	I en kyl utanför maskinen	
Förvara korbvbröd	Magasin stående	Magasin liggande	Separat i påse	
Värma korbv	Rör runt korbv	Spett i korbv	Rör och spett	
Tillsätta dressing	Trycka med kolv på dressingtub	Spruta	En klämma på spenen	
Form på konstruktion	Cirkulär	Linje	Fyrkant	halvcirkel
Välja korbv	Tväfackssystem	Bildigenkänning	Manuellt	
Välja dressing	Olika stationer	Magasin	Roterande	hållare med typer
Värma korbvbröd	Samma cylinder	Metallrör i	Värmepress	Värmevägg likt brödrost
Gränssnitt med maskinen	touchskärm	analoga knappar		
Hålla korbv i värming	Robotarm	Metallrör	en bottenlucka	fixtur
Servera färdiga korbven	Brödklo lämnar i upphämtningshållare	åker med transportband	Tas från under värmmedelen	
Temperaturmätning	Sticka i korbven	Laser		
Montera korbv i bröd	Trycka ner korbv med kolv	Tratt som töjer bröd	Rullband och klämma	droppa ner med hjälp av tratt
Placera bröd i papper	Manuellt	autonomt	inte alls	
Transportera korbvbröd	Klo/skopa på räls	Klo/skopa på arm	Transportband	Manuellt
Transportera korbv	Klo på räls	Klo på arm	Transportband	Skena

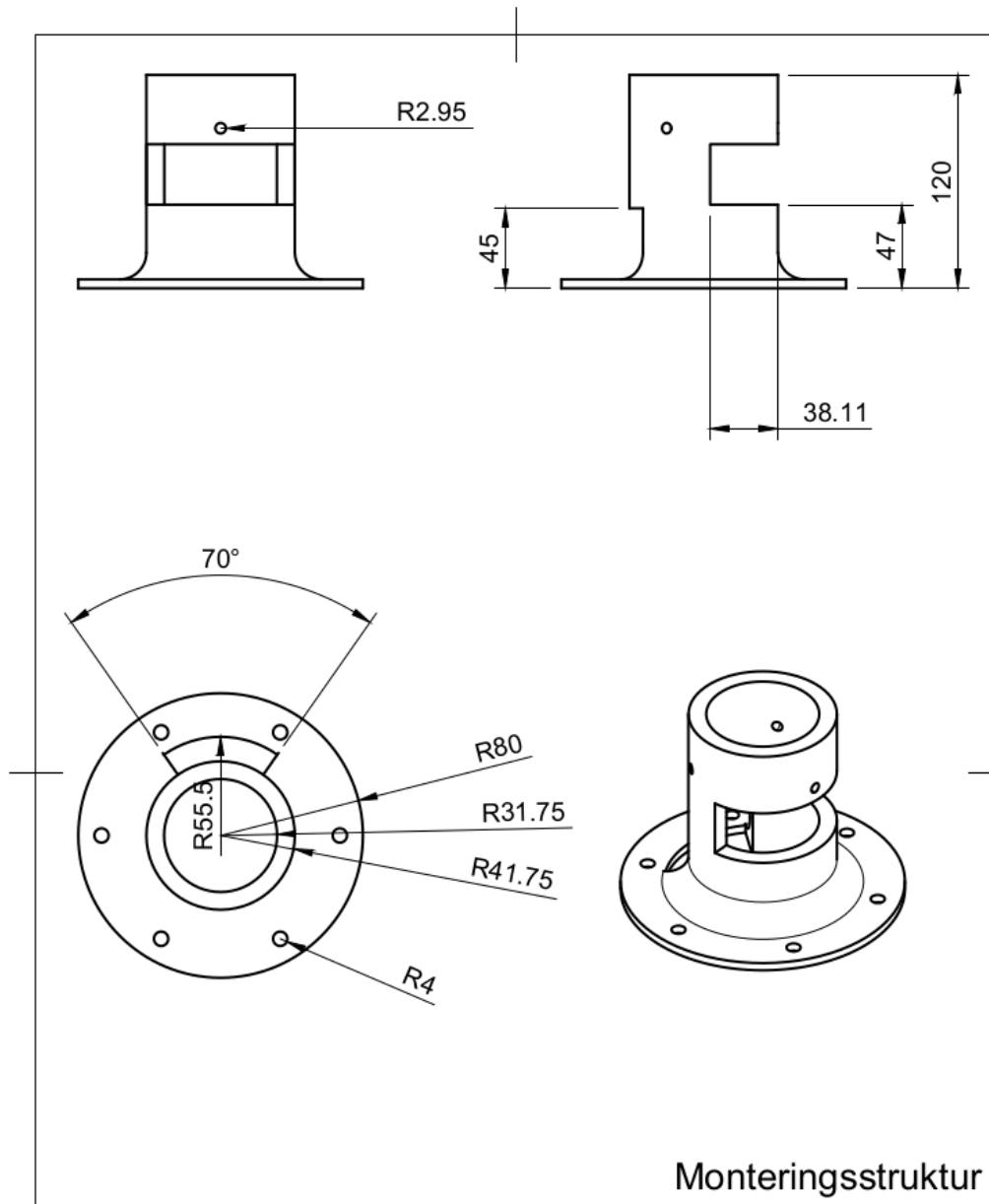


**Figur A.2:** Ett urval av bröd för referens av form och storlek.

# B

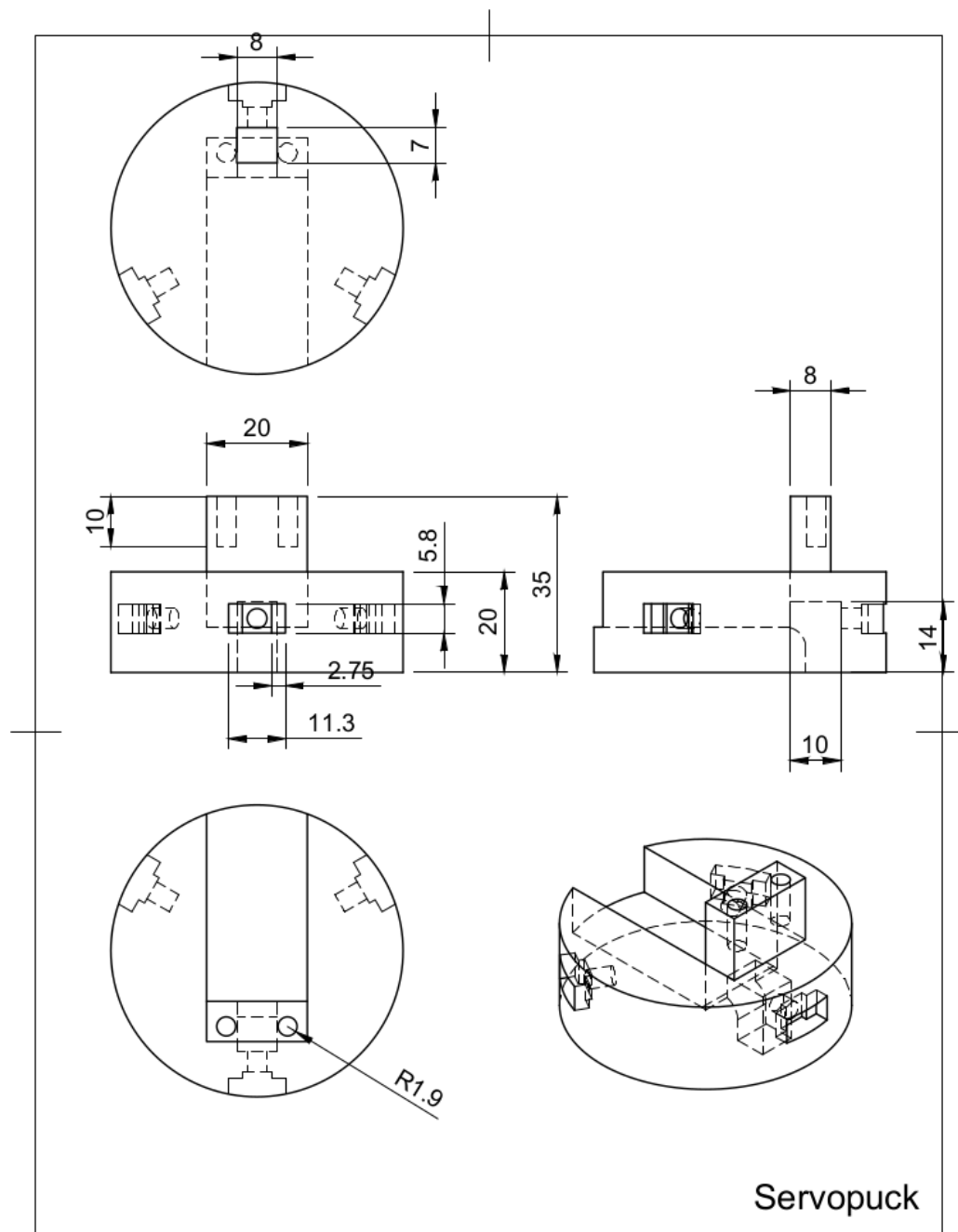
## Ritningar

Nedan följer ritningar av systemets centrala komponenter. Notera att endast de viktigaste måtten är utmärkta.

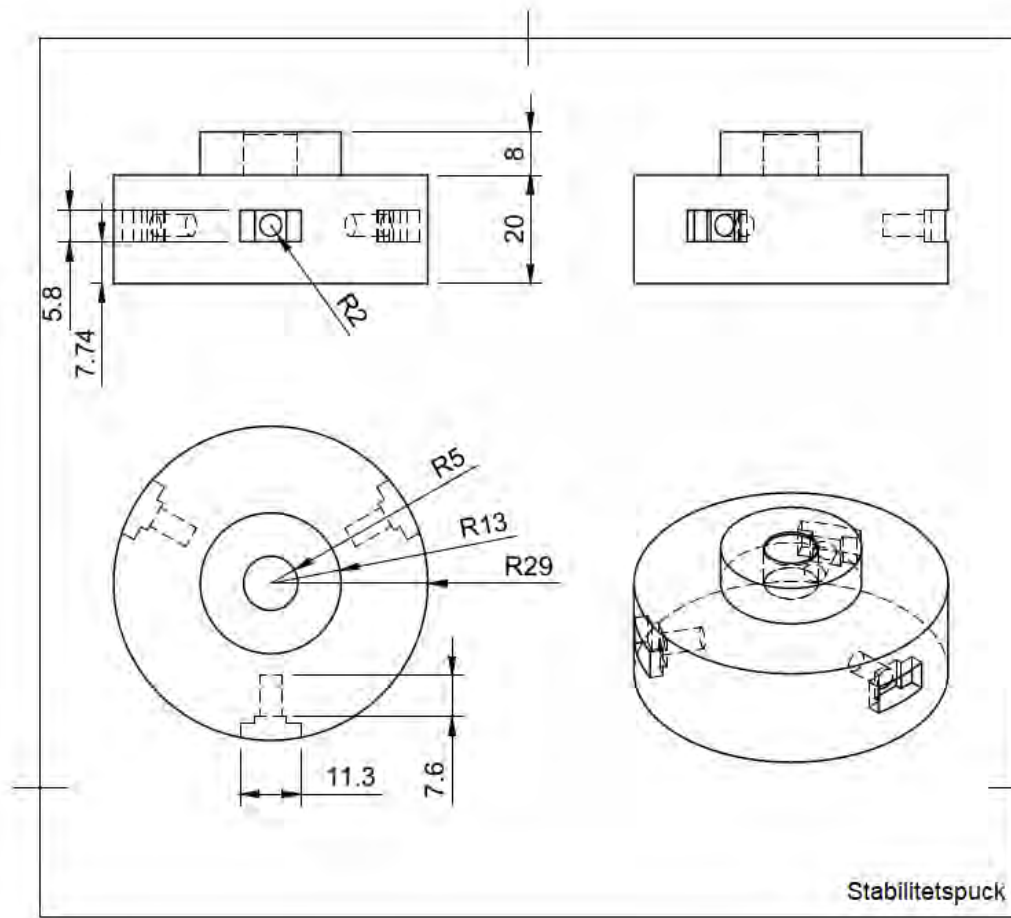


Figur B.1: Ritning på Monteringsstrukturen.

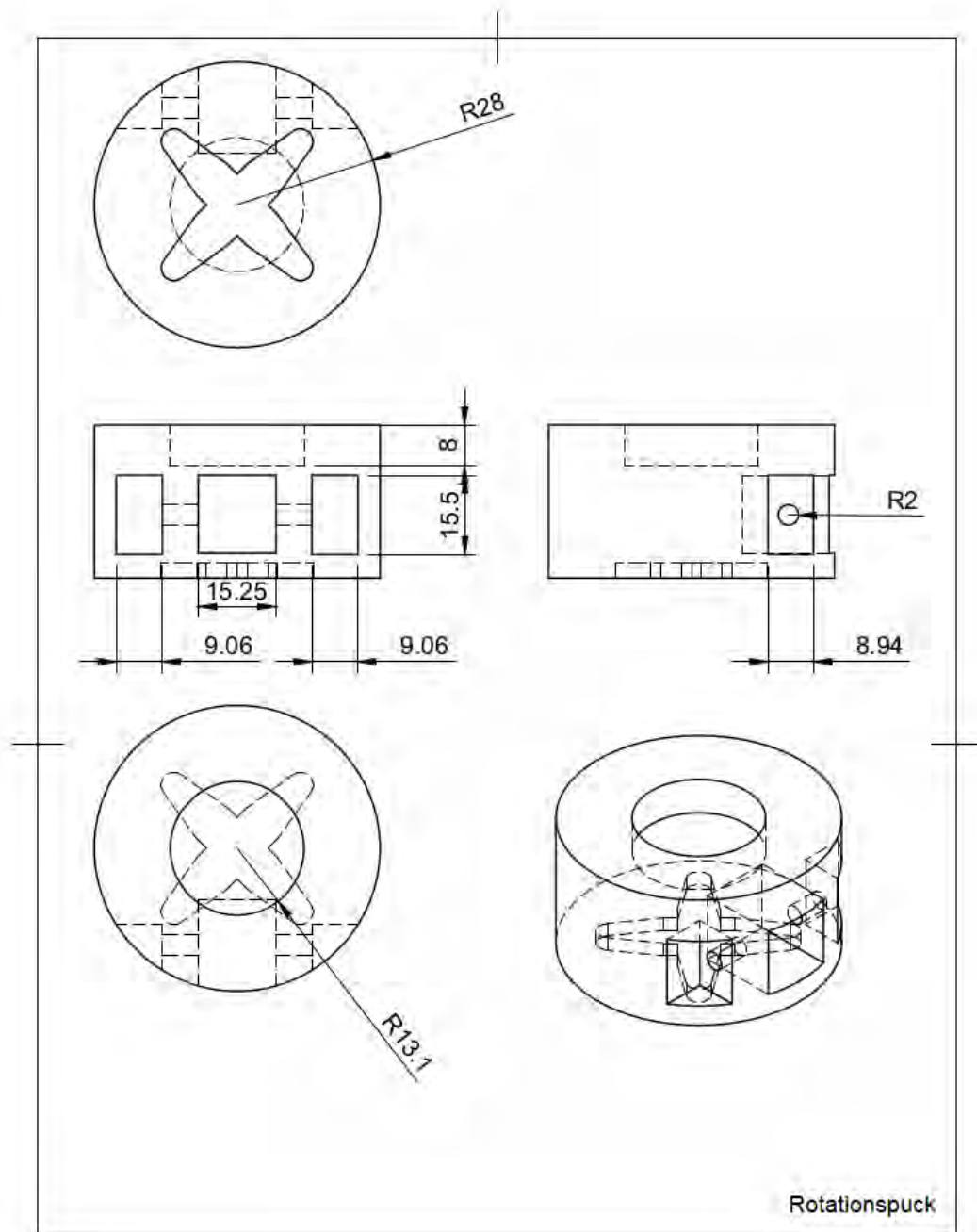




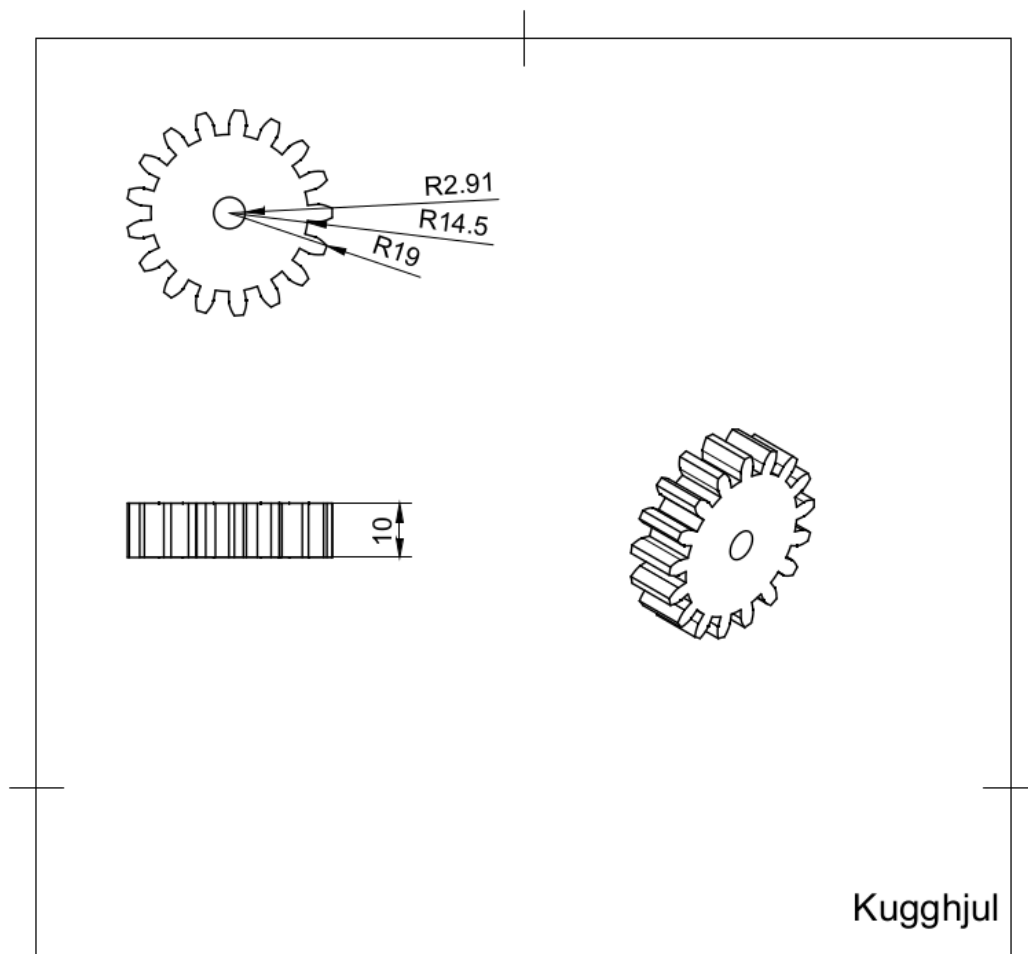
Figur B.2: Ritning på Servopucken.



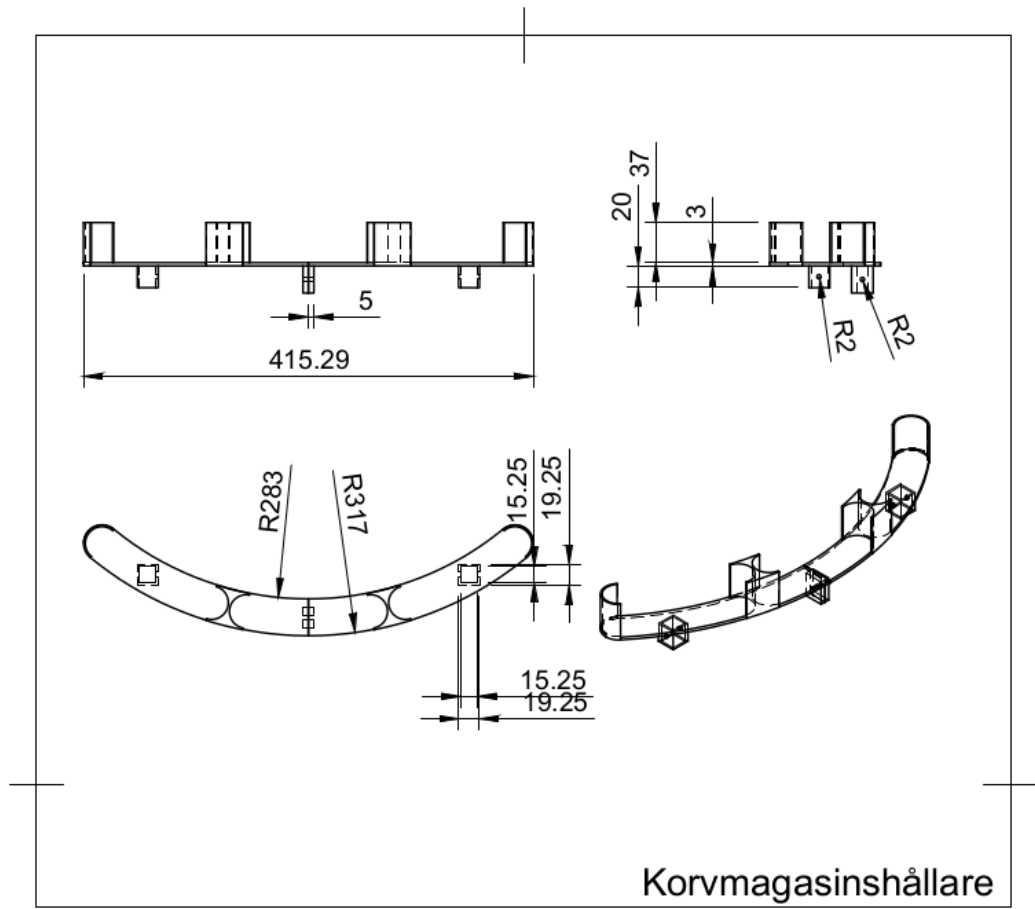
Figur B.3: Ritning på Stabilitetspucken.



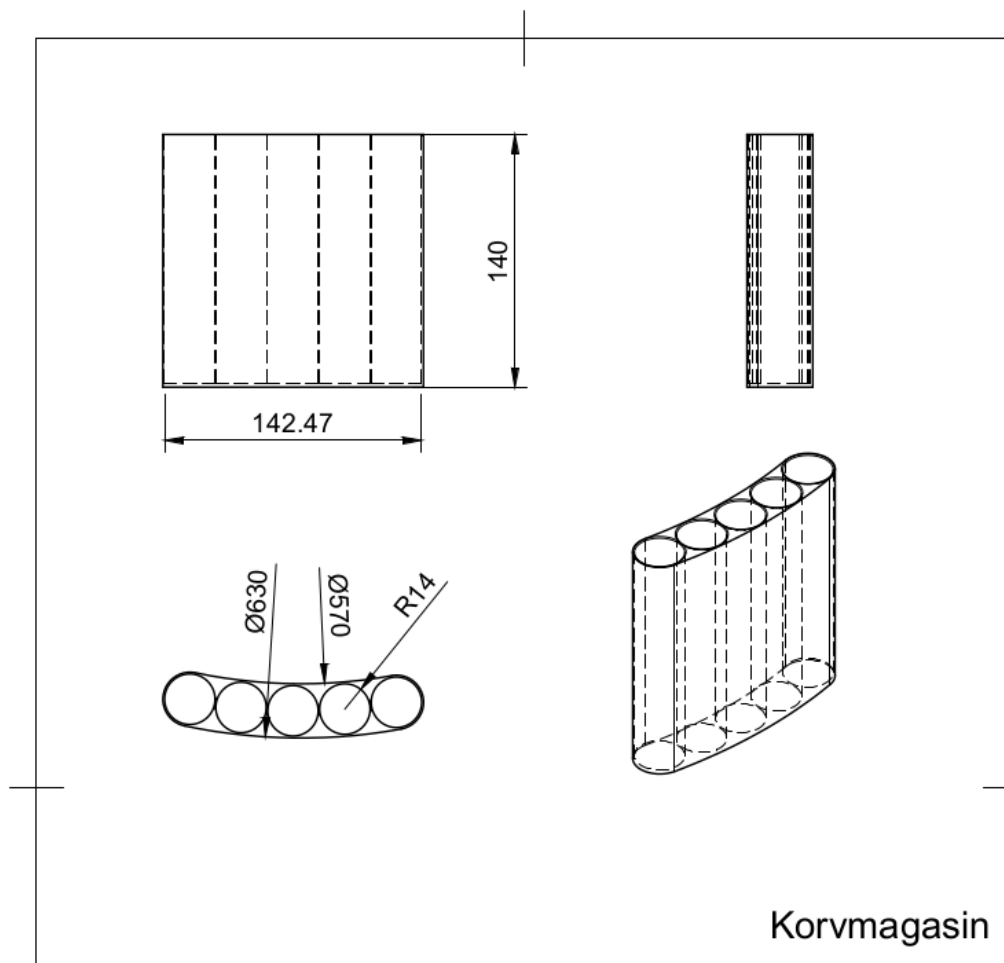
Figur B.4: Ritning på Rotationspucken.



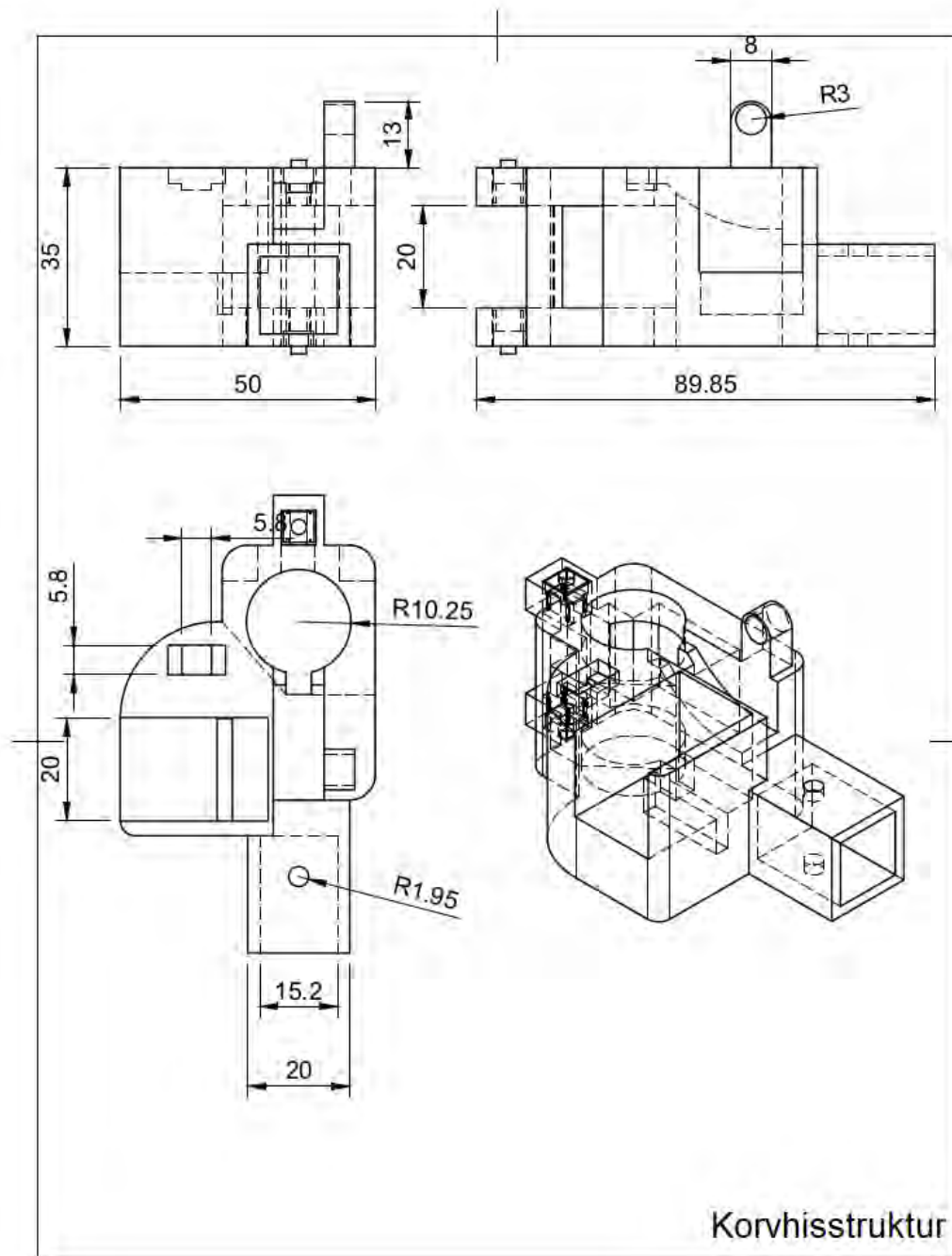
Figur B.5: Ritning på Kugghjul till korvhiss.



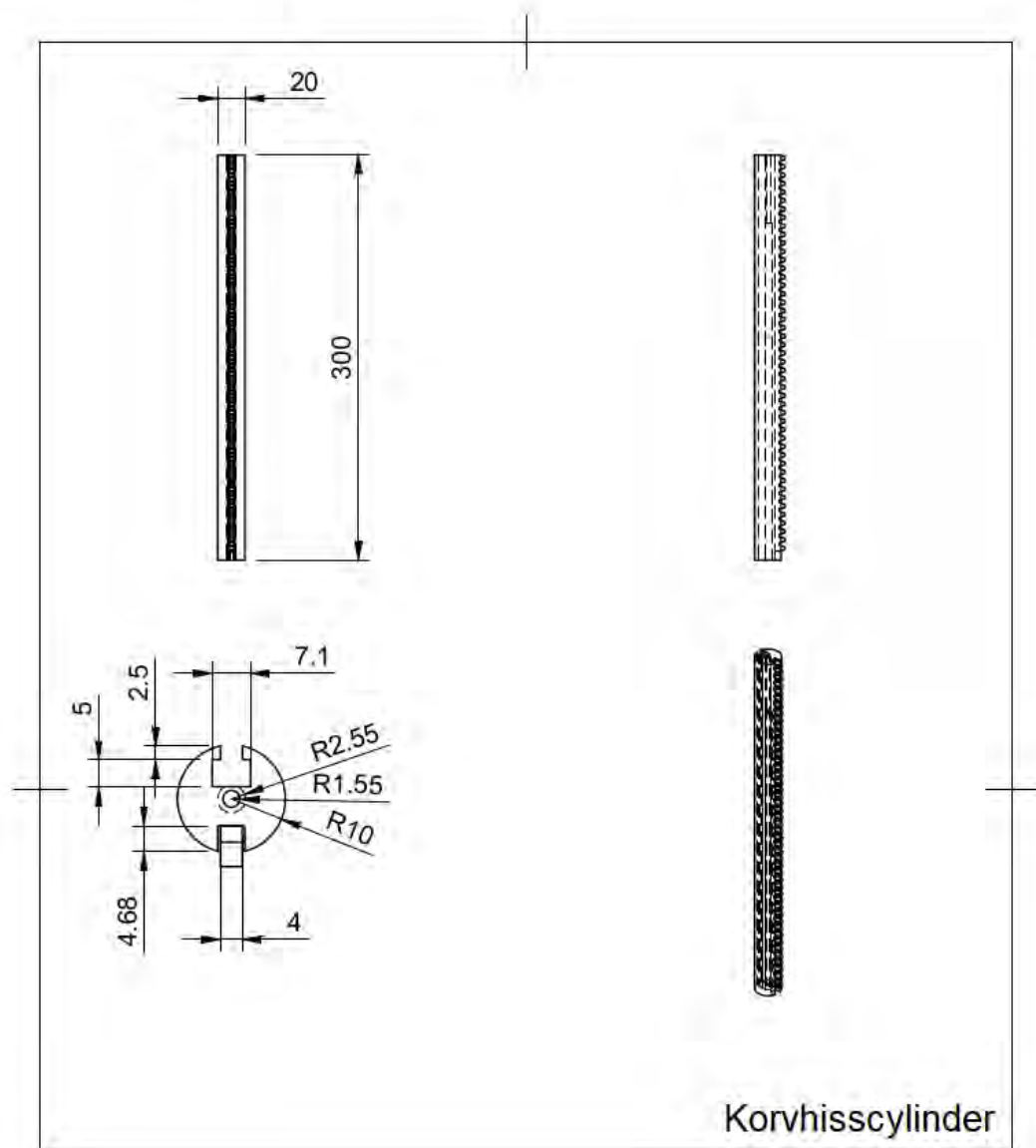
Figur B.6: Ritning på Korvmagasinhållare.



Figur B.7: Ritning på Korvmagasin.

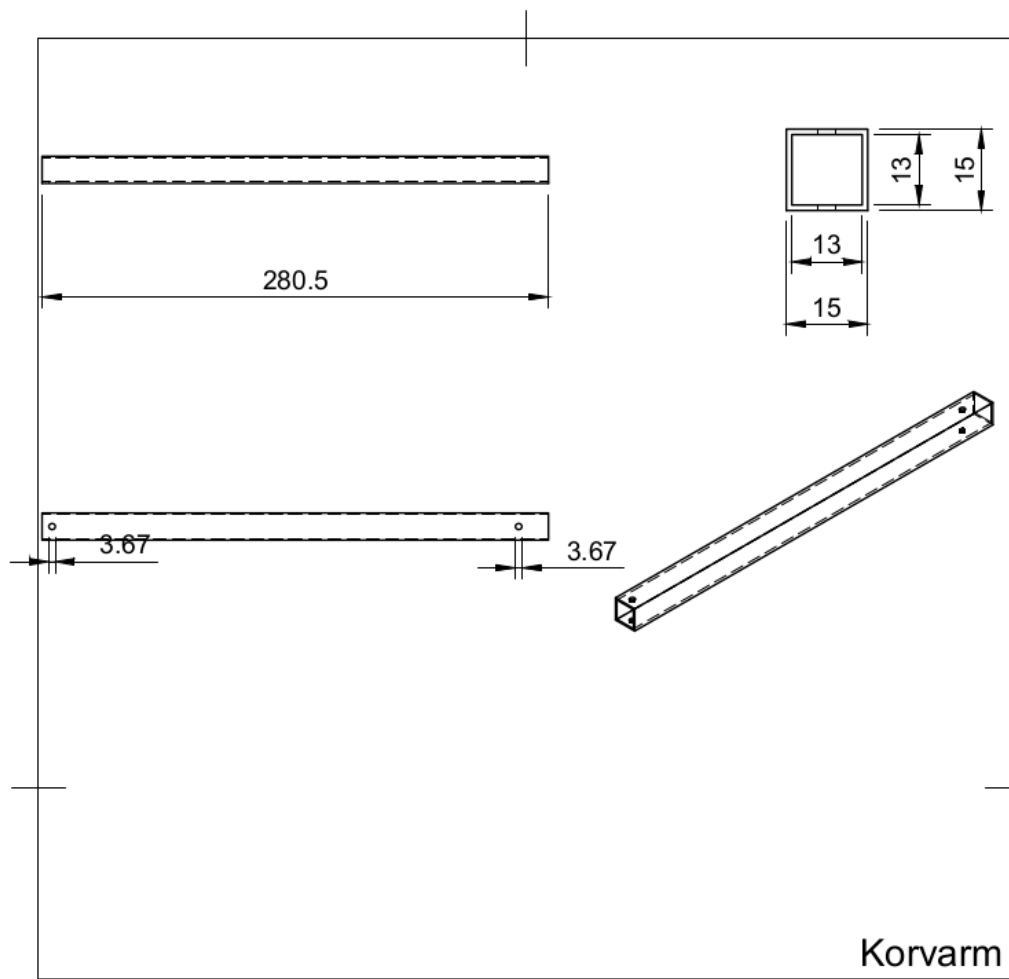


Figur B.8: Ritning på Korvhisstruktur.

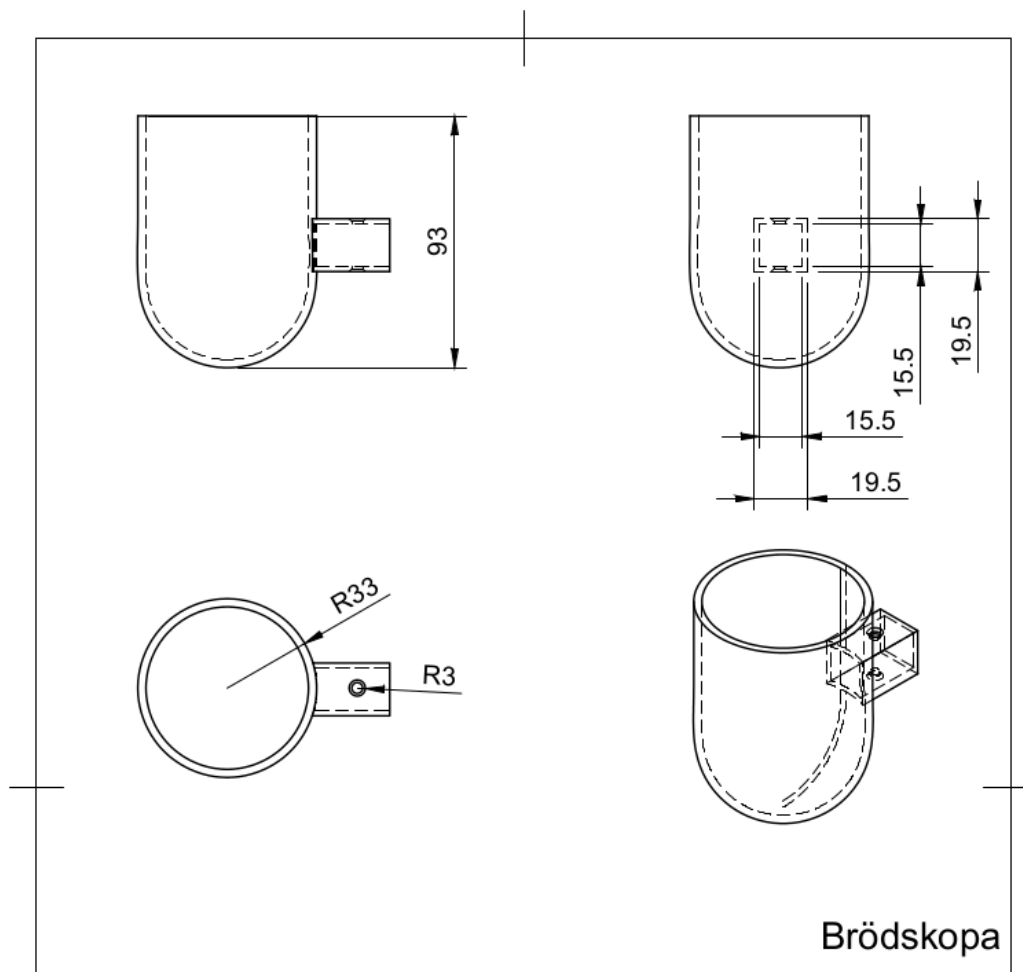


Figur B.9: Ritning på Korvhisscylinder.

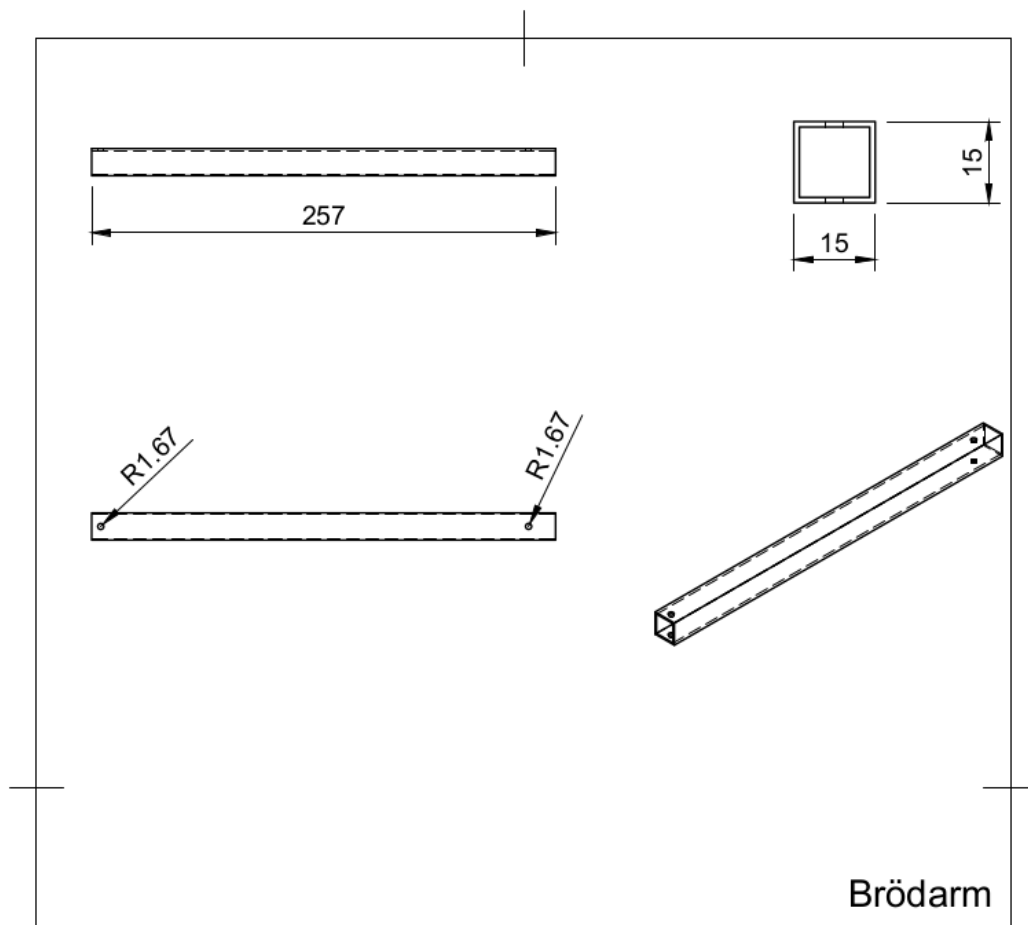




Figur B.10: Ritning på Korvarm.

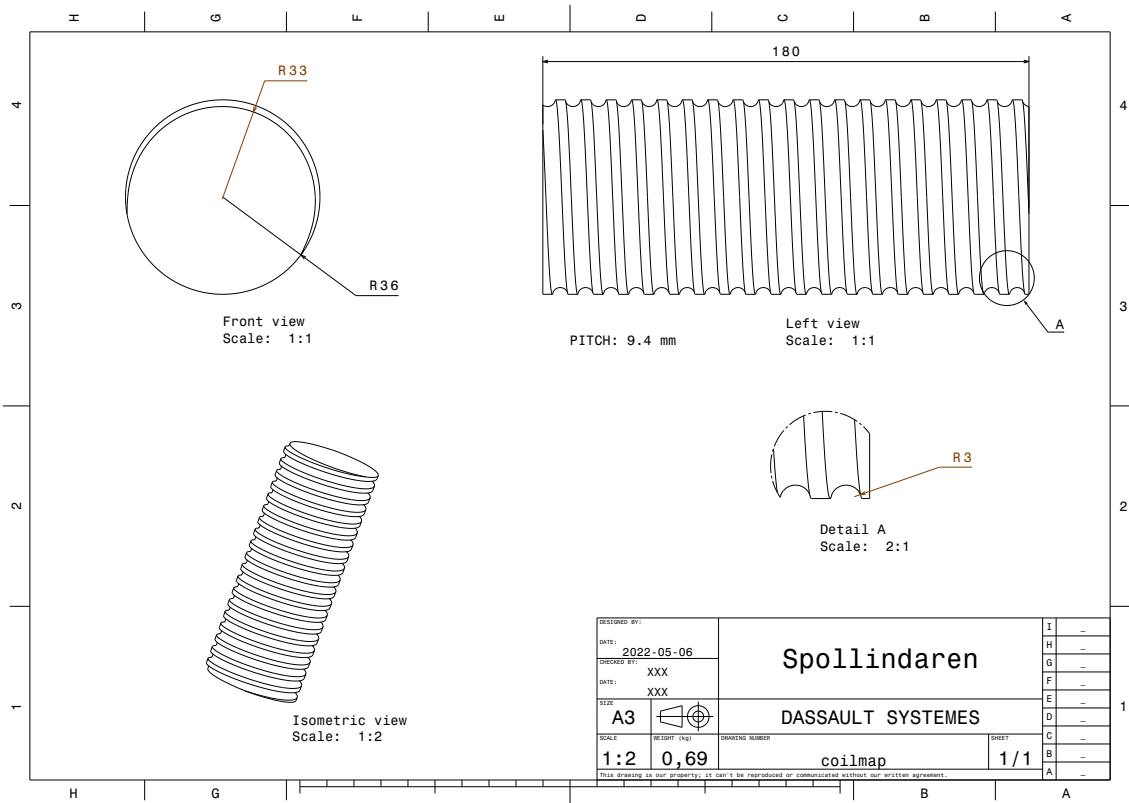


Figur B.11: Ritning på Brödskopa.



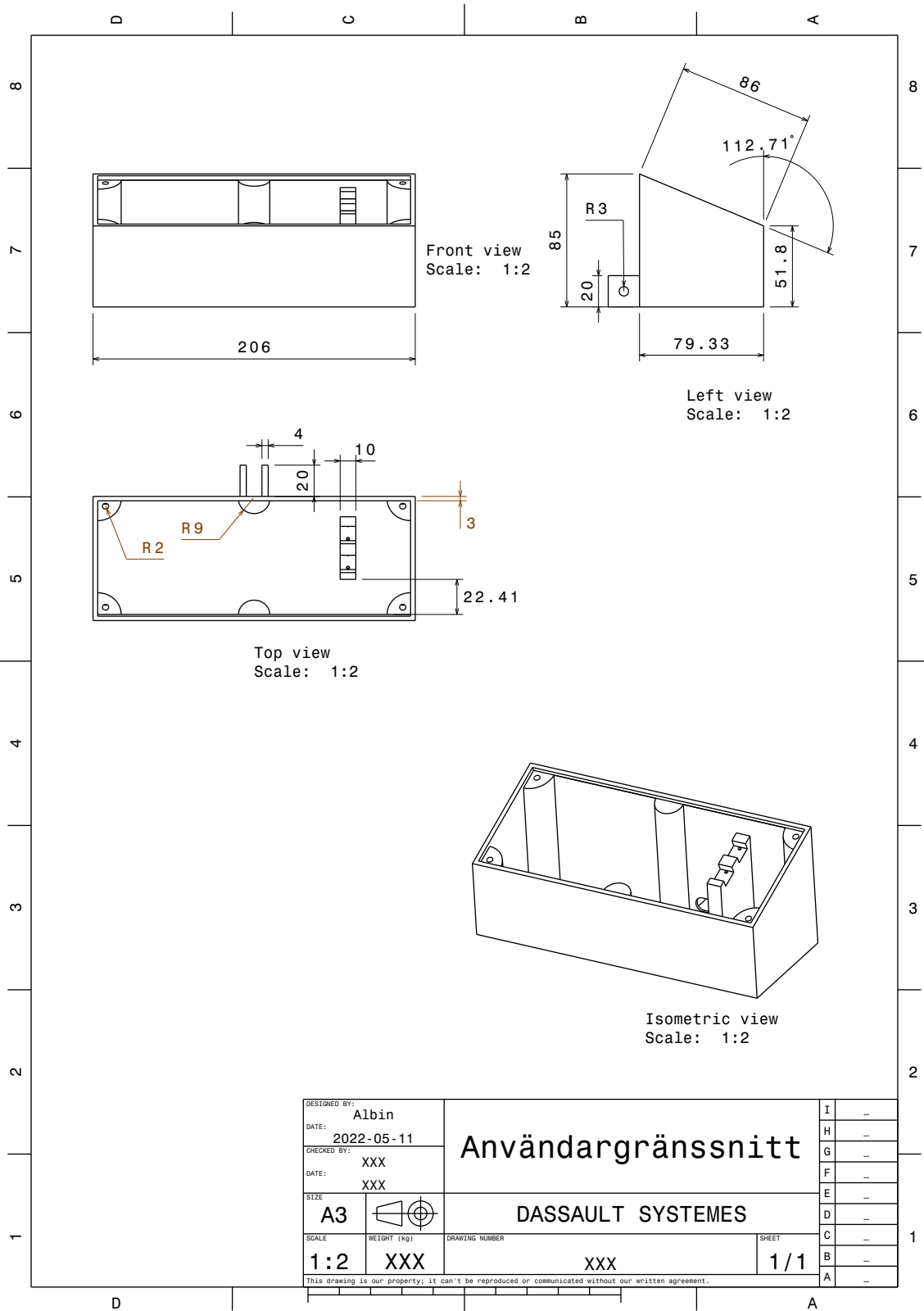
Figur B.12: Ritning på Brödarm.

## B. Ritningar

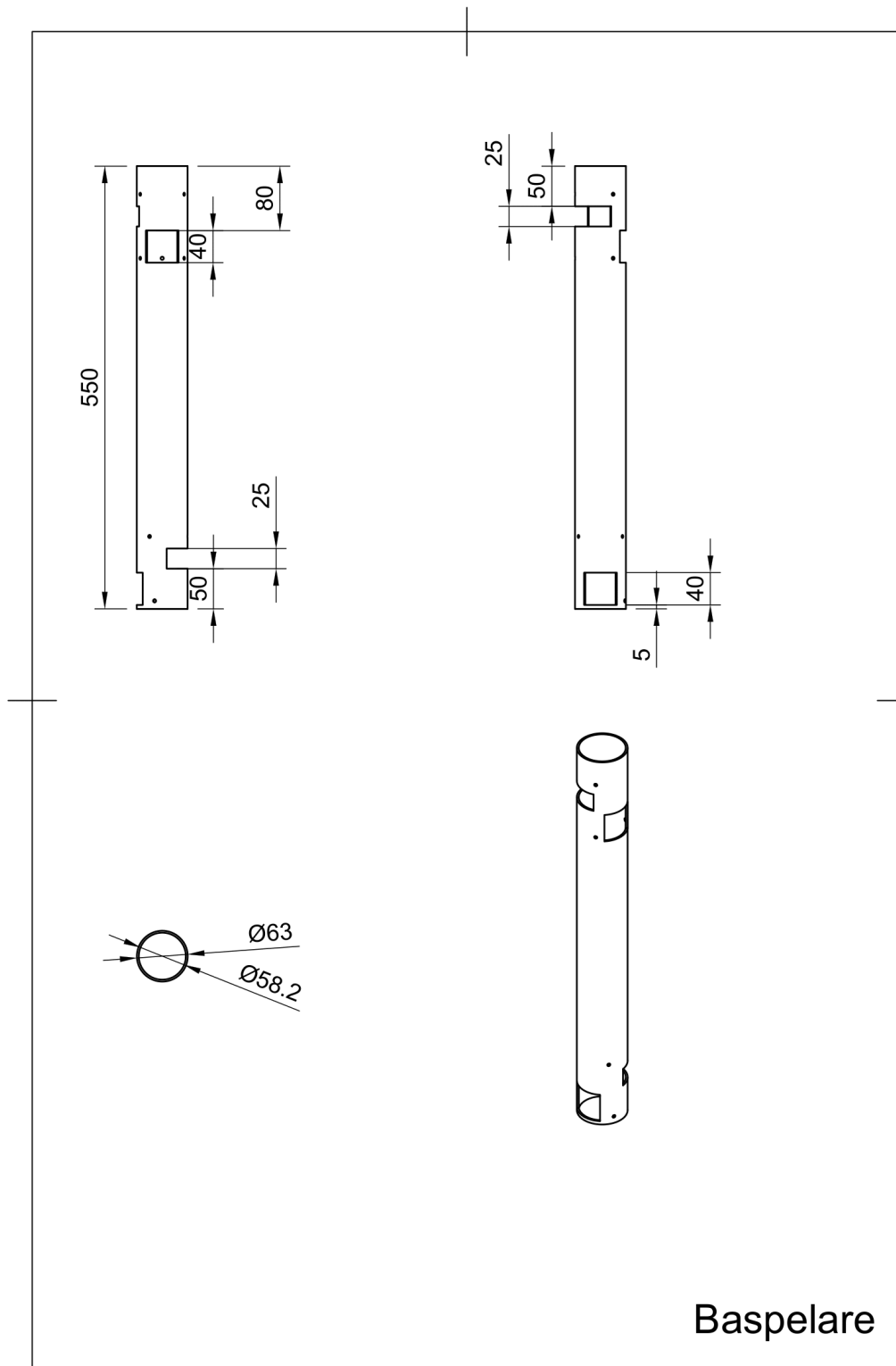


Figur B.13: Ritning på spollindarmallen.

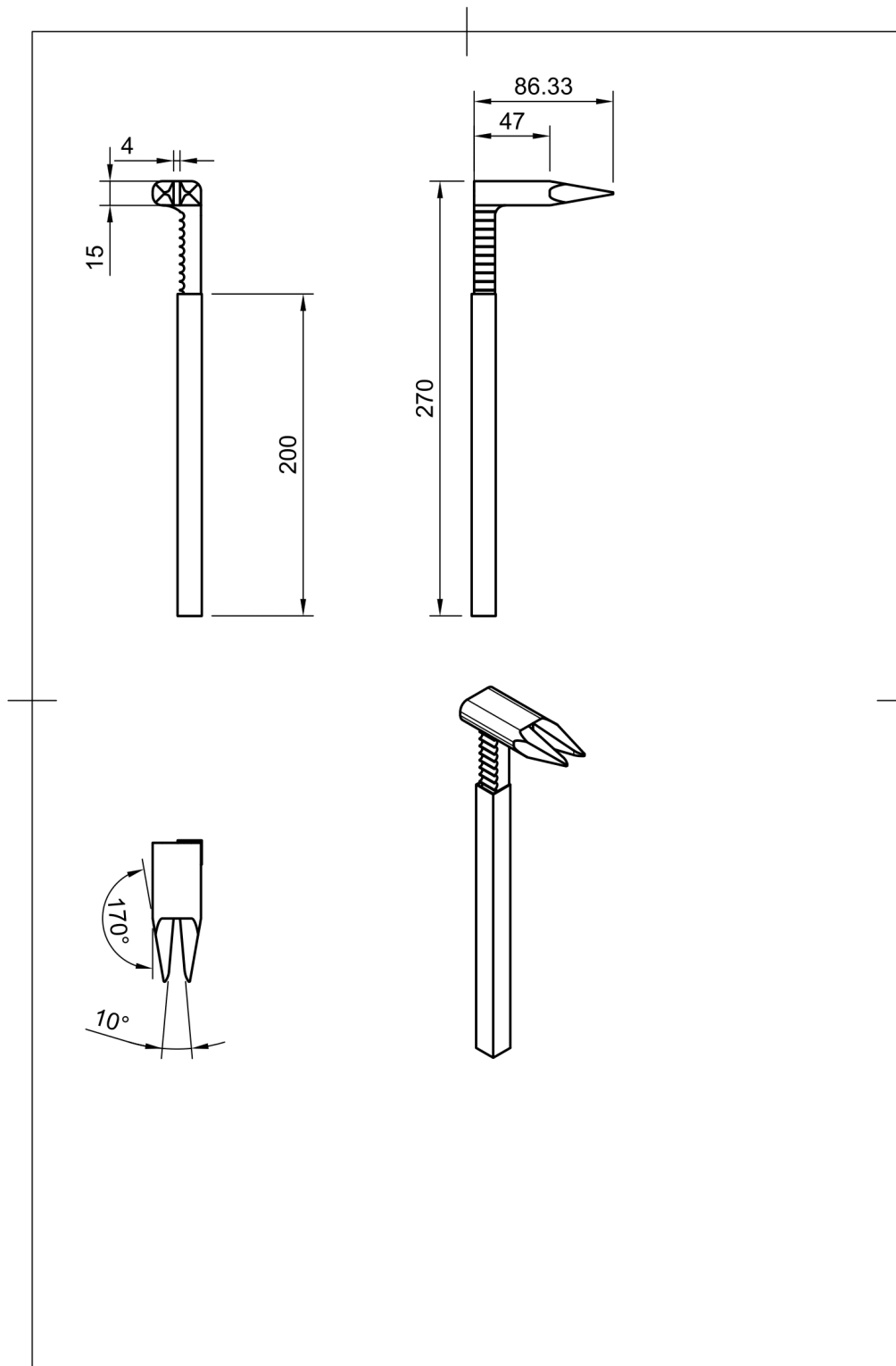
# B. Ritningar



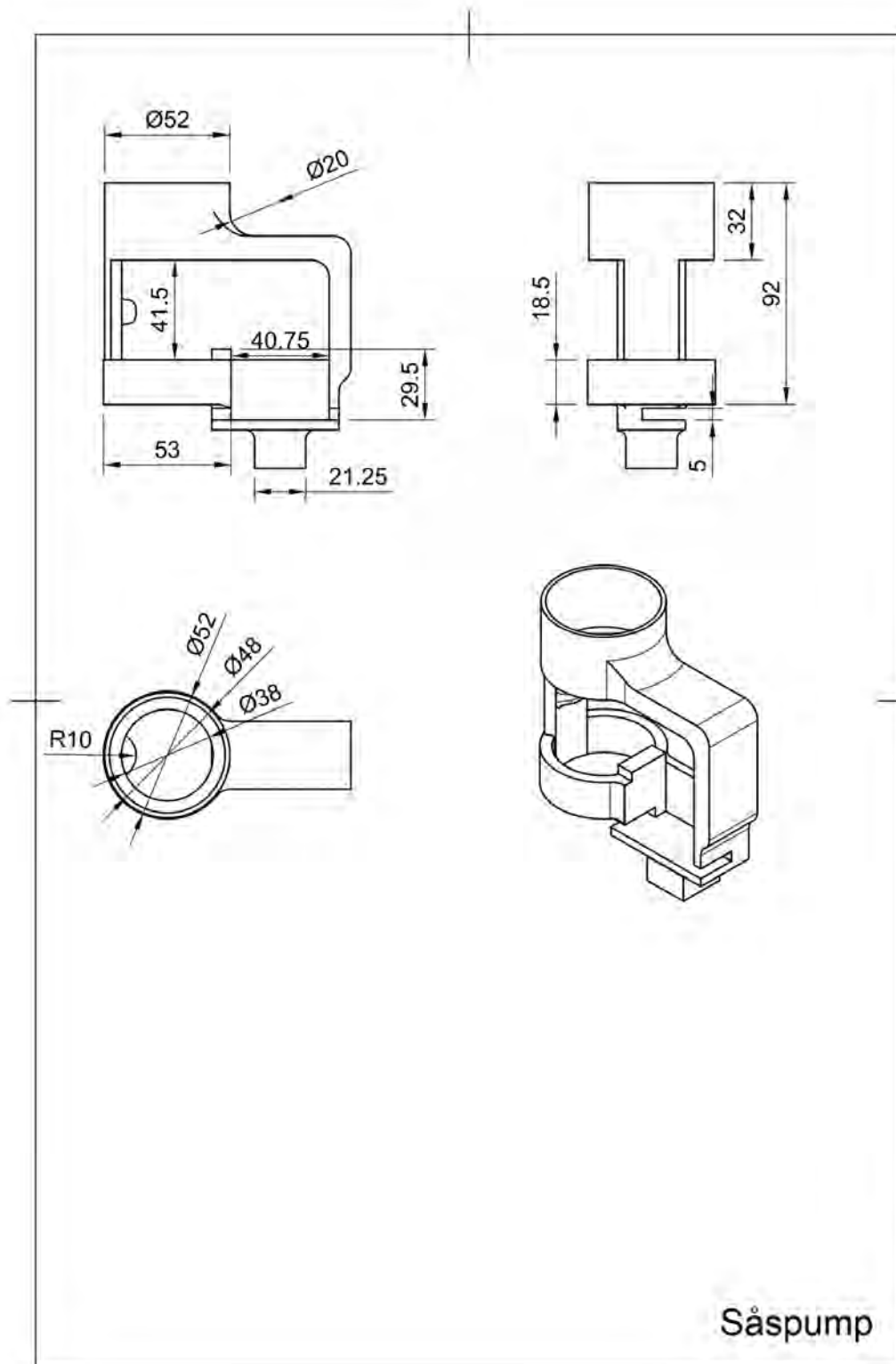
Figur B.14: Ritning på lådan till användargränssnittet.



Figur B.15: Ritning på baspelare.

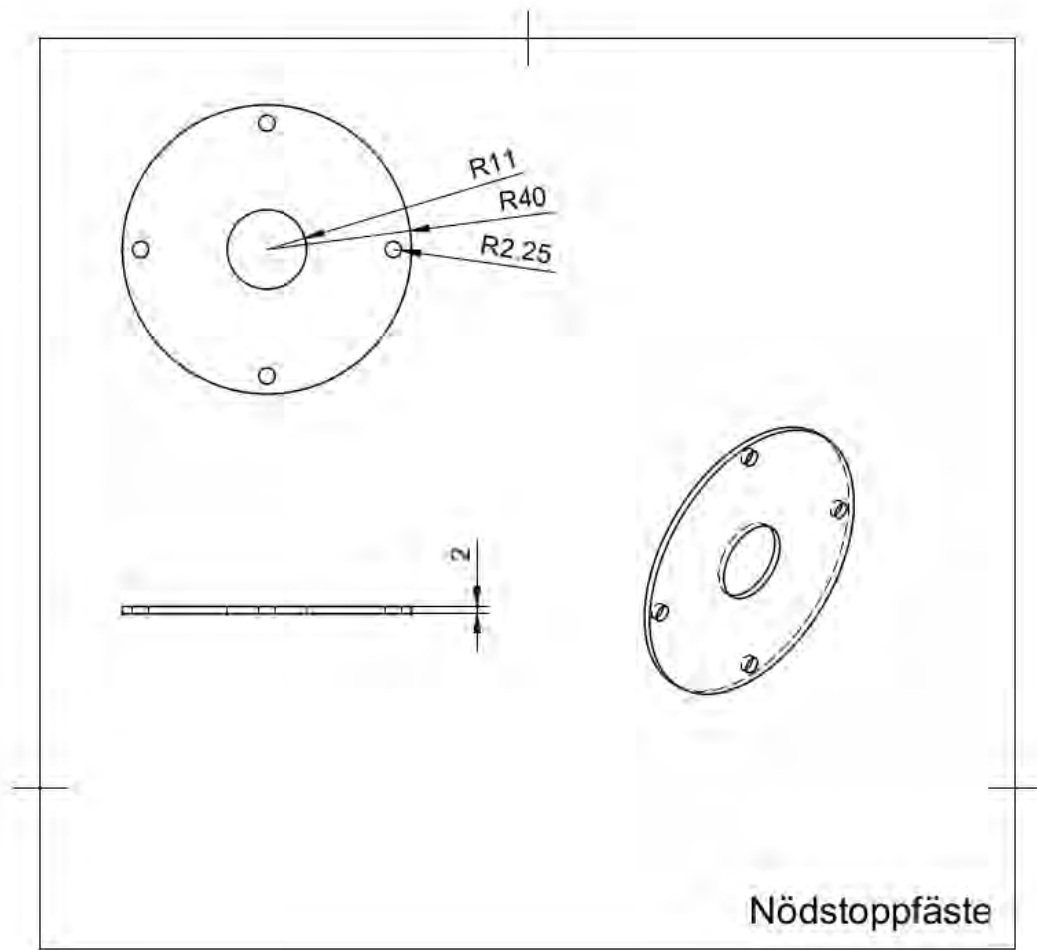


Figur B.16: Ritning på korvavtagare.

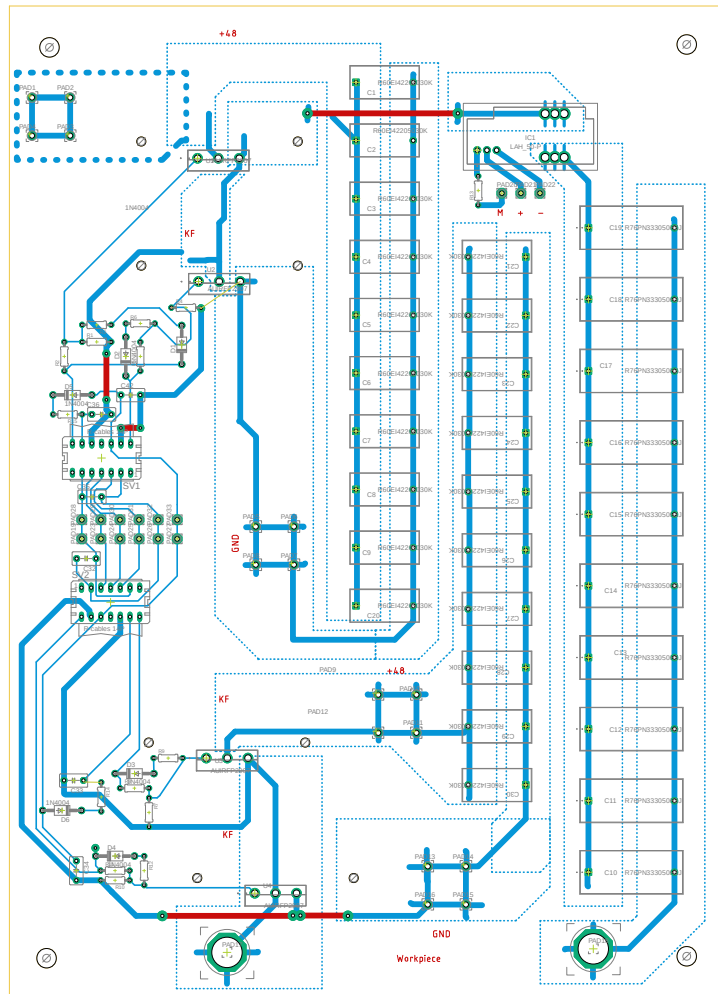


Figur B.17: Ritning på såspump.





Figur B.18: Ritning på nödstoppsfästet.



2022-05-12 15:15 C:\Users\ErikL\Downloads\Korvkrets3\_tunn\_uppdaterad.brd

Figur B.19: Kretskortsdesign för induktionskretsen.

# C

## Bilder på konstruerade komponenter



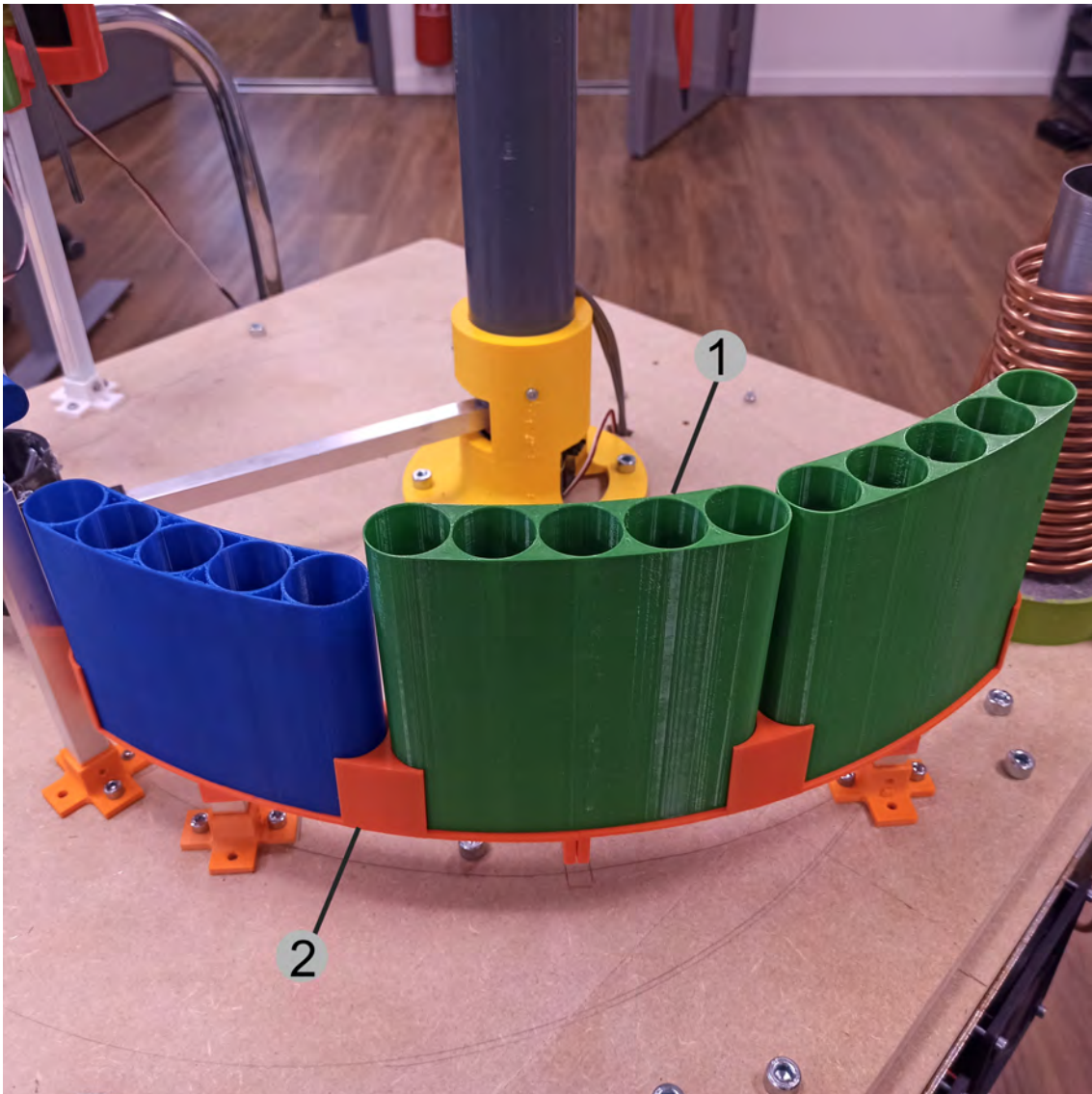
**Figur C.1:** Hela produkten med alla komponenter fastmonterade



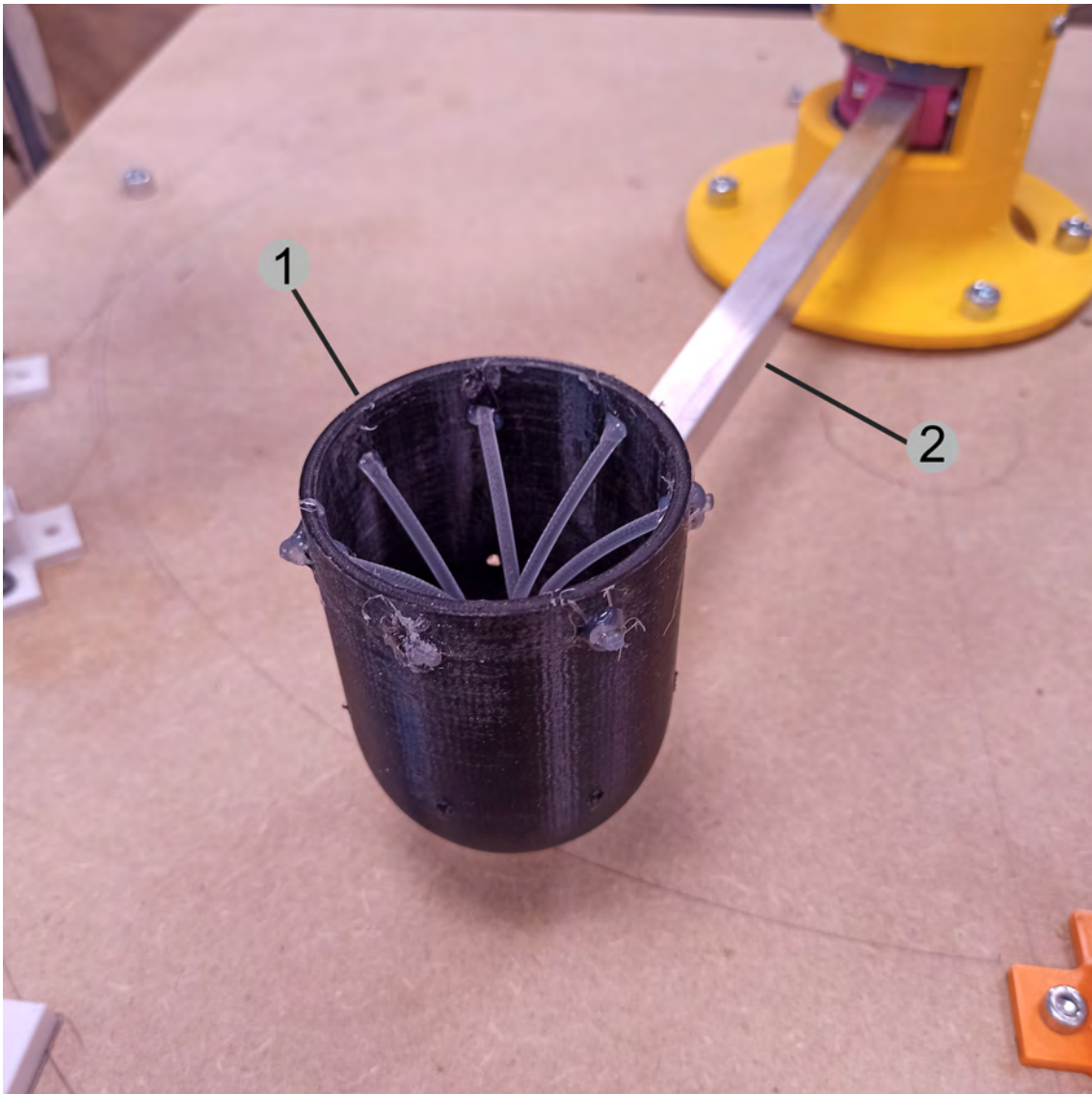
**Figur C.2:** Basspelaren (1) fastmonterad på vagnen med monteringsstrukturen (2) samt puckpaketen (3) monterade inuti



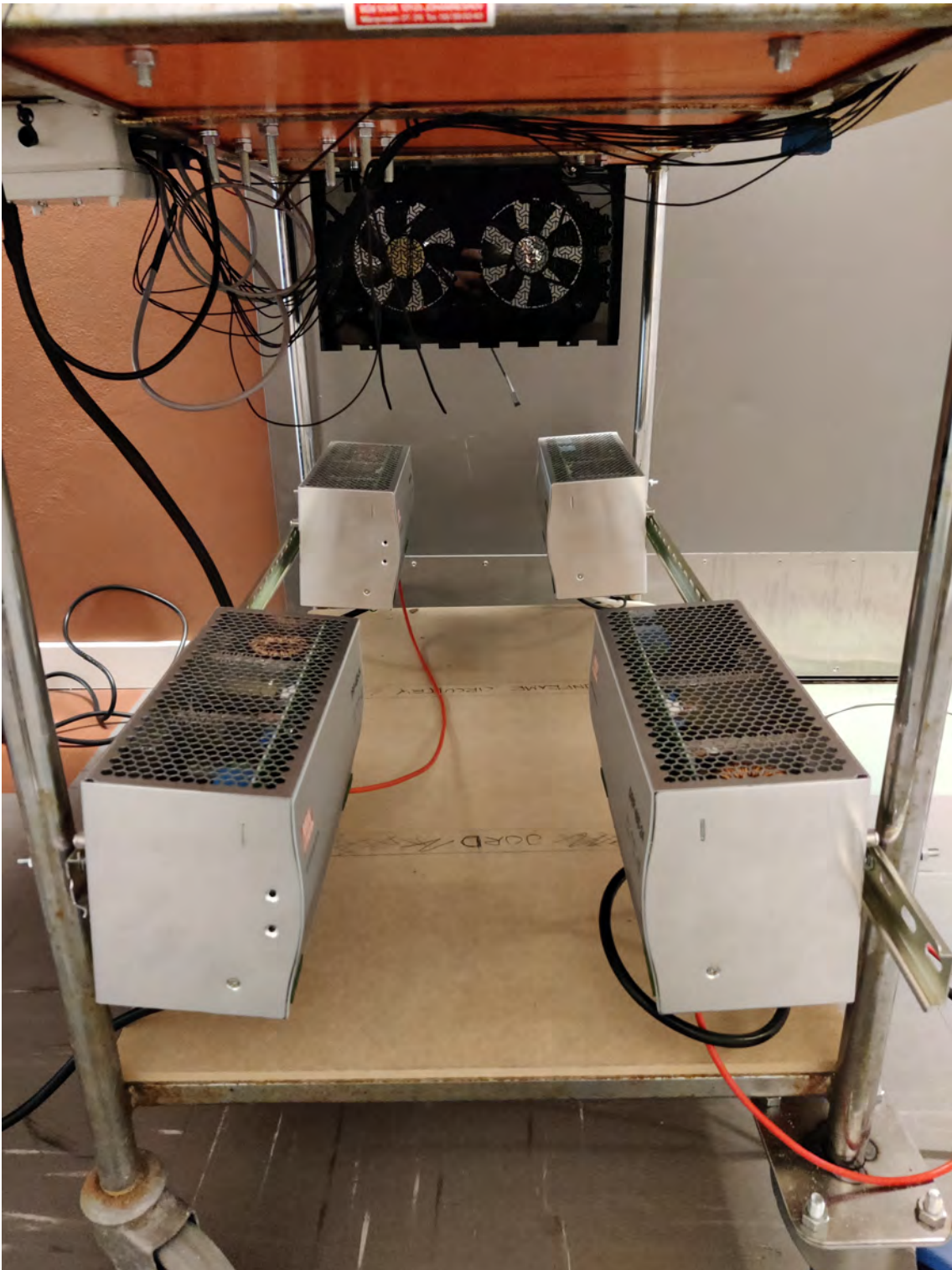
**Figur C.3:** Korvhissen monterad på baspelaren. Strukturen (1), med cylindern (2) imonterad, fäst på armen (3). Ytterligare är kugghjulet (4) fäst.



**Figur C.4:** De tre korvmagasinen (1) placerade maggasinhållaren (2), som i sin tur är fäst i vagnen.



**Figur C.5:** Brödskopan (1) med spröten fastmonterade och hela skopan fastmonterad på armen (2).

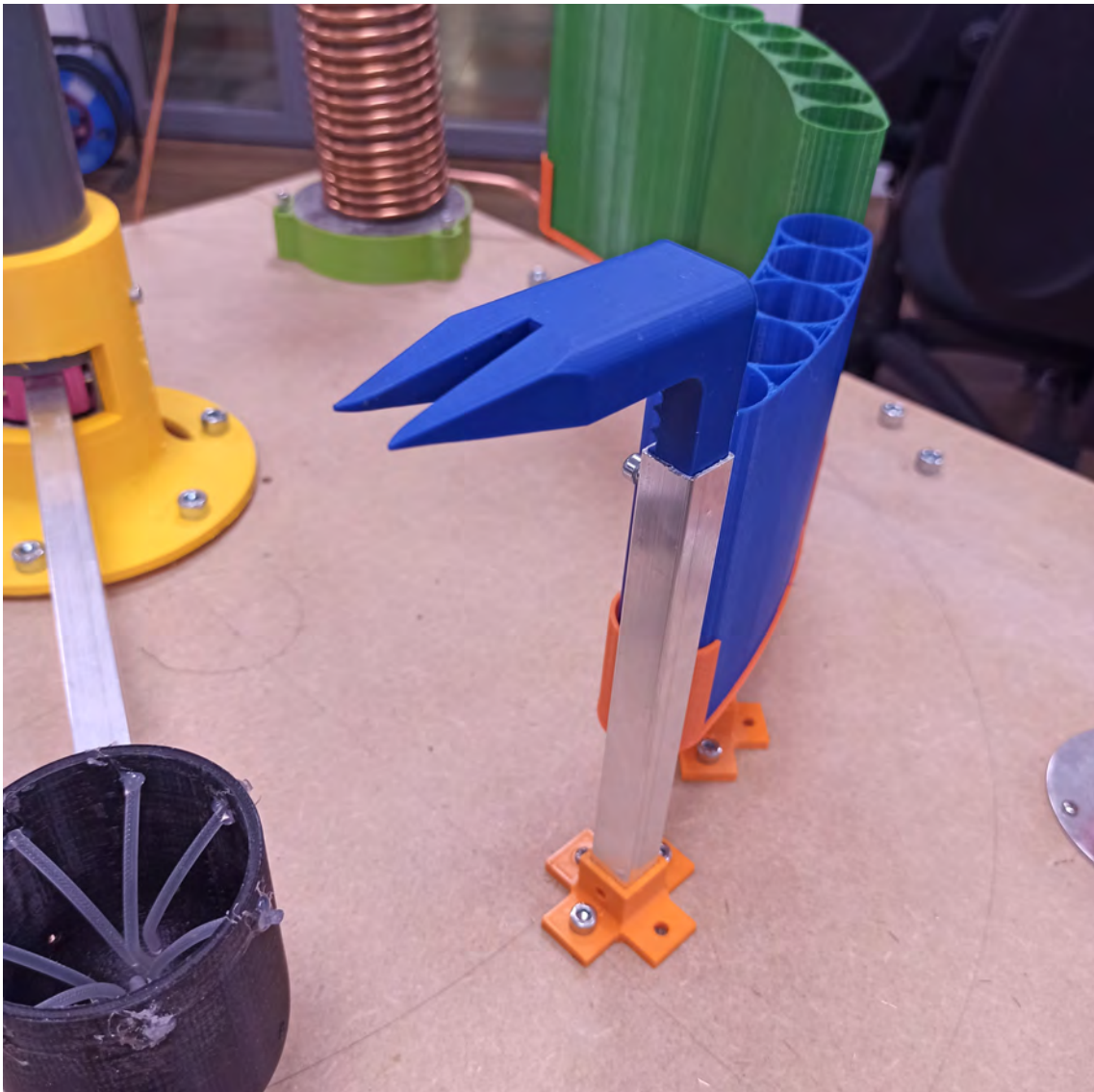


Figur C.6: Nätaggregaten fästa på skenorna som i sin tur är fästa på vagnen

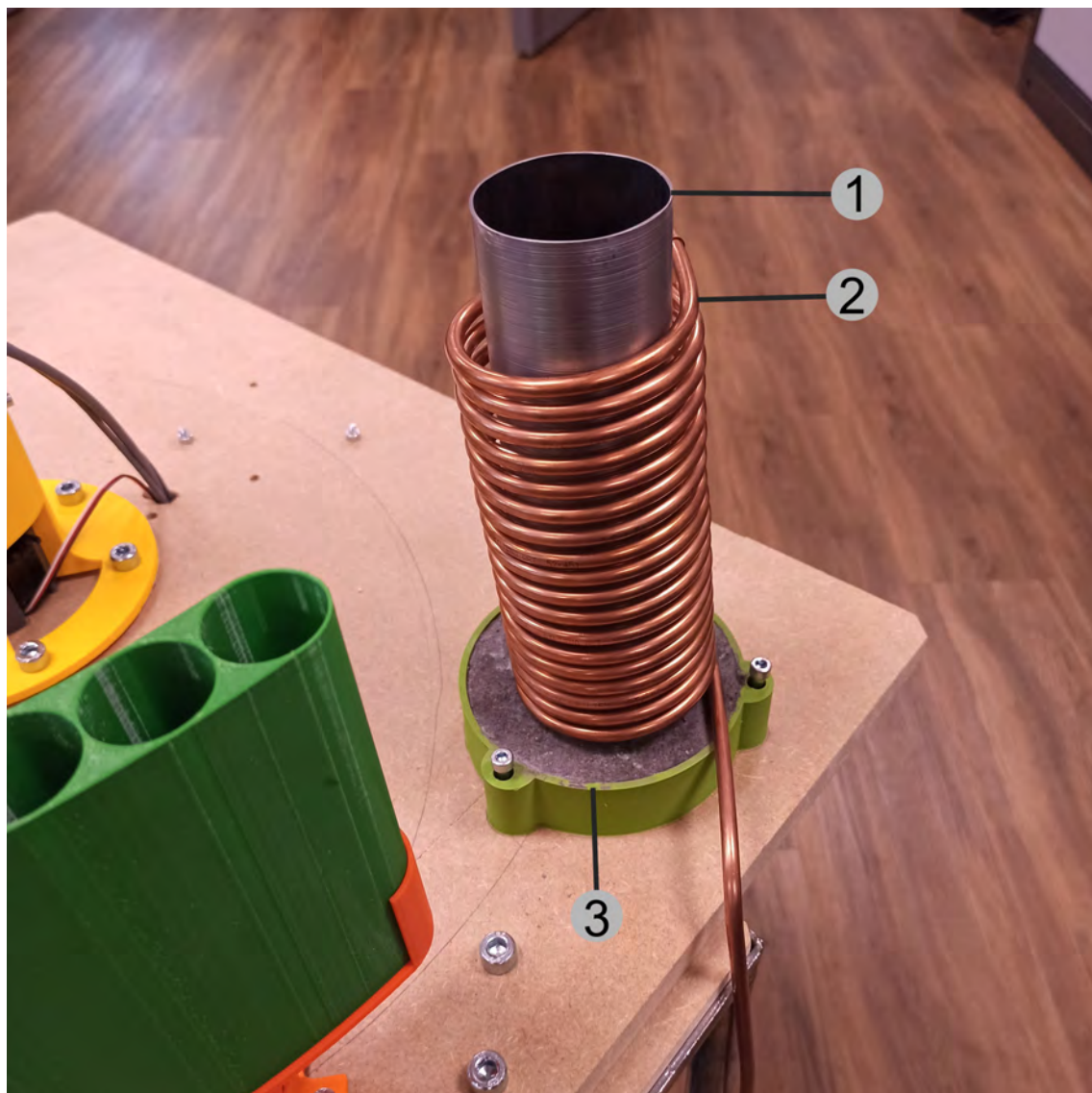




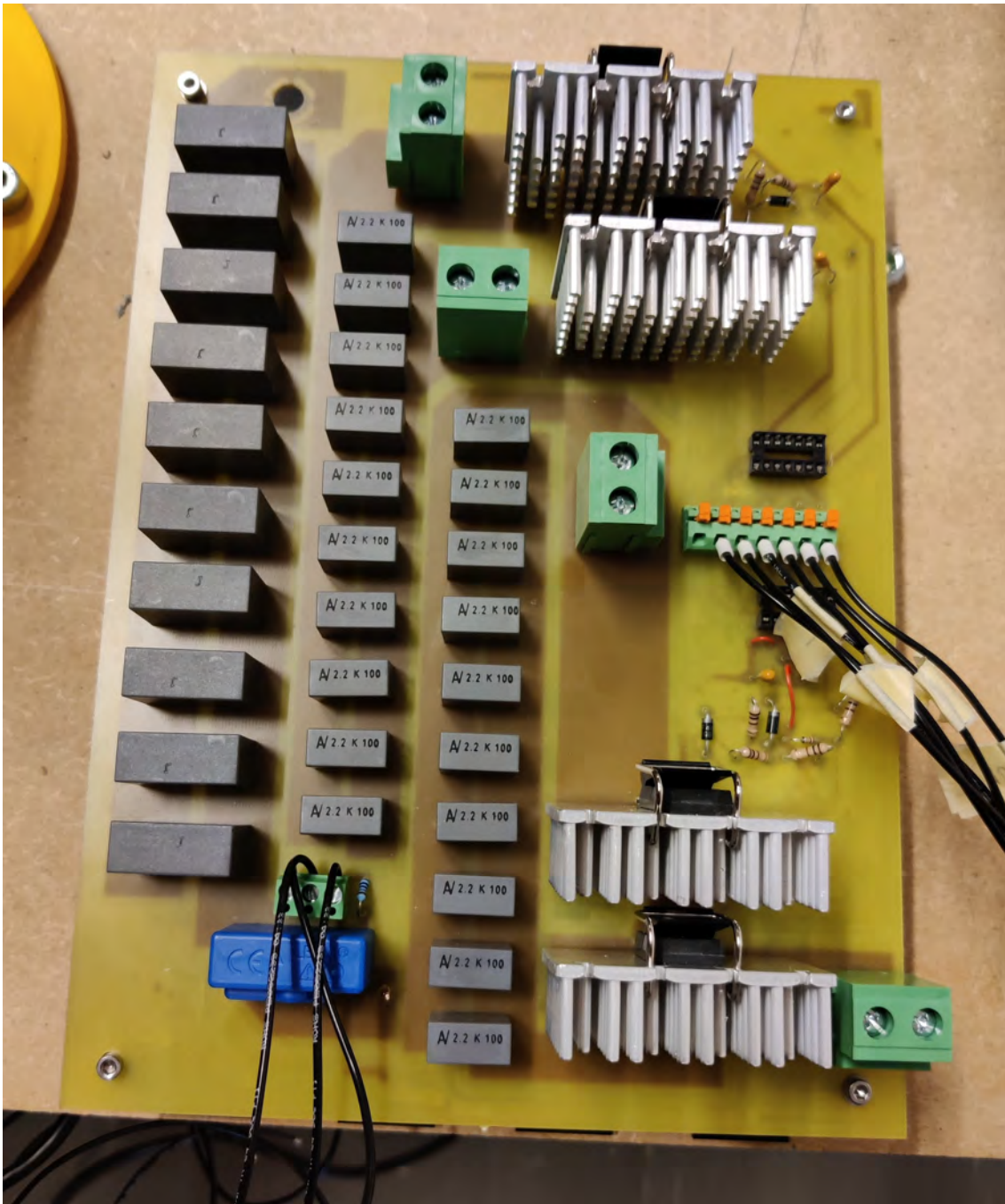
**Figur C.7:** De två såspumparna fastmonterade i basplattan, den bakre pumpen har spenen placerad i sig.



**Figur C.8:** Korvavtagaren fastmonterad i basplattan.



**Figur C.9:** Cylindern (1) fastmonterad i vagnen med cylinderfixturen (3). Runt om är spolen (2), som i detta läge inte är fastmonterad.



Figur C.10: Induktionskretsen med komponenter fastlödda.



Figur C.11: Användargränssnitt.



# D

## Komponentlista

**Tabell D.1:** Lista över komponenter, en kort beskrivning av de samt länk till respektive datablad.

Komponent	Beskrivning	Länk till datablad
Raspberry Pi 3B	Enkorts dator	<a href="https://docs.rs-online.com/44ed/0900766b8168e195.pdf">docs.rs-online.com/44ed/0900766b8168e195.pdf</a>
Arduino Nano	Mikrokontroller	<a href="http://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf">www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf</a>
Lah-50-P	Strömmätare	<a href="http://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lah_50-p.pdf">www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lah_50-p.pdf</a>
BC33725TAR	NPN-transistor	<a href="http://www.mouser.se/datasheet/2/308/BC338_D-2310028.pdf">www.mouser.se/datasheet/2/308/BC338_D-2310028.pdf</a>
DRP-480-24	Nätaggregat	<a href="http://www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/Drp-480/DRP-480-spec.pdf">www.meanwell-web.com/content/files/pdfs/productPdfs/MW/Drp-480/DRP-480-spec.pdf</a>
Parallax Servo	Servomotor	<a href="http://www.parallax.com/package/servo-dimensions">www.parallax.com/package/servo-dimensions</a>
MECCANO G15 DEV-06	Servomotor	-
AD1212HB-A71GL-LF	Chassifläkt	<a href="http://eu.mouser.com/datasheet/2/6/ADDA_08172020_AD1212HB_A71GL_C-1890778.pdf">eu.mouser.com/datasheet/2/6/ADDA_08172020_AD1212HB_A71GL_C-1890778.pdf</a>
FFB0412VHN	Chassifläkt	<a href="http://www.mouser.se/datasheet/2/632/FFB40x40x28mm-515835.pdf">www.mouser.se/datasheet/2/632/FFB40x40x28mm-515835.pdf</a>
SPDT Toggle Switch	Vippströmbrytare	<a href="https://docs.rs-online.com/4727/0900766b8158554d.pdf">docs.rs-online.com/4727/0900766b8158554d.pdf</a>
Red Button Tactile Switch	Taktil knapp	<a href="https://docs.rs-online.com/08d5/0900766b813d10e3.pdf">docs.rs-online.com/08d5/0900766b813d10e3.pdf</a>
IRFP3710PBF	MOSFET	<a href="http://www.mouser.se/datasheet/2/196/Infineon_IRFP3710_DataSheet_v01_01_EN-1228252.pdf">www.mouser.se/datasheet/2/196/Infineon_IRFP3710_DataSheet_v01_01_EN-1228252.pdf</a>
IRS2113PBF	MOSFET drivkrets	<a href="http://www.mouser.se/datasheet/2/196/Infineon_IRS2110_DataSheet_v01_00_EN-1228590.pdf">www.mouser.se/datasheet/2/196/Infineon_IRS2110_DataSheet_v01_00_EN-1228590.pdf</a>
ZPY120	Zenerdiod	<a href="http://www.elfa.se/Web/Downloads/_p/df/Diotec-ZPY1_eng_ger_tds.pdf">www.elfa.se/Web/Downloads/_p/df/Diotec-ZPY1_eng_ger_tds.pdf</a>
UF4007	Diod	<a href="https://docs.rs-online.com/b091/0900766b813ece53.pdf">docs.rs-online.com/b091/0900766b813ece53.pdf</a>
KEMET PHE845	Kondensator	<a href="https://docs.rs-online.com/3d26/0900766b8171cb78.pdf">docs.rs-online.com/3d26/0900766b8171cb78.pdf</a>

## D. Komponentlista

---

**Tabell D.1:** Lista över komponenter, en kort beskrivning av de samt länk till respektive datablad.

<b>Komponent</b>	<b>Beskrivning</b>	<b>Länk till datablad</b>
KEMET R60	Kondensator	<a href="https://docs.rs-online.com/25aa/0900766b8171c89d.pdf">docs.rs-online.com/25aa/0900766b8171c89d.pdf</a>
YW1B-V4E01R	Nödstoppsbrytare	<a href="https://www.elfa.se/Web/Downloads/_t/ds/YW_eng_tds.pdf">https://www.elfa.se/Web/Downloads/_t/ds/YW_eng_tds.pdf</a>
YW1L-M2E10QM3G	Startknapp	<a href="https://docs.rs-online.com/f173/0900766b8166e4e7.pdf">https://docs.rs-online.com/f173/0900766b8166e4e7.pdf</a>
LSED-1GN	Grön 12V LED	<a href="https://docs.rs-online.com/5e05/A700000007395273.pdf">https://docs.rs-online.com/5e05/A700000007395273.pdf</a>
223-3689	DC - DC converter	<a href="https://docs.rs-online.com/4e65/A700000008242984.pdf">https://docs.rs-online.com/4e65/A700000008242984.pdf</a>
B3F-4050	Taktil knapp	<a href="https://www.mouser.se/datasheet/2/307/en-b3f-13826.pdf">https://www.mouser.se/datasheet/2/307/en-b3f-13826.pdf</a>
LM2596	DC-DC Buck converter	<a href="https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm2596-d.pdf">https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm2596-d.pdf</a>
L-1503ID	Lysdiod	<a href="https://www.farnell.com/datasheets/2046486.pdf">https://www.farnell.com/datasheets/2046486.pdf</a>



Elektroteknik  
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
Gothenburg, Sweden  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**