

Vakuumering, påfylling og forsegling av et varmerør med alkaliemettall arbeidsmedium

Anders Sandved

Master i produktutvikling og produksjon
Oppgaven levert: Juni 2011
Hovedveileder: Erling Næss, EPT
Biveileder(e): Geir Hansen, EPT

EPT-M-2011-

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Anders Sandved

Våren 2011

Vakuumering, påfylling og forsegling av et varmerør med alkalimetall arbeidsmedium

Evacuation, filling and sealing of a heat pipe with alkali metal as working fluid

Bakgrunn

Bruk av varmerør (engelsk: "heat pipes") har vist seg å være en meget effektiv metode for varmetransport, og finner stadig nye anvendelsesområder. Institutt for Energi- og Prosesssteknikk er involvert i forskning og utvikling av varmerør for høytemperatur prosesskjøling og varmegjenvinning. Varmerøret benytter kalium som arbeidsmedium. Kalium reagerer både med tørr luft og fuktighet, noe som stiller strenge krav til systemene for påfylling og forsegling av varmerøret. I den forbindelse er to spesialrigger under oppbygging ved instituttet, hvorav den ene riggen er et forprosjekt for den andre riggen. Forprosjektet går ut på å utvikle en forseglingsmetode for varmerøret basert på induksjons sveising. Når resultatet fra dette forprosjektet er klart vil metoden inngå i den andre riggen, som er hovedriggen for vakuumering, påfylling, og forsegling av varmerøret.

Mål

Målet for oppgaven er å etablere et en fungerende forseglingsmetode for varmerør ved hjelp av induksjons sveising. Metoden ønskes deretter implementert i en rigg for påfylling, og forsegling av varmerør med alkali metall arbeidsmedium. Rigger skal så testes før endelig anvendelse på det produserte varmerøret.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Det skal gjennomføres et litteraturstudium innen induksjonsoppvarming og induksjons sveising. Prinsippene for induksjonsoppvarming og induksjons sveising gjennomgås og presenteres. Det legges vekt på å klarlegge hvilke parametre som er viktigst og hvordan de kan reguleres/optimaliseres for å nå ønsket resultat, som er en gasstett forsegling av et varmerør. Oppgaven omfatter både induksjonsutstyret og arbeidsstykkets utforming.
2. For uttesting av aktuelle framgangsmåter skal det gjennomføres eksperimenter med en testrigg for induksjons sveising. Det eksperimentelle oppsettet beskrives, eksperimentelle prosedyrer etableres og beskrives, og oppnådde resultater presenteres og diskuteres.
3. Det skal gjennomføres numeriske beregninger av temperaturfelt og varmegenerering i sveisesonen ved bruk av FEM-verktøyet Comsol Multiphysics. Modeller, forutsetninger og grensebetingelser skal presenteres og resultatene skal presenteres og vurderes.
4. Det skal utarbeides en teknisk løsning for overføring av resultatene fra oppgavens punkt 1, 2 og 3 til hovedriggen for påfylling og forsegling av varmerøret. Forhold knyttet til

gjensidig mellom induksjonssveising og hoveddriggens komponenter skal vurderes spesielt.

5. Det skal utarbeides forslag til videre arbeid.

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sendte instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

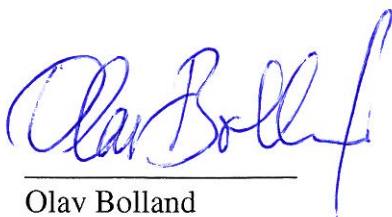
Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesssteknikk.

I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

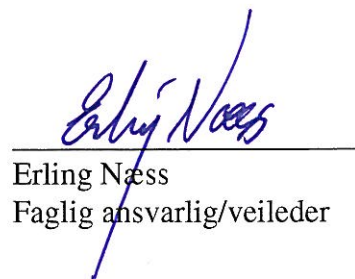
Ett -1 komplett eksemplar av originalbesvarelsen av oppgaven skal innleveres til samme adressat som den ble utlevert fra. Det skal medfølge et konsentrert sammendrag på maksimalt én maskinskrevet side med dobbel linjeavstand med forfatternavn og oppgavetittel for evt. referering i tidsskrifter).

Til Instituttet innleveres to - 2 komplette kopier av besvarelsen. Ytterligere kopier til eventuelle medveiledere/oppgavegivere skal avtales med, og eventuelt leveres direkte til de respektive. Til instituttet innleveres også en komplett kopi (inkl. konsentrerte sammendrag) på CD-ROM i Word-format eller tilsvarende.

Institutt for energi og prosesssteknikk, 7. februar 2011



Olav Bolland
Instituttleder

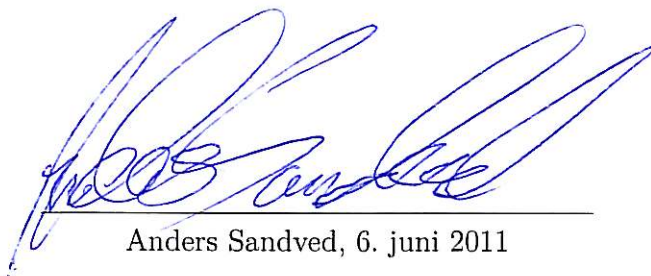


Erling Næss
Faglig ansvarlig/veileder

Kontaktperson/medveileder:
Stipendiat Geir Hansen, NTNU

Forord

Denne masteroppgaven presenterer mine resultater fra vårsemesteret 2011 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for energi- og prosessteknikk. Temaet omhandler forsegling av et varmerør under vakuum ved hjelp av induksjonsveising. Jeg ønsker å takke mine veiledere, professor Erling Næss og Geir Hansen, som har hjulpet til med gjennomføringen av denne oppgaven. Jeg vil også takke Reidar Sletteveit ved EFD Induction for hjelp med forståelsen av induksjonsoppsettet.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Anders Sandved', is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive.

Anders Sandved, 6. juni 2011

Sammendrag

Hovedformålet med oppgaven er å etablere en fungerende metode for forsegling av varmerør ved hjelp av induksjonsveising. Varmerøret skal produseres i nikkel og ha kalium som arbeidsmedium, og det stilles derfor strenge krav til påfylling, vakuumering og lukking av påfyllingsrøret. Siden nikkel reagerer med luft og danner nikkeloksid, og kalium reagerer med både tørr og fuktig luft, ble det nødvendig å utføre påfyllingen og forseglingen under vakuum. I sammenheng med denne problemstillingen ble det utført et litteraturstudium innen induksjonsoppvarming og induksjonsveising. Her ble det fokusert på klargjøring av de ulike parameterenes betydning, samt hvilke verdier som gav best mulig resultat.

Det ble laget en forsøksrigg for å undersøke mulige fremgangsmåter for induksjonsveising under vakuum. Hovedfokuset var på å fremstille en gasstett sveis hvor resultatet kan overføres til hovedriggen for påfylling og forsegling av varmerøret. Hovedriggen var ikke klar ved oppgavens slutt. Eksperimentene utført ved forsøksriggen resulterte i en gasstett sveis, et resultat som lot seg reproducere.

I tillegg til forsøkene ble det gjennomført numeriske beregninger ved hjelp av FEM-vektøyet Comsol Multiphysics. Simuleringene hadde som formål å undersøke temperaturutviklingen rundt sveisesonen, samt å forstå betydningen av å variere de forskjellige parameterne som kunne påvirke sveiseprosessen.

Som resultat av eksperimentene og de numeriske beregningene ble det oppdaget utfordringer relatert til implementeringen av induksjonsprosessen i påfyllingsriggen. Det viste seg at det opprinnelige designet til påfyllingsriggen kunne gi en uønsket lav frekvens. Derfor ble det utført simuleringer i Comsol for å undersøke hvilket design som passet best til formålene. Løsningen ble å inkludere en RF-gjennomføring, og redusere trykkbeholderens materiale i nærheten av lederne til spolen, dette skal føre til en reduksjon av den induserte motstanden. Med utgangspunkt i disse løsningene samt resultatene fra sveiseprosessen ble det laget tegninger for oppsettet til påfyllingsriggen.

Med bakgrunn i litteraturstudiet, forsøksresultatene og de numeriske beregningene ble det satt opp en forsøksplan. For å kunne oppnå en gasstett sveis er det nødvendig å teste den nye riggen før påfyllingsprosessen startes. Det er i oppgaven laget en anbefaling av startverdier for de ulike parameterne, samt en forklaring av hvordan en bør justere disse for å oppnå ønsket resultat. Det er altså ikke sikkert at de angitte verdiene vil resultere i en gasstett sveis, hensikten er å redusere antall nødvendige forsøk før påfyllingen kan iverksettes.

Opgaven avsluttes med forslag til videre arbeid, med den hensikt å optimalisere resultatene fra denne oppgaven.

Summary

The main purpose of this thesis is to establish a method for the sealing of a heat pipe by induction welding. The heat pipe will be produced in nickel and use potassium as a working medium. Nickel reacts with air and creates nickel oxides, and potassium reacts with both dry and moist air, therefore there is a need for great precautions during the processes of filling and sealing the heat pipe. The result of this is that the processes need to be executed in a vacuum. In relation to this, a study was performed within the topics of induction heating and induction welding. The focus of this study was aimed at clarifying the importance of the various parameters, and on the values that would provide the best results.

A test rig was made to investigate the possibilities of sealing the filling tube in vacuum by the use of induction welding. The main goal was to successfully generate a gas-tight seal, where the results could be transferred to the main rig, for the filling of the heat pipe. This rig was not completed by the end of this thesis. The experiments resulted in a gas-tight seal, a result which could be reproduced and transferred to the main rig.

In addition to the experiments a number of numerical simulations were performed, using the FEM-program Comsol Multiphysics. The simulations aimed to examine the temperature trends around the welding zone, and to understand the importance of varying the different parameters that could affect the welding process.

As a result of the experiments and the numerical simulations, a problem was discovered related to the implementation of the induction equipment to the main rig. It turned out that the original design of the rig could result in an unwanted low frequency provided by the output generator. As a result it was necessary to perform a number of simulations to examine the design, and to provide a solution that would counter this effect. The solution was to include an RF-feedthrough, and to reduce the amount of steel (from the rig) that was in close vicinity of the induction leaders. This solution will result in a reduction of the induced resistance on the leaders, ensuring a higher frequency. Based on these, and the experimental results, a new layout for the main rig was made.

On the basis of the study, experiments and numerical simulations a model for how to carry out the testing of the filling rig was made. It will be necessary to perform a number of tests in advance of the filling process. This is due to the need to regulate the different parameters in order to achieve a result similar to the ones achieved during the experiments from the first rig.

The thesis ends with suggestions for future work, in order to further optimize the results presented here.

Innhold

Figurliste	V
Tabelliste	V
Nomenklatur	V
1. Innledning	1
2. Elektrisitet og Magnetisme	2
2.1. Elektrisitet	2
2.1.1. Ledere og isolatorer	2
2.1.2. Elektrisk felt	2
2.1.3. Elektrisk Fluks	6
2.1.4. Ohms lov	6
2.2. Magnetisme	7
2.2.1. Magnetisme i materialer	8
2.2.2. Curie's lov	8
2.2.3. Hysterese	10
2.2.4. Metallets varmekapasitet	10
3. Induksjons-oppvarming og -sveising	13
3.1. Induksjonsoppvarming	13
3.1.1. Faradays lov og skin-effekten	13
3.1.2. Effekten av å ha to ledere i nærheten av hverandre	14
3.2. Design av spolen	15
3.2.1. Lederne til og fra spolen	15
3.2.2. Spolens tverrsnitt	16
3.2.3. Spolen	16
3.3. Rensing	17
3.4. Implementering av en loddering	18
3.5. Arbeidsstykket	18
3.6. Generator, Minac 50	19
3.6.1. Effekt og Frekvens	19
4. Kjøling av oppvarmet arbeidsstykke	20
4.1. Teoretiske beregninger	21
4.2. Numerisk analyse	22
4.2.1. Modell I	22
4.2.2. Modell II	23
4.2.3. Modell III	25
4.2.4. Modell IV	25
4.3. Usikkerheter	25
4.4. Konklusjon	26

5. Forsøk med Rigg I	29
5.1. Bakgrunn	29
5.2. Forsøksoppsettet	29
5.3. Parametre	31
5.4. Utførelse av forsøket	32
5.4.1. Eksperiment I	34
5.4.2. Eksperiment II	34
5.4.3. Eksperiment III	35
5.4.4. Eksperiment IV	36
5.4.5. Eksperiment V	36
5.4.6. Eksperiment VI	37
5.4.7. Eksperiment VII	37
5.4.8. Eksperiment VIII	38
5.4.9. Heliumstesting	41
5.4.10. Måling av fjærkraft	41
5.5. Usikkerheter	41
5.6. Resultat	42
5.6.1. Termoelement	43
5.6.2. Loddering	43
5.6.3. Fjærkraft	43
5.6.4. Geometri	44
5.6.5. Trykkendring i beholder	44
5.6.6. Sotdannelse på spolen	45
5.7. Konklusjon	45
6. Numeriske Beregninger	46
6.1. Oppsettet	46
6.2. Valg av riktig strømverdi	47
6.2.1. Induktans og kapasitans	49
6.2.2. Momentan-, Gjennomsnitts-, Reaktiv- og Kompleks-effekt	50
6.2.3. Valg av input-strøm i simuleringen	52
6.3. Endringen av parameterne	53
6.3.1. Plassering av spolen	54
6.3.2. Frekvens	55
6.3.3. Strøm	56
6.3.4. Spolens geometri	56
6.3.5. Endring av lodderingens geometri	59
6.3.6. Endring av arbeidsstykkets toppgeometri	60
6.3.7. Temperaturen ved innspenningspunktet	60
6.4. Mulige feilkilder i modellen	61
6.4.1. Termisk motstand ved kontaktflatene	63
7. Induksjonsspole i høyvakuumkanter	66
7.1. Diameteren på røret	66

7.2. Avstanden mellom lederne	66
7.3. Endring av frekvens	67
8. Forsøksrigg 2	69
8.1. Generator innstillinger	69
8.2. Utforming av spolen	70
8.3. Arbeidsstykket	73
8.4. Annet	74
8.5. Oppsummering	75
8.6. Forsøksplan	75
9. Forslag til videre arbeid	78
9.1. Videre arbeid med forsøksrigg 1	78
9.2. Utvikle en ny rigg	80
9.3. Videre utvikling av Comsol modell	81
A. Geometrier brukt i oppgaven	84
B. Trykkonverteringsgraf	89
C. Maple regneark for termisk resisivitet ved kontaktflatene	92
D. Arbeidsstykker etter sveising	95
E. Tekniske spesifikasjoner, Minac 50	97
F. Maskintegning Forsøksrigg 2	100

Figurer

2.1. Elektrisk Dipol	4
2.2. Elektriske og magnetiske feltlinjer	5
2.3. Hysteresekurve	11
2.4. Magnetfeltets påvirkning på varmekapasiteten	12
2.5. Effekten av en imperfekt krystalin oppbygning	12
3.1. To ledere i nærheten av hverandre	15
3.2. Indusert tap	16
3.3. Indusert oppvarmingsmodell av usentrert arbeidsstykke	17
3.4. Forsøksriggenes prinsippskisse	20
4.1. Comsol geometri for Modell I	23
4.2. Comsol geometri for Modell II	24
4.3. Nedkjølingstid arbeidsstykket	27
4.4. Nedkjølingsmodell IV	28
4.5. Modell III	28

5.1.	Arbeidsstykke geometri	31
5.2.	Forsøksoppsett til eksperiment I	35
5.3.	Temperatur/Tid Eksperiment I og III	39
5.4.	Temperatur/Tid Eksperiment IV og V	39
5.5.	Temperatur/Tid Eksperiment VI og VII	40
5.6.	Temperatur/Tid Eksperiment VIII	40
5.7.	Fjærkraft ved kompresjon.	42
6.1.	Geometrisk oppsett	48
6.2.	RLC krets	48
6.3.	Spolegeometri	49
6.4.	Utvikling av momentaneffekt, spenning og strøm.	51
6.5.	Effekttrekanten	52
6.6.	Strøm og spenningen nødvendig til simuleringen.	52
6.7.	Variert avstand på spolen, r-akse.	54
6.8.	Variert posisjon på spolen, z-akse.	55
6.9.	Tid temperatur graf for variert frekvens	56
6.10.	Makstemperaturen som en funksjon av varierende strøm	57
6.11.	Forskjellig spolegeometri	58
6.12.	Endring av lodderingens geometri	59
6.13.	Temperaturutvikling langs arbeidsstykket	61
6.14.	Sveisesoner 1	62
6.15.	Sveisesoner 2	63
6.16.	Comsolmodell for kontroll av thin-layer funksjon	65
6.17.	Sveisesoner 3	65
7.1.	Rørtemperatur ved varierende diameter	67
7.2.	Makstemperaturene til røret og lederne	68
8.1.	Plassering av spole og arbeidsstykket i trykkbeholderen 1	72
8.2.	Plassering av spole og arbeidsstykket i trykkbeholderen 2	72
8.3.	Plassering av spole og arbeidsstykket i trykkbeholderen 3	74
9.1.	To eksempler på alternative arbeidsstykkegeometrier	80
A.1.	Simuleringsgeometri del 6	85
A.2.	Nærbilde av arbeidsstykkegeometrien	86
A.3.	Simuleringsgeometri del 7	87
A.4.	Tverrsnitts geometrier til spolen	88
D.1.	Arbeidsstykket fra eksperiment 4.	96
D.2.	Arbeidsstykket fra eksperiment 7.	96
D.3.	Arbeidsstykket fra eksperiment 8.	96

Tabeller

5.1.	Testparametre for forsøksrigg I. Eksperiment I til IV	33
5.2.	Testparametere for forsøksrigg I. Eksperiment V til VIII	34
5.3.	Måling av fjærkraft	41

6.1. Initialverdier	47
6.2. Verdier brukt i beregning av kontaktmotstanden	63
8.1. Anbefalte parametere	76
8.2. Forsøksplan	77

Nomenklatur

Forkortelser

T_C	Curie Temperaturen	[K]
TC	Termoelement (eng. thermocouple)	

Greske Bokstaver

ϵ	Emissivitet	[-]
\mathcal{E}	Elektromotorisk spenning	[V]
μ	Magnetisk moment	[eV/T]
μ	Permeabiliteten	[H/m]
μ_0	Vakuumpermeabiliteten	[H/m]
ω	Vinkelfrekvens	[rad/s]
Φ	Magnetisk fluks	[Wb]
ϕ	Elektrisk fluks	[Nm ² /C]
ϕ	Faseforskyvingsvinkel	[-]
σ	Resisivitet	[Ωm]

Latinske Bokstaver

A	Areal	[m ²]
A_{spole}	Tverrsnittsarealet på spolen	[m ²]
B	Magnetisk felt	[T]
C	Kapasitans	[F]
c	Lysets hastighet	[m/s]
$\cos(\phi)$	Effekt faktoren, Power factor	[-]
d	Skin-dybden	[m]
E	Elektrisk felt	[N/C]
F	Kraft	[N]
f	Frekvens	[Hz]
I	Strøm	[A]
I_0	Observert strøm på Minac 50	[A]

j	Komplekse tall	[-]
K	Nagaoka koeffisienten	[-]
k	Boltzmanns konstanten	[eV/K]
k	Columb konstanten	[Nm/C ²]
L	Induktans (Elektrisk kretselement)	[H]
l_{spole}	Lengden på spolen	[m]
L_s	Avstanden fra arbeidsstykkets topp til coil senter	[mm]
M	Magnetisering	[eV/Tm ³]
N	Antall vindinger på spolen	[-]
P	Effekt	[W]
P	Gjennomsnitts effekt	[W]
P	Trykk	[Torr]
P_{eff}	Effekt satt ved eksperiment	[kW]
Q	Reaktiv effekt	[var]
Q	Varme	[W]
q	Elektrisk ladning	[C]
R	Resistans	[Ω]
S	Kompleks effekt	[VA]
t	Tid	[s]
T_C	Curie Temperaturen	[K]
T_{maks}	Maks temperatur satt ved eksperiment	[C]
U	Spenning	[V]
v	Hastighet	[m/s]
Z	Impedans	[Ω]
c_p	Varmekapasitet	[J/mol K]

1. Innledning

Ved institutt for Energi- og Prosessteknikk pågår det forskning og utvikling av et varmerør (heat pipes) for høytemperatur prosesskjøling og varmegjenvinning. Varmerøret bruker kalium som arbeidsmedium, og siden kalium reagerer med både tørr og fuktig luft stilles det strenge krav til påfylling og forsegling. Ulikt fra andre varmerør, vil dette være produsert i nikkell. Nikkell har god varmeledningsevne, gode mekaniske egenskaper ved høy temperatur og er kompatibelt med kalium som arbeidsmedium.

Målet for denne oppgaven er å etablere en fungerende forseglingsmetode ved hjelp av induksjonssveising i vakuum. Ved oppstart av oppgaven var det allerede påbegynt bygging av en forsøksrigg. Denne riggen hadde som formål å kunne teste induksjonssveiseprosessen under vakuum, for deretter å kunne overføre resultatene til selve påfyllingsriggen. I tillegg til forsøkene ble det utført numeriske beregninger ved hjelp av FEM-verktøyet Comsol Multiphysics.

Opgaven begynner med et litteraturstudium (Del 2 til 3) som omhandler elektriske og magnetiske feltlinjer, samt en innføring i hovedprinsippene for induksjonsoppvarming og -sveising. Hovedfokuset vil være på klargjøring og forståelse av ulike parametere og deres betydninger for dette tilfellet. Denne teorien ble videre tilpasset til den numeriske simuleringen (Del 6) hvor det var nødvendig å beregne den aktuelle strømmen på spolen.

Som resultat av at forsøksriggen var klar tidlig i oppgaven, ble noe av den numeriske delen (Del 4) utført parallelt med forsøkene. Dette vil gjenspeile seg i at modellene for beregning av nedkjølingstiden for arbeidsstykkene vil bli forbedret ettersom resultatene fra eksperimentene (Del 5) fremkommer. Derfor vil det forekomme at det refereres til resultater lengre frem i oppgaven.

Del 7 og 8 fokuserer på design av neste forsøksrigg basert på resultatene oppnådd så langt. Det legges vekt på å optimalisere riggen og sveiseprosessen for å oppnå en gasstett sveis etter påfylling av varmerøret.

Opgaven avsluttes med forslag til videre arbeid.

2. Elektrisitet og Magnetisme

Elektrisitet og magnetisme er grunnleggende for forståelsen av induksjon og dens påvirkning på varmeoverføringen på et arbeidsstykke. Med bakgrunn som PUP-student har det vært lite fokus på disse temaene gjennom studiet. Derfor ble det essensielt å foreta et litteraturstudium som inkluderer elektrisitet og magnetisme, før temaene induksjonsoppvarming og induksjonssveising gjennomgås. Uten denne bakgrunnen vil det være vanskelig å forstå fysikken som er nødvendig for de numeriske beregningene gjort i del 6.

2.1. Elektrisitet

Elektrisitet er fysiske fenomener knyttet til positive og negative ladde partikler som er i ro eller bevegelse. Læren om elektroner i bevegelse, som er elektrisk strøm kalles elektrodynamikk. Et elektron har en ladning på $-e$, mens et proton har en ladning på $+e$. Ladningen til elektroner og protoner er på samme måte som spinn og masse en reell egenskap til partiklene. Derfor kan alle ladningene brytes ned til ett gitt antall landninger på størrelsen: e . SI enheten for ladning er Columb [C], som er definert ut i fra den elektriske strømmen I , som er gitt i ampere [A]. Columb er definert som ladningen som passerer gjennom en ledning i løpet av ett sekund med en strøm på en ampere. [1].

2.1.1. Ledere og isolatorer

Ulike materialer har ulike elektriske ledningsevner. Materialer hvor elektronene er frie til å bevege seg over hele materialet er definert som ledere. Materialer hvor elektronene er knyttet til lokale atomer, er dårlige ledere, og blir definert som isolatorer. Ett enkelt kobberatom består av 29 elektroner, hvor det er ett elektron i den ytterste banen rundt atomkjernen. Dette elektronet vil på grunn av en større avstand fra den positive kjernen og de nærmestliggende elektronenes frastøttingskraft være svakere bundet til atomet. I et kobberstykke vil derfor det ytterste elektronet bli påvirket av nærliggende atomer, og vil derfor være fritt til å bevege seg gjennom hele massen. Dette fører til at kobber er en veldig god elektrisk leder.

2.1.2. Elektrisk felt

Kreftene utøvd på en punktladning av en annen punktladning virker langs en rett linje mellom ladningene. Kreftene blir mindre ved større avstand og er proporsjonale med

produktet av ladningene. Like ladninger virker frastøtende, mens motsatte ladninger virker tiltrekkende. Størrelsen på den elektriske kraften mellom ladningene q_1 og q_2 med en avstand r er gitt ved Columbs lov, likning 2.1:

$$F = \frac{k|q_1q_2|}{r^2} \quad (2.1)$$

Her er k en eksperimentell verdi kalt Comlumbkonstanten, og er definert som $k = 8.99 \times 10^9 Nm/C^2$.

Konseptet om elektriske felt blir introdusert for å gi en forståelse om hvordan ladningen til en partikkel påvirker en annen partikkel avhengig av hvor i rommet den befinner seg i forhold til den andre ladde partikkelen. Ut fra dette kan vi si at det er det elektriske feltet \vec{E} og posisjonen til den andre partikelen som bestemmer kraften i mellom de to partikkelene. Endringer i feltet forplanter seg ut i rommet ved lysets hastighet c . For en partikkel med liten ladning (q_0) i nærheten av andre partikler med høyere ladning vil det elektriske feltet være gitt ved:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (2.2)$$

SI enhetene til det elektriske feltet er newton per coulomb [N/C]. Det elektriske feltet ved punkt P som oppstår på grunn av en eller flere elektriske ladninger q_i , kan beskrives som vist i likning 2.3

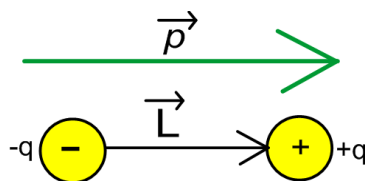
$$\vec{E}_P = \sum_i \vec{E}_{i,P} = \sum_i \frac{kq_i}{r_{i,P}^2} \hat{r}_{i,P} \quad (2.3)$$

Et system med to like store men motsatt rettet ladninger, separert med en liten avstand L , kalles en elektrisk dipol. Systemets styrke og moment beskrives av det elektriske dipolmomentet \vec{p} , som er en vektor som peker fra den negative ladningen til den positive og er gitt ved:

$$\vec{p} = q \vec{L} \quad (2.4)$$

Hvor \vec{L} er vektoren fra den negative ladningen til den positive, se figur 2.1.

For å illustrere elektriske felt blir det ofte tegnet linjer ut i fra ladningspunktet i en radiell retning. Ved ett gitt punkt utenfor ladningspunktet er det elektriske feltet \vec{E} tanget på feltlinjene. Nært et positivt ladet punkt peker feltlinjene radielt utover fra punktet, men for et negativt ladet punkt peker de radielt innover. Uten å gå for detaljert inn i konseptet om feltlinjer, vil det her bli summert med reglene for tegning av elektriske



Figur 2.1: En elektrisk dipol består av et par med motsatt men like store ladninger.

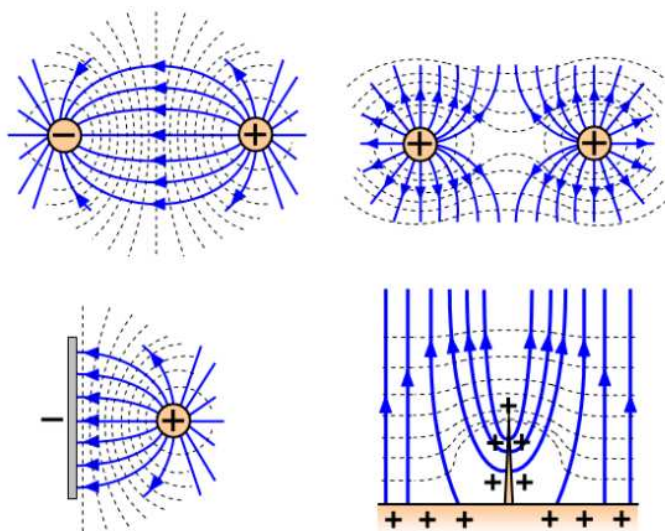
feltlinjer:

1. Elektriske feltlinjer begynner ved de positive ladningene og slutter ved de negative ladningene.
2. Linjene skal illustreres med like stor avstand mellom linjene som entrer eller kommer ut av en isolert punktladning.
3. Antallet linjer som entrer eller kommer ut av en punktladning er proporsjonal med størrelsen av ladningen.
4. Tettheten av linjene (antall linjer per areal normalt på linjene) ved ethvert punkt er proporsjonalt med styrken til feltet ved det gitte punktet.
5. I et punkt langt borte fra et system av punktladninger med en samlet ladningsverdi, vil feltlinjene ha en like stor avstand imellom seg som om de kom ut i fra ett enkelt punkt med en ladning tilsvarende den samlede ladnings verdien.
6. Feltlinjer kan ikke krysses. (Hvis dette var tilfellet ville det ha betydd at det elektriske feltet \vec{E} virket i to retninger).

Molekylet H_2O er en dipol. Det kommer av måten oksygenatomet og hydrogenatomene fordeler valenselektronene mellom seg, hvor oksygenet tiltrekker seg elektronene mer enn hydrogenatomene og dermed får en negativ ladning, mens hydrogenatomene får en mer positiv ladning. Hvis et vannmolekyl plasseres i et elektrisk felt, vil det bli påført krefter som følge av disse ladningene, som igjen vil føre til at molekylet retter seg opp i forhold til feltet. Det vil altså bli påført et dreiemoment $\vec{\tau}$ på molekylet som kan beskrives ved dipolmomentet \vec{p} og det elektriske feltet \vec{E} .

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (2.5)$$

Med utgangspunkt i likning 2.5 kombinert med vinkelen θ (vinkelen mellom \vec{L} og \vec{E}), vil det være mulig å beregne arbeidet gjort av det elektriske feltet på molekylet:



Figur 2.2: Elektriske (blå) og magnetiske (stiplede) feltlinjer. De magnetiske feltlinjene vil alltid gå normal på de elektriske feltlinjene, [2].

$$dW = -\tau d\theta = pE \sin\theta d\theta \quad (2.6)$$

Upolare molekyler vil i et elektrisk felt ikke bevege seg, slik som et dipolart molekyl. Men alle nøytrale molekyler består av samme mengde positive og negative ladninger, og vil derfor i et elektrisk felt bli polarisert ved at ladningene fordeler seg i molekylet i forhold til feltet. I stedet for punktlandinger kan vi forestille oss et volum V som har en kontinuerlig ladningstetthet Q . Ladning per volumenhet kan beskrives ved volumetrisk ladningstetthet ρ :

$$\rho = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (2.7)$$

Ladningen i et medium blir ofte fordelt over et tynt lag på overflaten, derfor vil det være gunstig å introdusere en overflate ladningstetthet σ som er ladning per areal:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta A} \quad (2.8)$$

På samme måte kan en kontinuerlig ladning langs en linje beskrives ved hjelp av en lineær ladningstetthet λ :

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta L} \quad (2.9)$$

Ved å kombinere likningene 2.7 - 2.9 med Columbs lov (likning 2.3) for systemer med hhv. lengde, areal eller volumetrisk ladning, vil det være mulig å beregne effekten av et elektrisk felt for ett gitt punkt P i rommet.

2.1.3. Elektrisk Fluks

Den matematiske størrelsen som samsvarer med antall feltlinjer som penetrerer en overflate blir kalt elektrisk fluks, ϕ . Hvis et elektrisk felt \vec{E} er vinkelrett på en overflate A , så er den elektriske fluksen gitt ved:

$$\phi = \vec{E} \cdot \vec{A} \quad (2.10)$$

Enhetene til den elektriske fluksen er Nm^2/C . For overflater som ikke er vinkelrett på det elektriske feltet må det tas hensyn til vinkelen θ . Fluksen kan dermed regnes ut ved hjelp av $\phi = EA \cos\theta$. Videre fører dette til at det utgående fluksen ϕ_{tot} gjennom en lukket flate kan gis ved $4\pi k$ ganger den totale ladningstettheten innenfor overflaten, Q , [1]. Denne relasjonen er kjent som Gauss' lov:

$$\phi_{tot} = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dA = 4\pi kQ \quad (2.11)$$

2.1.4. Ohms lov

Når en strøm blir sendt gjennom et materiale, så vil materialet til en viss grad motvirke strømmen. Den vil påføre en motstand (resistans) på strømmen. Denne motstanden vil føre til at deler av den elektriske energien i lederen vil bli omdannet til varme. Desto større motstanden er, desto mer varme blir generert. Dette fenomenet hvor motstanden genererer varme i lederen kalles Ohmsk oppvarming (eng: Joule heating). Varmen, Q , som blir generert kan bli funnet ved hjelp av Joules lov, likning 2.13. Ohms lov, likning 2.12, beskriver relasjonen mellom spenningen, U , strømmen, I og motstanden, R , i den aktuelle lederen.

$$I = U/R \quad (2.12)$$

$$Q = Pt = I^2 Rt \quad (2.13)$$

Her er P effekten og t tiden.

2.2. Magnetisme

Når en ladning q beveger seg med en hastighet \vec{v} i et magnetisk felt \vec{B} , så vil den magnetiske kraften \vec{F} på ladningen være:

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.14)$$

Kraften \vec{F} vil alltid være vinkelrett på både \vec{v} og \vec{B} . Det magnetiske feltet \vec{B} er definert ut i fra hastigheten og kraften utført på ladningen. SI enhetene til det magnetiske feltet er tesla (T). $1\text{T} = 1\text{ N}/(\text{Cm/s}) = 1\text{N}/(\text{Am})$. Siden tesla er en enhet for veldig sterke magneter, så blir denne ofte byttet ut med enheten gauss, G. Hvor $1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$.

For en ledning med lengde L og tverrsnittsareal A , i et magnetfelt som er påført en elektrisk strøm I , vil den magnetiske kraften være gitt ved:

$$\vec{F} = \left(q \vec{v} \times \vec{B} \right) nAL = I \vec{L} \times \vec{B} \quad (2.15)$$

På samme måte som de elektriske feltlinjene ble illustrert kan de magnetiske feltlinje illustreres, se figur 2.2. Det finnes allikevel to forskjeller mellom metodene:

1. De magnetiske feltlinjene ligger vinkelrett i forhold til den magnetiske kraften.
2. De elektriske feltlinjene begynner i den positive ladningen og ender i den negative. De magnetiske feltlinjene derimot har ingen begynnelse eller slutt.

Når en punktladning q beveger seg med en hastighet \vec{v} , så vil punktladningen danne et magnetisk felt gitt ved Biot Savart loven, likning 2.16:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi} \frac{\vec{v} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.16)$$

Her er μ_0 en proporsjonalitetskonstant som blir kalt permeabiliteten i fritt rom. Den eksakte verdien er gitt ved $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Tm/A} = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$. Ut i fra dette kan en endring i magnetfeltet som følge av et strøm element $I \vec{dl}$ defineres:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{\vec{dl} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.17)$$

2.2.1. Magnetisme i materialer

Det magnetiske momentet¹ som oppstår i faste stoffer skyldes elektronene i materialet. Momentet oppstår på grunn av elektronenes bane rundt atomkjernen og egenspinn. Elektronenes egenspinn er kvantifisert i Bohr magneton, $\mu_B = 9.27 \times 10^{-27}[\text{Am}^2]$, og blir ofte betegnet som $\vec{\mu}_S$. Elektronets orbitalmoment blir gitt ved $\vec{\mu}_l = m_l \mu_B$, hvor det magnetiske kvantetallet m_l , blir definert ut i fra utfyllingen av atomets elektronskall. Denne utfyllelsen av elektronskall i de forskjellige orbitalene har en stor betydning for styrken av momentet. En orbital kan kun inneholde ett enkelt elektron, eller to elektroner med motsatt rettet moment. Når en orbital er full, så vil det magnetiske momentet fra dens to elektroner kanselleres. Dette betyr at fulle orbitaler har et magnetisk moment lik null, og dermed vil kun elektronene i atomets ytterste bane ha en betydning for atomets totale magnetiske moment.

I et tilfelle hvor det finnes et magnetisk materiale i et eksternt magnetfelt B_{ekst} , vil magnetfeltet påvirke atomene slik at det dannes magnetiske dipoler. I motsetning til situasjonen hvor vi så på elektriske dipoler, så vil opprettingen av magnetiske dipoler føre til en økning av magnetfeltet. Denne økningen kommer av at når de magnetiske dipolene er orientert på samme måte som magnetfeltet vil dipolene skape et magnetfelt i seg selv som forsterker det opprinnelige magnetfeltet. Liking 2.18, viser definisjonen av magnetiseringen, \vec{M} , av et gitt materiale. Magnetiseringen er definert som magnetisk dipolmoment per volumenhet. [3, 1, 4]

$$\vec{M} = \frac{d\vec{\mu}}{dV} \quad (2.18)$$

2.2.2. Curie's lov

I det ekstreme tilfellet hvor et atom eller molekyl har alle sine dipoler orientert i samme retning, oppnås metningsmagnetiseringen M_s .

$$M_s = n\mu \quad (2.19)$$

Her er n antallet molekyler per volum, og μ er det magnetiske momentet til hvert molekyl. Over dette metningspunktet vil ikke metallet lenger bidra til å øke magnetfeltets styrke, det har nådd sitt metningspunkt. Magnetfeltet som dannes av orientering til

¹Legg merke til at både det magnetiske momentet og permeabiliteten til ett materiale blir gitt ved μ . Forskjellen er at det magnetiske momentet er en atomær egenskap, mens permeabiliteten er en materiell egenskap.

dipolene er gitt ved, $B = \mu M$. Fordelingen av magnetisk moment vil skje også uten tilstedeværelsen av et eksternt felt. Fordelingen vil da oppstå på grunn av bevegelser som følger av termisk energi, gitt ved kT , hvor k er Boltzmanns konstanten og T er temperaturen. Forholdet mellom det eksterne magnetfeltets styrkning, og den termiske svekking, av M er gitt ved Curies' lov, likning 2.20,[5, 1, 6].

$$M = \frac{1}{3} \frac{\mu B_{ekst}}{kT} M_s \quad (2.20)$$

- **Paramagnetisk:** Paramagnetiske metaller er metaller som har permanente magnetiske moment, og dermed vil kunne bli påvirket av et eksternt magnetfelt. Men graden av magnetisk oppretting i forhold til det eksterne feltet vil bli redusert betraktelig som følger av den lokale termiske energien (se likning 2.20). Materialets relative permeabilitet μ , som angir graden av magnetisk oppretting, vil være større enn 1. Men ikke særlig stor ($\approx 10^{-5}$ til $\approx 10^{-2}$),[7].
- **Ferromagnetisk:** Noen metaller vil ha en elektronfordeling hvor det finnes flere elektroner som er fordelt enkeltvis i orbitalene. Når dette er tilfellet, så vil alle disse ytre elektronene ha magnetiske moment av samme retning, som vil føre til kraftigere magnetiske dipoler. Derfor kan en plassering av et ferromagnetisk metall i selv et svakt magnetfelt føre til en forsterkning av det eksterne magnetfeltet. Noen metaller kan ha en stor grad av felles orientering av dipolene uten et eksternt magnetfelt, metallet er dermed en permanentmagnet.
- **Diamagnetisk:** Metaller som har fulle elektronskall eller kun fulle orbitaler blir kalt diamagnetiske metaller. I dette tilfellet er det kun elektronenes bevegelse rundt kjernen som gir opphav til et magnetisk moment. Dette momentet vil være svakere enn momentet som oppstår ved spinn, og det vil forsøke å motvirke effekten av et eksternt påført magnetfelt. Et diamagnetisk metall vil derfor kunne føre til en reduksjon i styrken til det eksterne feltet. Den diamagnetiske effekten oppstår i alle metaller, men på grunn av dens mye mindre effekt i forhold til spinn effekten, så vil dens påvirkning være neglisjerbar i forhold. Ikke metalliske materialer blir gitt den samme permeabiliteten som luft, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$.

Ved høye temperaturer vil den termiske energien i metallet føre til en økt kollisjonsrate mellom atomene. Denne økningen kan føre til at selv ikke de sterke dipolene i ferrometaller vil kunne motvirke dannelsen av uorden i dipolene. Temperaturen som er høy nok til å gjøre et ferromagnetisk metall til et paramagnetisk metall blir ofte definert som Curie temperaturen.

2.2.3. Hysterese

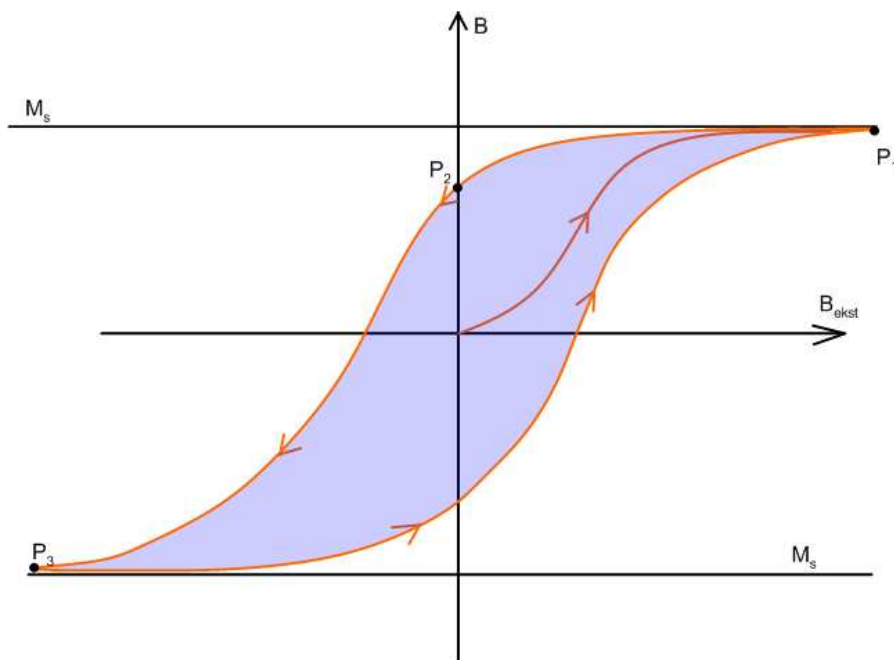
Figur 2.3 illustrerer hva som skjer når en utsetter et ferromagnetisk metall for et magnetfelt med styrke B_{ekst} . X-aksen illustrerer styrken på det eksterne magnetfeltet, y-aksen illustrerer styrken på det totale magnetfeltet, altså det eksterne pluss magnetfeltet som dannes av orienteringen av metallens dipoler. Ettersom styrken på det eksterne feltet øker, så vil flere dipoler i metallet rette seg etter magnetfeltets retning, som vil føre til en større økning i det totale magnetfeltets B styrke, hvor $B = B_{ekst} + \mu M$. Dette vil være tilfelle hvor vi ser grafen går fra origo og mot punktet P_1 . En videre økning av B_{ekst} vil ikke kunne påvirke metallens magnetfelt mer enn til metningspunktet M_s . Hvis B_{ekst} slås av etter at punkt P_1 er nådd, så ser vi at metallet ikke vil gå tilbake til origo ($B = 0$), men til punkt P_2 på grafen. Metallet vil da ha sitt eget magnetfelt uavhengig av B_{ekst} , dette magnetfeltet kalles et rest-magnetfelt (eng: remnant field). Denne effekten kalles *hysterese effekten*. Ved dette punktet er metallet en permanentmagnet.

Endres det eksterne magnetfeltet, slik at det får motsatt effekt av det det hadde ved P_1 (negativt på x-aksen), så ser vi at metallet vil gradvis miste sitt magnetfelt helt til det finnes en større andel dipoler med motsatt retning. Da vil metallet igjen ha dannet et nytt magnetfelt og er da en permanentmagnet. Magnetiseringen og demagnetiseringen av metallet er en irreversibel prosess, og energien som dissiperer til varme i løpet av denne prosessen er proporsjonal med størrelsen på det blå feltet i figur 2.3.

Hvis hysterese effekten er liten, dvs. at arealet innenfor kurven er liten, noe som indikerer lite energitap, kalles materialet et *magnetisk mykt metall*. Karbonstål er et eksempel på et magnetisk hardt metall.

2.2.4. Metallens varmekapasitet

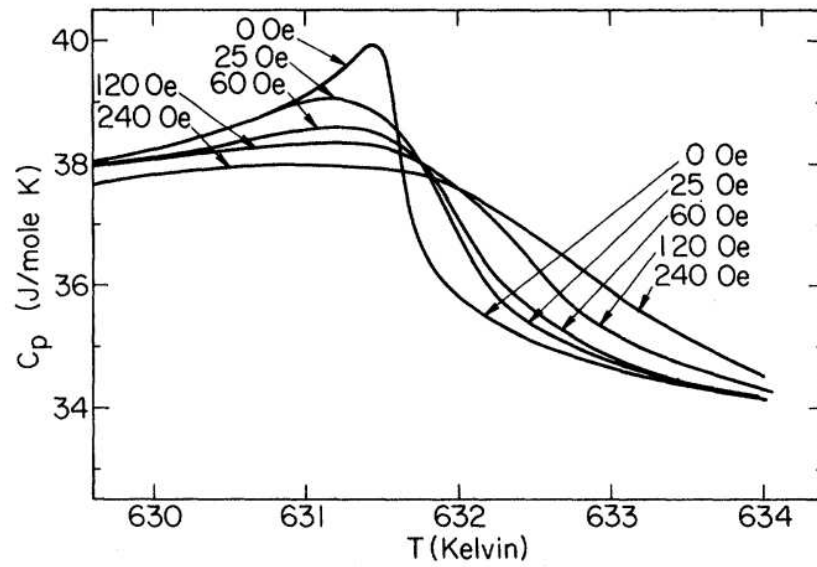
Kalkulering av varmekapasiteten er vanskelig ved induksjonsoppvarming. Dette kommer av at varmekapasiteten ikke bare varierer ved ulike temperaturer, men også ved ulike elektriske- og magnetiske felt. Ved høye temperaturer eller sterke magnetiske felt vil det være nødvendig å ta hensyn til molekylernes gjensidige påvirkning på hverandre. En høy temperatur vil føre til flere molekylære kollisjoner som igjen vil føre til en økt endring i hvert enkelt molekyl sitt elektronspinn. Mens et høyt magnetfelt vil føre til en økt påvirkning på både elektronspinn og elektronmomentet. (En kombinert effekt av disse kan ved ekstreme tilfeller føre til negative temperaturer, dette oppstår på grunn av definisjonen av temperatur, hvor en negativ temperatur faktisk er mye varmere enn den tilsvarende positive temperaturen. [6]). Beregning av varmekapasiteten til spesielt



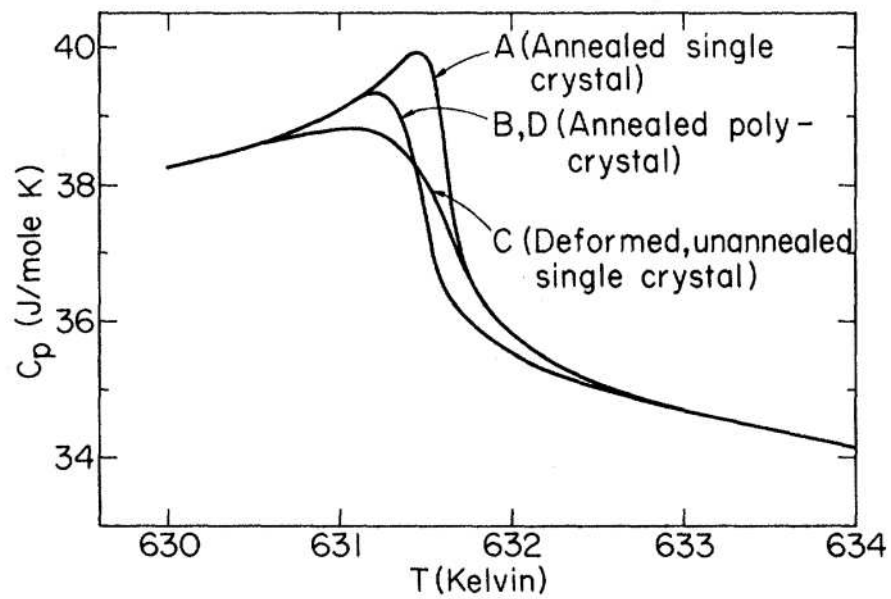
Figur 2.3: Hysteresekurve

nikkel er i seg selv en krevende oppgave. Nikkel har et ytre uoppfylt elektronskall (d-skallet) som krever en dyp forståelse av de relaterte kvantefysiske fenomenene. Det vil derfor i denne oppgaven ikke bli gjort noe forsøk på å forklare, men heller å opplyse om varmekapasiteten til nikkel rundt T_C . (Mangel på eksperimentelle resultater for temperaturer utenfor dette området førte til at det her kun blir sett på T_C -området).

Figur 2.4 viser hvordan varmekapasiteten påvirkes av et økende magnetfelt. Her blir magnetfeltet variert mellom 0-240 Oe (Oersteds), som tilsvarer 0-0.024T (Tesla). Figuren illustrerer hvordan et økende magnetfelt vil kunne glatte ut endringen i varmekapasiteten over Curie-temperaturen, T_C . Måten nikkelkrystallene i metallet er satt sammen vil kunne påvirke varmekapasiteten rundt T_C . Som vist i figur 2.5 ser vi at en deformert struktur (metallet har ikke en perfekt krystallin oppbygning) vil i likhet med et økende magnetfelt føre til at c_p -verdien glattes ut ved T_C . En kan dermed konkludere med at i T_C området, så vil et økt magnetfelt og en større deformering av metallet kunne glatte ut endringen av varmekapasiteten ved Curie punktet.



Figur 2.4: C_p for nikkell i T_C området under påvirkning av magnetfelt med variert styrke, [8]



Figur 2.5: Effekten av en imperfekt krystalin oppbygning av nikkell molekylet i T_C området, [8]

3. Induksjonsoppvarming og -sveising

Prosessen ved induksjonssveising er, frem til materialet når smeltepunktet, tilsvarende lik induksjonsoppvarmingsprosessen. Derfor vil det, på grunn av til dels manglende litteratur innenfor induksjonssveising, være naturlig å se på induksjonsoppvarming i tillegg. I denne delen har det derfor blitt naturlig å hente lærdom fra temaer som lodding, HF-heating (High Frequency) og Vacuum Induction Melting (VIM).

3.1. Induksjonsoppvarming

Induksjonsvarming er avhengig av to forskjellige mekanismer for dissipasjon av energi. Dette er energitap som følger av Ohmsk oppvarming og magnetisk hysteres. Under oppvarming av ikke-magnetiske metaller (for eksempel: aluminium, kobber, metaller over T_C), vil det kun oppstå varmegenerering ved Ohmsk oppvarming. Ved oppvarming av ferromagnetiske metaller vil også hystereseeffekten bidra til varmedannelse. Hystereseeffekten vil normal være mellom 0-40% av den totale effekten, avhengig av metallens maksimale magnetiske moment.

3.1.1. Faradays lov og skin-effekten

Den elektromotoriske spenningen \mathcal{E} kan beskrives som endringen i en magnetisk fluks $d\phi$ per tidsenhet. Dette er spenningen som blir induert i materialet via den magnetiske fluksen. Fra Faradays lov, likning 3.1, ser vi at spenningen oppstår på grunn av endringen i den magnetiske fluksen over tid. Det vil altså si at det kun vil være mulig å skape denne spenningen ved bruk av vekselstrøm gjennom lederen og ikke likestrøm. På grunn av at styrken på magnetfeltet er avhengig av strømstyrken, så opptrår maks og min verdiene for begge samtidig.

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

Siden magnetfeltet blir dannet av en vekselstrøm, så vil også magnetfeltet være vekselvirkende. Dette magnetfeltet vil igjen påvirke arbeidsstykket. Styrken på feltet er størst i området mellom spolen og overflaten på arbeidsstykket. En gitt fluks, Φ , vil treffe arbeidsstykke som vil føre til en induert strøm. Siden det finnes materialer som kan forsterke magnetfeltet (ferromagnetiske metaller) og materialer som kan motvirke magnetfeltet (diamagnetiske metaller) så vil det finnes forskjellige modeller på hvordan magnetfeltet påvirker arbeidsstykket. Hvis magnetfeltet blir styrket, så vil det bli induert en høyere

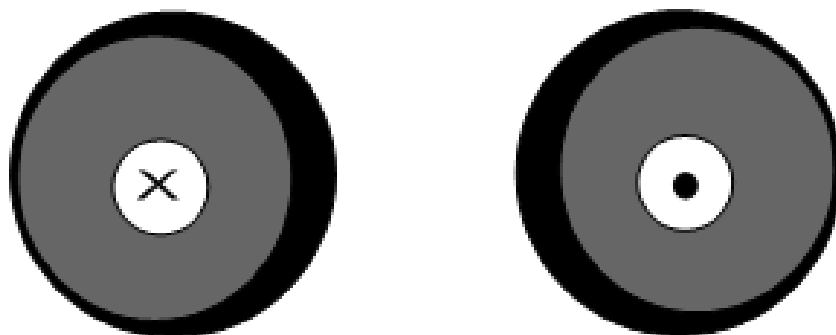
spenning, som fører til en sterkere strøm i arbeidsstykket. Dette vil resultere i et sterkere felt, høyere strøm og høyere spenning, noe som selvfølgelig ikke er mulig. Det betyr altså at det er materialet nærmest overflaten som får induert den største strømmen, mens den vil bli redusert desto lengre inn i arbeidsstykket en kommer. Som regel vil den induerte verdien bli mindre og mindre inn i arbeidsstykket, uavhengig av hvilket materialet det består av. Materiale vil med andre ord ha en begrenset effekt på hvor dypt magnetfeltet kan trenge inn i materialet. Begrensningen inn i arbeidsstykket som oppstår pga. materialets egenskaper (resistivitet og permeabilitet) samt frekvensen på det varierende magnetfeltet blir ofte referert til som *skin-effekten*. En matematisk modell for denne effekten er vanskelig å produsere, men det finnes en forenklet modell for sylindriske geometrier. Modellen av skin-dybden d er avhengig av frekvensen f , på vekselstrømmen gjennom spolen, den elektriske resistiviteten σ og den magnetiske permeabiliteten på materialet som arbeidsstykket er laget av μ .

$$d = \sqrt{2\sigma/2\pi\mu f} \quad (3.2)$$

Ved dybde d inn i materialet er styrken på det induerte feltet 37% av verdien ved overflaten. (37% kommer i fra den naturlige logaritmen e , hvor $1/e=0.37$. Effekten ved denne dybden er $1/e^2$, som tilsvarer 14% av overflateverdien). Vanskeligheten ved flere ferromagnetiske metaller er at disse egenskapene varierer med temperaturen. Normalt vil permeabiliteten reduseres etterhvert som temperaturen øker, helt til den konvergerer til en flat verdi. I ikke-magnetiske metaller vil denne referansedybden variere med en faktor på to eller tre, men for magnetisk stål kan den variere med så mye som en faktor på 20. [9, 10, 11].

3.1.2. Effekten av å ha to ledere i nærheten av hverandre

Når to ledere plasseres ved siden av hverandre på en slik måte at strømmen i den ene lederen går i motsatt retning i forhold til den andre lederen, så vil dette føre til en forsterkning av skin-effekten på sidene som peker mot hverandre (se figur 3.1). Dette skjer på grunn av det forsterkede magnetfeltet som oppstår mellom lederne. Magnetfeltene som blir dannet mellom lederne vil ha samme retning og vil derfor føre til en forsterkning av magnetfeltet mellom lederne, og en reduksjon av feltet utenfor lederne (se figur 2.2). For ledere som har en strøm som går i samme retning, så vil magnetfeltet bli sterkere på utsiden av lederne, og dermed vil skin-effekten bli størst på sidene som går bort fra den andre lederen. Ved å øke avstanden mellom lederne så vil den magnetiske effekten



Figur 3.1: Effekten av å ha to ledere med motsatt strømretning i nærheten av hverandre. Det sorte området representerer den magnetiske fluksens tetthet.

reduseres, og dermed redusere ujevnheten i fluksen.

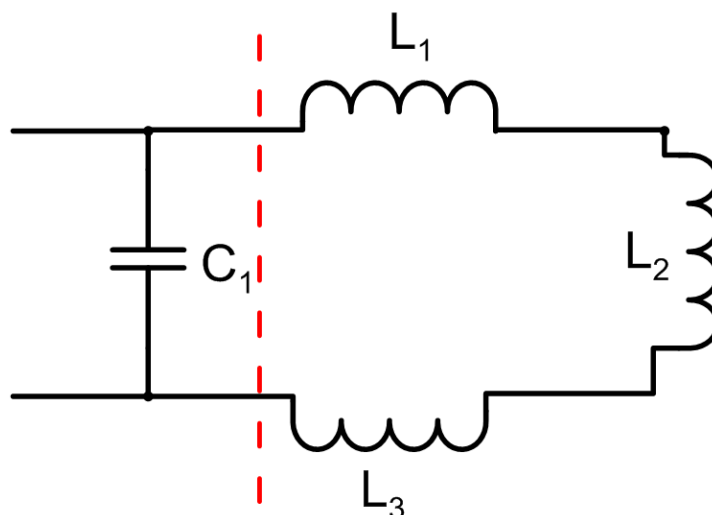
Magnetfeltet mellom lederne vil danne en kraft som vil, for tilfellet med motsatt rettet strøm, dytte lederne bort fra hverandre. I tilfellet for ledere med strøm i samme retning, vil lederne bli trykket mot hverandre. Denne effekten vil kunne rette opp arbeidsstykket i forhold til spolen. Dette oppstår på grunn av den induserte strømmens motsatte retning. Hvis arbeidsstykket ikke er montert med for stor kraft, vil det sentrere seg selv i spole ved induksjonsstart.

3.2. Design av spolen

Design av spolen er viktig av mange årsaker. Designet kan påvirke effekten, frekvensen, strømmen og dermed hele oppvarmingen av arbeidsstykket. Det finnes to ulike former for effekttap i spolen, der den ene er tap på grunn av den naturlige motstanden i materialet og den andre er tap på grunn av indusert motstand. Designet kan deles inn i tre deler basert på spolens geometri; selve spolen, lederne til og fra spolen og tverrsnittsgeometrien.

3.2.1. Lederne til og fra spolen

Lederne starter i generatoren og har som hensikt å lede nok effekt til spolen som går rundt arbeidsstykket, men disse vil også bidra til et effekttap. Figur 3.2 illustrerer hvordan en kan forestille seg effekttapene på grunn av indusert motstand. Her er L_1 og L_3 motstanden generert i lederne. Disse motstandene vil bli påvirket av hverandres nærhet (se figur 3.1) og av eventuell nærhet til andre metaller. Den induserte motstanden vil føre til en varmedannelse i både lederne og i metaller i nærheten. En økning av ledernes lengde vil føre til et økt spenningsfall, og det vil derfor ikke være mulig å beregne det



Figur 3.2: Krettsdiagram som illustrerer industert tap. L_1 og L_3 er motstanden som blir generert av lederne til og fra spolen, mens L_2 er motstanden i selve spolen. Spolen begynner til høyre for den stiplede røde linjen. Området til venstre for linjen er selve generatoren, med tilhørende kondensator C_1 .

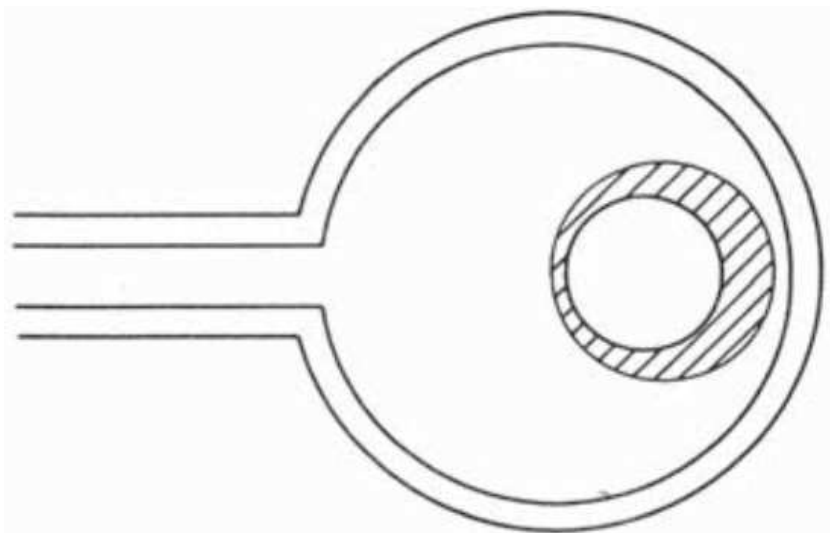
totale spenningstapet kun på grunnlag av spolens tap.

3.2.2. Spolens tverrsnitt

Ved store effekter vil den industerte motstanden generere mye varme i både lederne og til omgivelsene. Det vil derfor være viktig å ha god kjøling og materiell med lav resistivitet (kobber), slik at den økte temperaturen minimeres og ikke fører til deformering. Kjølingen blir som oftest utført ved hjelp av en vannstrøm inne i spolen, som er avhenging av geometrien for å oppnå ønsket grad av nedkjøling. Tverrsnittet er også avgjørende for hvor mye strøm som kan bli ledet gjennom spolen ved en gitt spenning. Og siden størsteparten av strømmen vil legge seg ved overflaten til spolen, så vil utformingen få en betydning for utvikling av magnetfeltet rundt spolen.

3.2.3. Spolen

Spolegeometri avgjør hvordan oppvarmingen av arbeidsstykket utvikler seg. Ved oppvarming av store flater er det ofte nødvendig å ha en spole med flere vindinger. Det vil sørge for en jevn oppvarming av arbeidsstykket. Antall vindinger på spolen kan derfor endres etter størrelsen på arbeidsstykket og graden av oppvarming. For tilfeller av sveising og lodding ved bruk av induksjon, er det derimot viktig å oppnå en konsentrert



Figur 3.3: Indusert oppvarmings modell av usentrert arbeidsstykke i coilen. Det skraverte området viser varmegenereringen som vil oppstå ved den gitte plasseringen i spolen. [12]

varme på det aktuelle sveiseområdet. Dette kan oppnås ved bruk av en spole med en enkel vinding sentrert på det aktuelle området. For sveising av to rør, ende til ende, så vil dette være tilfelle. I tillegg er det viktig at røret sentreres i midten av spolen, dette fordi mesteparten av de magnetiske felt linjene går gjennom senteret av spolen, og dermed oppnås maksimal oppvarming. Et feilsentrert arbeidsstykke vil bli påført en ujevn oppvarming som kan føre til en ufullstendig sveis, se figur 3.3. Avstanden mellom spolen og arbeidsstykke er også en essensiell parameter som det må tas hensyn til. For å oppnå best mulig oppvarming er det gunstig å få så mye som mulig av den tilgjengelige magnetiske fluksen til å treffe arbeidsstykket. Ved å redusere spolens diameter (bør være så nær som overhode mulig til arbeidsstykket) konsentreres den magnetiske fluksen på arbeidsstykket. Dette resulterer i en hurtigere og mer lokal oppvarming. [12, 13].

3.3. Rensing

Rensing er en viktig del av sveiseprosessen. Dette for å sørge for at det ikke kommer urenheter i sveisen som kan skape svakheter. Feil i sveisen kan ofte spores tilbake til dårlig rengjøring og utilstrekkelig tilsetningsmiddel. Overflater som skal sveises sammen bør rengjøres kjemisk for å unngå slike urenheter.

3.4. Implementering av en loddering

Boka *Elements of Induction Heating*, [9], omtaler bruken av en loddering ved sammenføyning av to metaller. Denne metoden blir ofte bruk når det er behov for å oppnå en gasstett sammenføyning av god kvalitet. Ringen består av en legering, som på grunn av sitt lave masse/overflate forhold vil oppleve en hurtigere oppvarming enn selve arbeidsstykket. Hensikten med dette er at ringen skal smelte og flyte ut over sammenføyingsområdet for å danne en jevn sveis. Legeringer som kan brukes i en slik sammenføyingsprosess er:

- Karbon og stål legeringer.
- Kobber og kobber legeringer.
- Nikkel og nikkel legeringer.

Legeringen som skal smelte sammen overflatene er avhengig av faktorer som smelte-temperatur, våthefteevne, oksiderings muligheter og stabilitet. Styrke og duktilitet i legeringen er også faktorer som må regnes med, i tillegg til metallurgiske reaksjoner mellom metall og legering. Siden oppgaven baserer seg på påfylling av kalium, falt valget på en nikkel-nikkel legering. Nikkellegeringene blir ofte brukt i vakuum sammenhenger (gasstette løsninger), og er derfor gunstig i denne sammenhengen. Hovedegenskapen ved bruk av nikkel er at den kan tåle temperaturer over 1100°C. Nikkellegeringer kan være dyrere enn sølvlegeringene. Ren nikkel er sjeldent bruk som fyllmateriale ved lodding. Det er pga. det høye smeltepunktet til nikkel. Kobber kan inkluderes i legeringen for å redusere smeltetemperaturen. Nikkellegeringer blir vanligvis brukt i forbindelse med 300- og 400-klassen av rustfritt stål, nikkel- og kobolt-legeringer, stållegeringer med karbon, og kobber. Disse legeringene blir som oftest brukt i form av pulver.

3.5. Arbeidsstykket

Geometri på arbeidsstykket kan variere fra bruksområdet til bruksområdet. Det vil her bli sett på en geometri basert på å oppnå en gasstett sveis mellom to rør (ett rør og en topp). Ved induksjonssveising er det nødvendig å ta hensyn til overflaten som eksponeres for magnetfeltet, og hvor det er sentrert, og masse/overflate-areal forholdet.

Hvis en av de to delene som skal sammenføyes enten har et større areal som blir eksponert, eller en mindre masse per eksponert areal, vil dette føre til forskjellig oppvarming av delene. Dette vil igjen føre til en ufullstendig sveis ved at en av delene

oppnår smeltepunktet før resterende deler. Løsningen vil dermed være å endre på delenes geometri slik at oppvarmingen blir så lik som mulig. Dette kan gjøres ved å endre på geometrien slik at delene utsettes for lik magnetisk fluks.

3.6. Generator, Minac 50

For å kunne utføre en induksjonssveiseprosess er det nødvendig å ha rett type generator. Denne må ha muligheten til å levere ønsket effekt, frekvens og kjøling. Disse parameterne blir avgjort basert på induksjonsoppsettet. Helt nøyaktige verdier er det umulig å kunne forutsi, dette på grunn av at selv små endringer på systemet kan påvirke kravene til generatoren. Eksempler på slike endringer vil bli diskutert mer nøyaktig senere, men eksempler på er: lengden på lederne, spolens diameter og vannets strømningshastighet. Generatoren som blir brukt i denne sammenhengen er en Minac 50, se appendiks E. Denne kan levere en effekt mellom 5 og 50kW, en frekvens mellom 10 og 25kHz, og en vannstrømning på 20L/min.

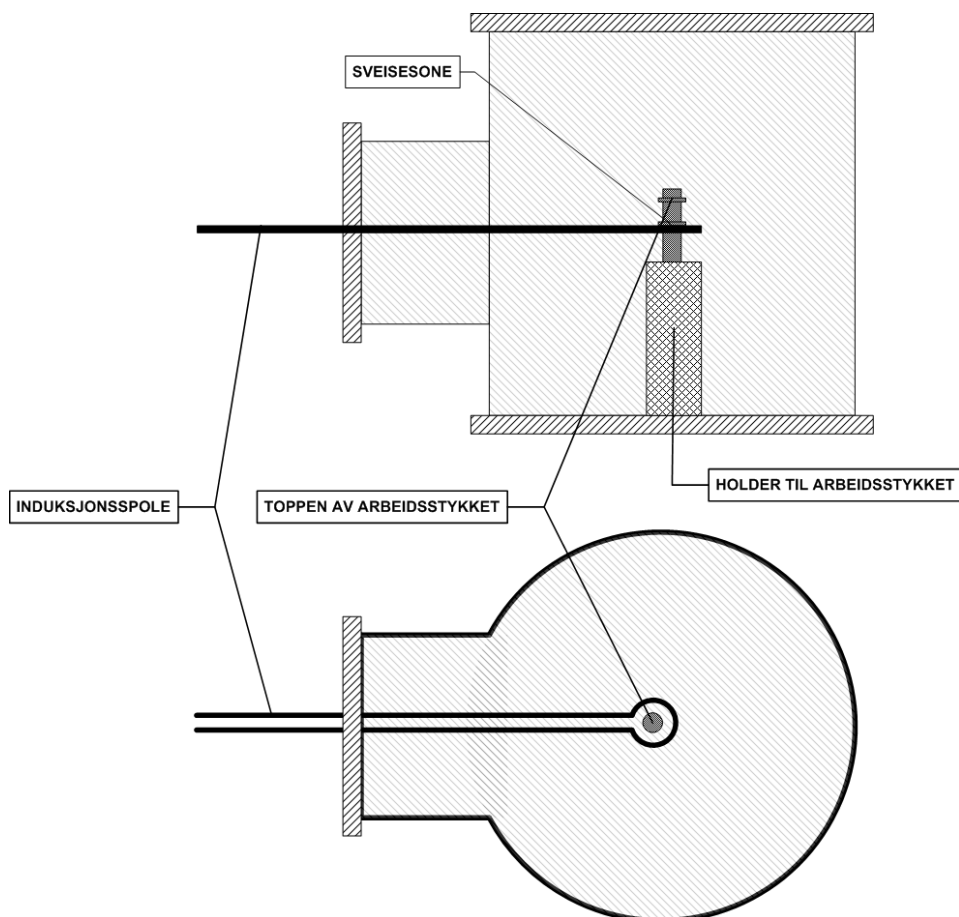
3.6.1. Effekt og Frekvens

Frekvensen som er nødvendig for å kunne få til en god induksjonsprosess er avhenging av egenskapene til materialet (Resistivitet, magnetisk permeabilitet, termisk konduktivitet osv.), geometrien til materialet og behovet for å oppnå ønsket skin-effekt ($d \geq$ tykkelsen på røret). Oppgitt effektvalg er ofte basert på effekten som går gjennom arbeidsstykket, og ikke ut fra innstilt effekt. Slike verdier må derfor undersøkes grundig.

Det finnes tre typer effekttap fra strømforsyningen til arbeidsstykket:

- Koblingstap mellom spolen og arbeidsstykket. Det prosentvise tapet er en funksjon av resistiviteten og permeabiliteten til metallet i arbeidsstykket og avstanden mellom arbeidsstykket og spolen.
- Effekttap mellom utgangsklemmen (utgangen til generatoren) og spolen. Dette er effekttap som følger av dårlig tilpasning av impedansen, og tap i kondensatoren.
- Effekttap på grunn av frekvensomforming fra linjefrekvensen til høyfrekvens AC.

Valg av effekt er vanskelig og angitte verdier fra litteraturen (f.eks: *Elements og Induction Heating* side 48 [9]), burde sees på som tilnærmede verdier. De beste verdiene oppnås ved faktiske forsøk. Feil valg av effektverdier er ofte kilden til feil og vanskeligheter som oppstår. En for stor effekt kan resultere i ujevne temperaturer, som igjen kan



Figur 3.4: Figuren viser en prinsippskisse for sveiseoppsettet for forsøksriggene.

føre til en dårligere sveis. Valg av riktig effekt er spesielt et problem i materialer med lav konduktivitet (som f.eks. rustfritt stål). [9, 14].

Valg av riktig frekvens, er i likhet med effekten, vanskelig å bestemme uten faktiske forsøk. Men valget kan likevel begrenses ved å kjenne til utfallet av de forskjellige frekvensene. En høyere frekvens blir ofte tilført for å oppnå et grunnere varmemønster, eller en større temperaturgradient inn i arbeidsstykket. Mens en lavere frekvens vil føre til en dypere oppvarming. Denne effekten kan ses i sammenheng med skin-effekten omtalt i del 3.1.1.

4. Kjøling av oppvarmet arbeidsstykke

Ved bruk av sveising som en gasstett sammenføyningsmetode vil arbeidsstykket oppnå en lokal temperatur som er høyere enn smeltetemperaturen til nikkel. Utfordringen til-

knyttet til den høye temperaturen er at nikkel vil reagere med luft og danne et oksidlag ved temperaturer over 300°C. Dette betyr at det ikke vil være mulig å fjerne arbeidsstykket før det er kjølt ned, noe som kan føre til økt tidsbruk for hvert enkelt eksperiment. Det er altså ønskelig å oppnå en kortest mulig nedkjølingstid. Derfor ble det i denne seksjonen gjennomgått teoretiske beregninger, samt simuleringer i Comsol, for å oppnå en forståelse av nedkjølingstiden. Resultatet ble til slutt sammenlignet med målingsdataene fra Eksperiment I, hvor arbeidsstykket ble varmet opp til en maks temperatur på 1023 °C.

Eksperiment I var den første testen som ble utført ved induksjonssveising. I løpet av testen ble arbeidsstykket varmet opp til en makstemperatur under smeltepunktet, dette ble gjort som en test på om forsøksriggen fungerte som den skulle. Testen gikk over en periode på 600s.

Simuleringene utført i denne delen ble gjort i samme tidsperiode som forsøkene, derfor vil noen av modellene som blir presentert her være påvirket av erfaringer fra forsøkene.

4.1. Teoretiske beregninger

For å kunne sammenlikne resultatene fra den numeriske analysen, så ble det også gjort en teoretisk vurdering av forsøksoppsettet. Med bakgrunn i likningen for energibevarelse, hvor det ses bort i fra påført varmekraft, varmegenerering og konveksjon så får vi en varmeoverføring kun ved stråling (se likning 4.1). En separering av variabler, likning 4.2, gjør det mulig å evaluere med hensyn på tiden, likning 4.3, [15].

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -\epsilon A \sigma (T^4 - T_{sur}^4) \quad (4.1)$$

$$\frac{\epsilon A \sigma}{mC_p} \int_0^t dt = \int \frac{dT}{T_{sur}^4 - T^4} \quad (4.2)$$

$$t = \frac{mC_p}{4\epsilon A \sigma T_{sur}^4} \left\{ \ln \left| \frac{T_{sur} + T}{T_{sur} - T} \right| - \ln \left| \frac{T_{sur} + T_i}{T_{sur} - T_i} \right| + 2 \left[\tan^{-1} \left(\frac{T}{T_{sur}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{T_i}{T_{sur}} \right) \right] \right\} \quad (4.3)$$

Det er viktig å bemerke seg her at likning 4.3 ikke kan separeres for temperaturen, T . Likningen vil også fungere dårlig ved omgivelsestemperaturer nær absolutt nullpunkt. Siden teorien her ble brukt for å sammenligne resultater, og ikke i konkrete beregninger, ble det gjort en forenkling i beregningen av arealet. Arealet ble beregnet ut i fra an-

tagelsen om at arbeidsstykket bestod av en solid sylinder uten et gjennomgående hull. Volumet ble derimot beregnet ut i fra antagelsen av at arbeidsstykket bestod av en sylinder av samme dimensjoner, men med et gjennomgående hull. Dette ble gjort for å kunne oppnå en mer realistisk masse. Det kan derfor ut i fra denne forenklingen antas at resultatene vil avvike noe fra de resterende resultatene.

4.2. Numerisk analyse

Til å begynne med ble det laget en veldig forenklet modell av forsøksoppsettet. Dette for å kunne verifisere at fysikken stemte overens med antagelsene, og for å få en grov forståelse av nedkjølingstiden. Det ble så laget mer kompliserte modeller i ettertid.

Den første modellen, Modell I, ble modellert slik som vist i figur 4.1. Denne består av en enkel 2D sylinder omgitt av en stålbeholder. Sylindere i modellen ble gitt en initial verdi på $T = 1296^\circ\text{K}$, omgivelsene og stål beholderen ble gitt en initial verdi på $T_{amb} = 293,15^\circ\text{K}$. Denne modellen vil ha en del grove forenklinger, men den vil være tilstrekkelig for å kunne sjekke om fysikken stemmer.

Den andre modellen, Modell II, ble laget for å inkludere effekter som ujevn temperaturfordeling i arbeidsstykket, en mer realistisk geometri og effekten av plexiglass i stedet for stål som lokk.

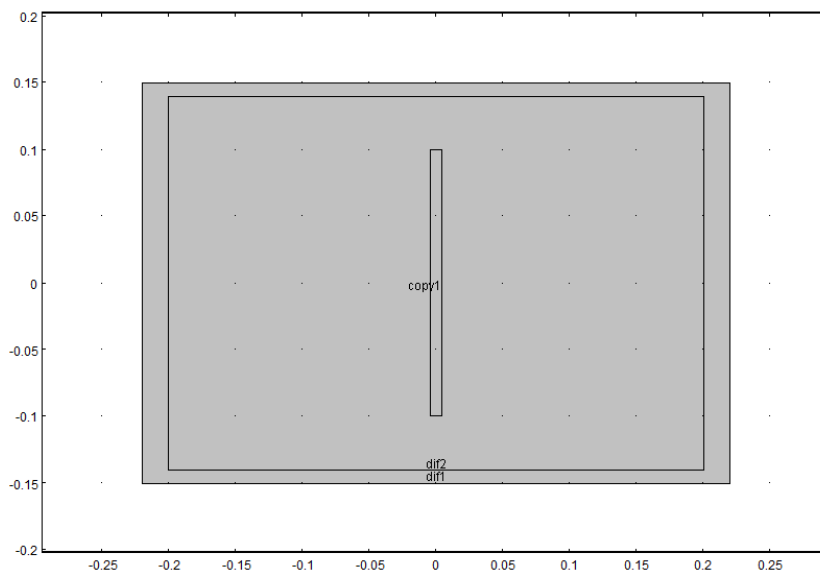
Modell III, ble laget med utgangspunkt i resultatene fra Modell I og II. Det ble også valgt å fjerne hele trykkbeholderen fra denne simuleringen, noe som gjorde det mulig å gi arbeidsstykket en mer komplisert og dermed realistisk geometri uten særlig større behov for datakraft.

Den siste modellen, Modell IV, ble laget for å simulere nedkjølingen ved høyere temperaturer. Det ble i dette tilfelle valgt en makstemperatur på 1728 K (Nikkels smeltepunkt).

De fleste simuleringene ble satt til å utføre beregninger som samsvarte med tidsintervallene fra eksperiment I, hvor en måling ble tatt hvert 0.1 sekund. Den totale simuleringstiden ble satt til 600 sekund, ettersom eksperiment I ikke hadde måledata lenger enn dette.

4.2.1. Modell I

Den første modellen ble laget for å oppnå en generell forståelse av nedkjølingstiden, og temperaturutviklingen fra arbeidsstykket til stålbeholderen rundt. Figur 4.1 illustrerer geometrien til modellen. Her er arbeidsstykket modellert som en hel sylinder omringet av



Figur 4.1: Comsol geometri for Modell I. Her vises trykkbeholderen (ytterste grå område), arbeidsstykket (midterste grå del) og luften rundt arbeidsstykket (midt-erste grå del).

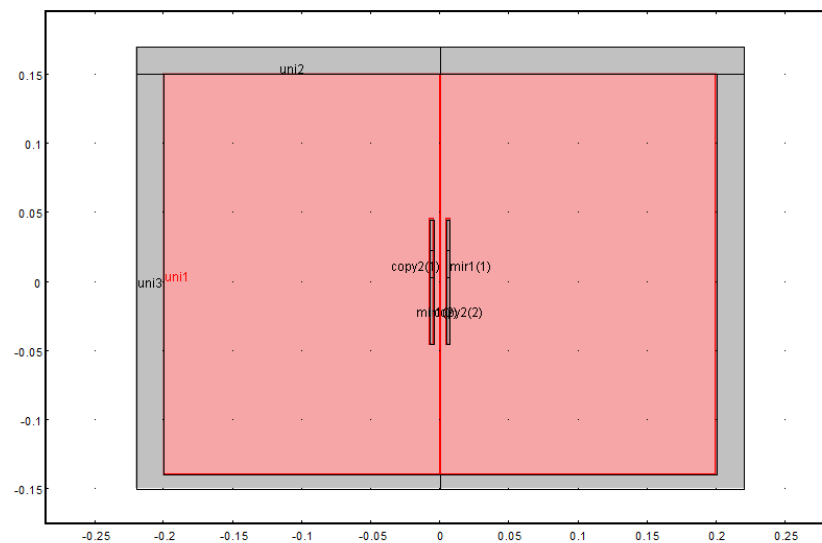
en stålbeholder. Initial temperaturen ble satt til $T = 1296^\circ\text{K}$ (Maks temp ved Eksperiment I), og tiden ble satt til 600s. Foruten standardegenskapene til materialene måtte emissiviteten til stålet og nikkelet defineres, her ble disse verdiene satt til $\varepsilon_{stål} = 0.7$ og $\varepsilon_{Ni} = 0.4$ [16]. Det er forventet at denne modellen vil avvike fra forsøksresultatene grunnet forenklinger som geometri, temperaturfordelinger og materialegenskaper.

Nedkjølingen av arbeidsstykket ble inkludert i figur 4.3, sammen med de resterende modellene.

4.2.2. Modell II

Den andre modellen ble laget for å forbedre usikkerhetene rundt den første modellen. Forbedringer som ble gjort var:

- **Plexiglass:** I denne modellen ble det lagt inn ett plexiglasslokk, dette isteden for en ren stål beholder. Lokket dekket hele det øvre området, og ble gitt en emissivitet på $\varepsilon_{PMMA} = 0.1$, [17].
- **Mer detaljert arbeidsstykkegeometri:** For å oppnå et mer nøyaktig resultat ble arbeidsstykket modellert som et rør for å gjøre den totale massen og volumet mer lik den fysiske modellen.



Figur 4.2: Cmsol geometri for Modell II. Den øvre delen av trykkbeholderen (grå ramme) simulerer plexiglasslokket. Nedre del (grå del) er stål delen av trykkbeholderen. Den røde delen er luften rundt arbeidsstykket. Selve arbeidsstykket er her illustrert ved de to grå delene i senter av bildet. Disse er delt opp i tre deler for å simulere de forskjellige oppvarmingssonene. De øvre og nedre delene ble gitt en initialtemperatur på 450°K , mens delene i midten fikk en temperatur på 1296°K .

- **Ujevn temperaturfordeling:** Ved sveising vil arbeidsstykket oppnå en ujevn temperaturfordeling, derfor vil antagelsen om en jevn initialtemperatur ($T = 1296^\circ\text{K}$) være feil. Det ble i denne modellen forsøkt å kompensere for denne effekten ved å dele arbeidsstykket opp i 3 deler. Den ene delen var området som er plant med spolen, og de to andre delene ble da områdene over og under denne varmere delen. Temperaturene ble satt til 1296°K og 450°K , hvor den første temperaturen er makstemperaturen ved eksperiment I og den andre er en antatt gjennomsnittstemperatur på de resterende delene av arbeidsstykket. Figur 4.2 viser geometrien til Modell II.

Nedkjølingen ble modellert i figur 4.3. Det ble i denne simuleringen valgt å se bort i fra transmissiviteten i plexiglasset. Dette ble gjort pga. kompleksiteten i modellen ville øke betraktelig ved å inkludere en ny fysikk (RF-module)¹.

4.2.3. Modell III

For å forenkle modellen videre ble det valgt å se på utfallet ved å fjerne hele trykkbeholderen fra simuleringen, men fortsatt beholde luften rundt ved ett gitt trykk ($P = 0.0067$ mbar). Dette ble gjort for å ta hensyn til en eventuell konveksjon ut i beholderen. Modellen ble også simulert i 3D (se figur 4.5). Dette gav ikke noe annet resultat enn ved en 2D simulering av samme modell, noe som var forventet. Resultatet av nedkjølingen over tid ble inkludert i figuren sammen med resultatene fra de tidligere modellene.

4.2.4. Modell IV

Modell IV er basert på de geometriske forandringene som ble gjort i forkant av Eksperiment II, som følge av resultatene fra Eksperiment I (se del 5.1). Siden Modellene frem til nå har basert seg på en makstemperatur på 1296 K, så ble denne modellen utført med en makstemperatur på 1728 K, som er smeltetemperaturen til nikkel. Dette for å gi en nedkjøling som er mer lik det som er forventet å se ut i fra eksperimentene. Resultatet er plottet i figur 4.4.

4.3. Usikkerheter

Det finnes flere mulige usikkerhetskilder ved nedkjølingstiden til arbeidsstykket. Blant disse er:

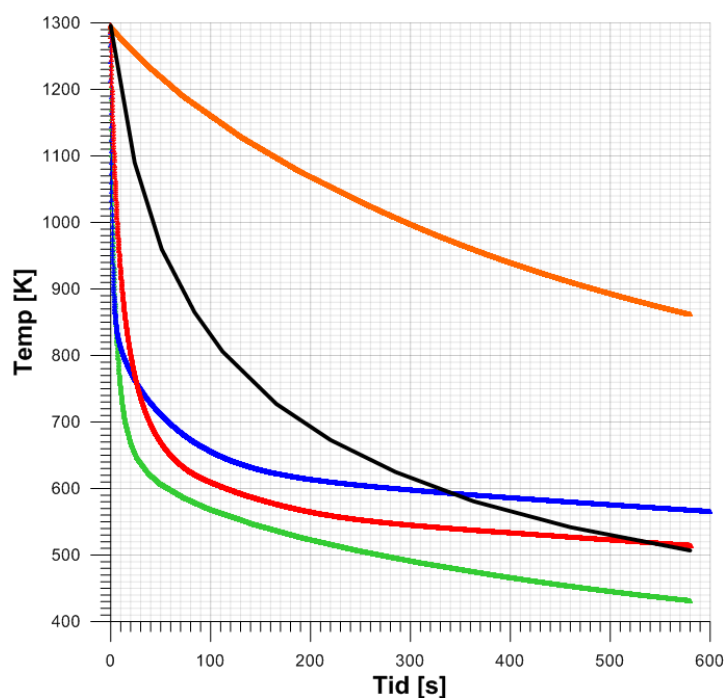
¹I ettertid viste det seg at plexiglasset og stålbeholderen ikke var av betydning for nedkjølingen. Det ble derfor valgt å ikke se nærmere på dette.

- Feilvurdering av materialegenskaper. Flere av de angitte materialegenskapene var for nikkel ved romtemperatur. I simuleringen ble det ikke tatt hensyn til en økende temperatur for alle verdiene.
- Trykket angitt i simuleringen var basert på et lavere trykk enn det som viste seg å være mulig å oppnå under eksperimentene. Det kan derfor hende at konveksjonen under nedkjølingen har en noe større betydning.
- Temperaturfordelingen over arbeidsstykket ble modellert med en veldig brå overgang mellom de tre sonene. I realiteten vil dette ikke være tilfellet, temperaturfordelingen vil ha en mye jevnere overgang.
- Initialtemperaturene som ble satt ved simuleringene var basert på en kvalifisert gjetning, og et behov for en enkel modell. Temperaturene som oppstår under eksperimentene kan derfor avvike fra disse initialtemperaturene.

4.4. Konklusjon

Modell I har en uniform temperatur fra starten av, derfor vil det ikke oppstå noen varmeoverføring ved konduksjon i selve arbeidsstykket. Siden omgivelsene består av et veldig lavt trykk vil også konveksjonen ut i beholderen være redusert. Fra figur 4.3 kan en se at den teoretiske strålingsmodellen har et større temperaturfall enn Modell I. Denne forskjellen kommer trolig av at den teoretiske delen baserer seg på et større areal. Dette arealet er inkludert arealet på innsiden av røret, og dermed vil denne modellen være mer geometrisk lik Modell II.

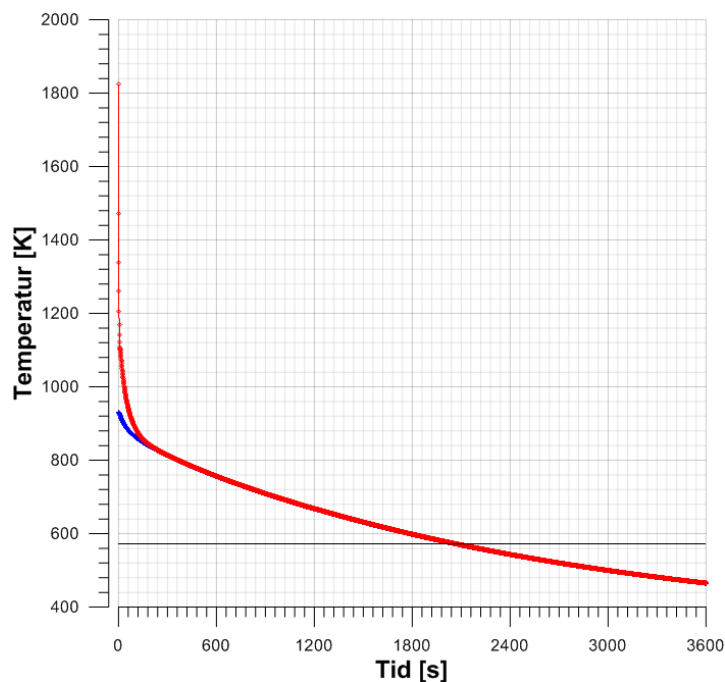
Siden Modell II og III er modellert med forskjellige temperaturer (høyest ved sveisepunktet) så er det naturlig å forvente at denne temperaturforskjellen vil reduseres ved at varmen fordeles i arbeidsstykket gjennom konduksjon. Dette blir observert i figur 4.3, hvor temperaturen får en bratt kurve i starten og flater ut etterhvert. Denne bratte kjølingen kommer trolig av som følge av arbeidsstykkets varmfordeling. Når arbeidsstykket har oppnådd en jevn fordeling er det kun strålingseffekten som gjenstår. Strålingen vil ha en større effekt ved høyere temperatur, men denne effekten vil ikke være synlig i grafen som følger av den større konduksjonen. En kan også i figuren observere at den teoretiske strålingsmodellen ser ut til å gå mot en lavere verdi enn de resterende modellene. Dette kan forklares ved at de resterende modellene tar hensyn til en oppvarming av lufta rundt, noe som den teoretiske modellen ikke gjør.



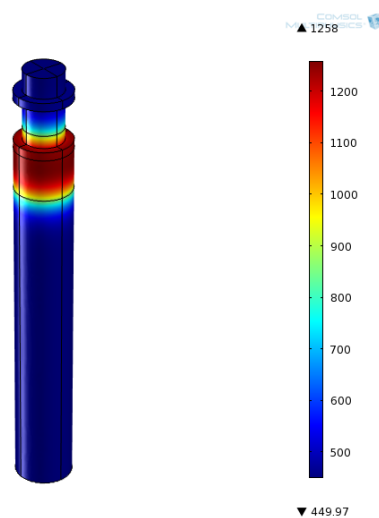
Figur 4.3: Figuren viser nedkjølingstiden for arbeidsstykket etter forholdene ved eksperiment I. Oransje: Modell I, Grønn: Modell 2, Blå: Modell III, Rød: Eksperiment I, Sort: Incropera.

Modellene (II og III) samsvarer godt med resultatet fra eksperiment I. Nedkjølingen for eksperimentet går mot en noe lavere verdi enn Modell III, dette kommer trolig av feil valg av initialverdier for temperaturen til den kaldere delen av arbeidsstykket. Det ble også observert ut i fra de forskjellige simuleringene at betydningen av å inkludere trykkbeholderen ikke var stor.

Ut i fra simuleringen til modell IV (figur 4.4) ser det ut til at det vil ta ca 35 min før temperaturen på arbeidsstykket er under 300°C . For å være sikker på at arbeidsstykket har fått nok tid til å kjøles ned på, anbefales det derfor på grunn av usikkerhetene en times nedkjølingstid. Dette for å være sikker på at det ikke vil oppstå dannelse av nikkeloksid.



Figur 4.4: Nedkjølingstiden for arbeidsstykket. Sveisesonen ble satt til 1728 K, resten av arbeidsstykket til 800 K og lufttemperaturen til 293 K. Den røde linjen er makstemperaturen ved angitt tidspunkt. Den blå linjen er arbeidsstykkets gjennomsnittstemperatur, mens den sorte rette linjen viser grensen $T = 300$ °C.



Figur 4.5: Modell III. 3D-versjonen av nedkjølingsmodellen, hvor de to forskjellige sonene for initialtemperatur vises. Tiden $t = 0$, og Temperaturene er 1296/450/293 K.

5. Forsøk med Rigg I

5.1. Bakgrunn

Den første testtriggen ble laget for å undersøke om det var mulig å oppnå en gasstett sveis i vakuum ved bruk av induksjon, uten at det oppsto dannelse av nikkeloksid. Det ble derfor laget en trykkbeholder som var stor nok til å romme en induksjonsspole og arbeidsstykket. Denne beholderen må ha muligheten til å holde et trykk på omtrent 0.02 Torr.

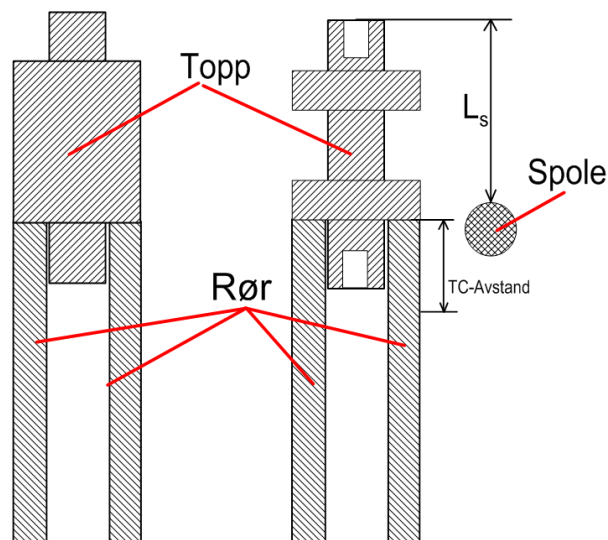
En av utfordringene ved dette forsøket var mengden av variable parametere. På grunn av tid- og material-begrensninger (nikkel) var det ikke mulig å undersøke effekten av alle forskjellige parameterne, og det ble derfor gjort et utvalg av aktuelle parametere som det var ønsket å undersøke. Målet med forsøket er en serie med trykktette sveiser utført under vakuum ved bruk av induksjon.

5.2. Forsøksoppsettet

Forsøksoppsettet består av følgende deler:

1. **Mellomfrekvensgenerator, MINAC 50:** Generatoren har som oppgave å transformere strømmen som blir levert fra strømnettet til ønsket utgangseffekt (P) og frekvens (f). Den har også mulighet til å tilføre kjølevann gjennom spolen. Generatoren kan styres manuelt eller som det ble gjort i dette tilfellet, ved hjelp av en loggmodul. Effekten gis prosentvis, og kan variere mellom 5 og 50 kW (0-100%). Utgangsfrekvensen er mellom 10 og 25 kHz. For mer informasjon om Minac 50 se appendiks E.
2. **Loggmodul:** Loggmodulen gjør det mulig å koble en datamaskin til generatoren, og gjennom denne er det mulig å styre generatoren ved ønsket makstemperatur (T_{maks}) til forskjellige effekter. Modulen gjør det også mulig å loggføre temperaturendringene.
3. **Trykkbeholder:** Trykkbeholderen ble konstruert slik at det var mulig å utføre en induksjonssveising inne i beholderen under vakuum. Det var derfor behov for innganger til vakuumpumpen, induksjonsspolen og termoelementet. Lederne til spolen gikk gjennom hver sin 1/4" gjengenippel med flarekobling av messing, som var festet i en pleksiglass flens. Koblingene var loddet sammen for å sikre ledeevnen. Åpningen til vakuumpumpen gikk ut til en trykkmåler og vakuumpumpen.

4. **Vakuumpumpen:** Pumpen som ble tatt i bruk under forsøket var en Pfeiffer Duo 004A, og hadde en pumpehastighet på $4 \text{ m}^3/\text{h}$.
5. **Trykkmåler:** Pirani gauge head, M5C-2. Denne trykkmåleren var ikke kalibrert før bruk, derfor ble den i ettertid kontrollert opp mot en annen måler som var kalibrert. Trykkene som ble målt i Torr ble så regnet om til mbar via en graf som kom av denne kontrollen. Grafen er gitt i appendiks B.
6. **Trykkindikator:** Indikatoren, Pirani 8/2, har muligheten til å indikere trykk ned til en finhetsskala ned til 0.0001 Torr.
7. **Spolen:** Spolen hadde flere mulige design. Hvilke valg som ble tatt i forhold til denne vil bli diskutert senere i teksten.
8. **Datmaskin:** En vanlig stasjonær datamaskin ble tatt i bruk for å kunne prosessere og lagre dataene fra loggemodulen og for å styre generatoren ved hjelp av en gitt makstemperatur og en gitt effekt.
9. **Termoelement:** Et termoelement (TC), type k, ble tatt i bruk. Termoelementet ble festet til arbeidsstykket ved hjelp av et loddeapparat eller et punktsveiseapparat (punktsveiseapparatet gav best resultat). Elementet ble festet til en overgang inne i trykkbeholderen, som gikk gjennom en godt isolert åpning på trykkbeholderen og deretter inn til omformerer. Overgangen var gunstig fordi den fjernet behovet for å isolere termoelementledningen mellom hvert forsøk. Termoelementet hadde en maksimal opereringstemperatur på $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ og det er enda uvisst hva konsekvensene det hadde for målingene hvis denne temperaturen ble oversteget. Det er også uvisst hvordan termoelementet reagerer på et induksjonsfelt.
10. **Arbeidsstykket:** Arbeidsstykket som skulle sveises bestod av ett rør, en topp og ved noen forsøk en ring. Alle delene var av Nikkel 201. De to ulike toppgeometriene som ble tatt i bruk vises i figur 5.1.
11. **Holder til arbeidsstykket:** For å holde arbeidsstykket på plass ble det montert en uthulet sylinder av teflon i bunnen av trykkbeholderen, rett under spolen. Inne i beholderen ble det lagt et lag med isolerende materiale (RF-1000s Firefly) for å hindre at varmen fra røret ville smelte holderen.
12. **Lokkfjær:** For å hjelpe til med sentreringen av arbeidsstykket, og hindre at toppen av arbeidsstykket ville hoppe av, ble det laget en topp som kunne settes på arbeidsstykket for å sentrere dette. For at denne toppen ikke skulle få høydebegrensning



Figur 5.1: De to ulike arbeidsstykkegeometriene. Figuren til høyre viser den enkle geometrien (Type 1), figuren til høyre viser den forbedra geometrien (Type 2).

på arbeidsstykket så ble det satt på en fjær mellom trykkbeholderlokket og toppen. Se figur 5.2 for bilde.

5.3. Parametre

Ved utførelse av induksjonssveisingen finnes det flere parametre som kan påvirke kvaliteten av sveisingen. Noen vil være fastsatt under hele forsøket, mens andre parametre kan endres på i løpet av forsøket. De ulike parametrene vil bli gjennomgått i større detalj senere i oppgaven. Det ble satt en del begrensninger på hvor mange ulike typer geometrier som kunne testes, dette på grunn av en begrenset mengde nikkel og tid.

- **Generator:** Til utførelsen av forsøket er det kun en tilgjengelig generator. Dette fører til en begrensning av tilgjengelige effekter og frekvenser gjennom forsøket.
- **Ledere:** Utformingen av lederne fra generatoren og inn i beholderen er en tidkrevende prosess, og det har derfor kun blitt laget en versjon. Utformingen er av stor betydning ettersom denne påvirker strømføringen gjennom lederne, massen i lederne, frekvenstap, tilførsel av kjølevæske osv.
- **Spoleutforming:** Spolen og dens utforming vil ha en stor påvirkning av styrken og størrelsen av påført effekt på arbeidsstykket. Det må derfor tas hensyn til spolens krumning, sentrering og utforming ved spoleåpningen.

- **Spolerørets utforming:** Rørets indre og ytre diameter vil også ha en betydning for effekten, dette fordi den begrenser masse/lengde forholdet av kobber, og massestrømmen av kjølevæske. På grunn av produksjonstekniske utfordringer og krav til rørets indre diameter ble det kun utført forsøk med en spole av standard 1/4" rør.
- **Arbeidsstykkets geometri:** Utformingen og skaleringen av arbeidsstykket avgjør hvordan magnetfeltet fordeler seg. Dette vil kunne påvirke betydningen av skin-effekten som påvirker varmfordelingen gjennom arbeidsstykket. En riktig geometrisk utforming av arbeidsstykket kan redusere den nødvendige effekten, som igjen vil gi en kortere oppvarmingsperiode og dermed en bedre sveis.
- **Arbeidsstykkets plassering i forhold til spolen:** Arbeidsstykket må plasseres så sentrert som mulig i forhold til spolen for å få en jevn sveis rundt hele arbeidsstykket. Plasseres spolen for høyt eller lavt i forhold til sveisepunktet kan det føre til en overopphetning av kun ett av arbeidsstykkene, noe som vil føre til en ujevn sveis.
- **Påført effekt:** For å justere effekten av magnetfeltet kan både spenning og frekvens endres, men siden frekvensen blir styrt av generatoren så vil den eneste variabelen vi har som kan styres være spenningen. Under hvert eksperiment vil effekten være konstant helt til en angitt T_{maks} er nådd.
- **Materiale:** Metalltyper til arbeidsstykket var begrenset til Nikkel 201. Dette var en begrensning som følger av at heatpipen bruker kalium som arbeidsmedium. Andre typer metaller ble derfor ikke brukt.
- **Tid:** Sveisetiden er avhengig av påført effekt, frekvens og arbeidsstykkets geometri. Under forsøkene ble det ikke satt noen bestemt tid. Dette på grunn av loggemodulen som kjørte generatoren helt til termoelementet traff den angitte temperaturen.

5.4. Utførelse av forsøket

De forskjellige parameterne fra forsøk til forsøk er gitt i tabellene 5.1 og 5.2. På grunn av et redusert antall nikkelprøver var det kun mulig å utføre et begrenset antall forsøk. Det ble derfor valgt å holde noen parametere konstant gjennom samtlige forsøk for å kunne avgjøre effekten av andre parametere.

I forkant av samtlige eksperiment ble arbeidsstykkene (Topp, rør og lodde ring) rensed. Først med vann, deretter med aceton, med fokus på å få sveiseoverflatene rene. For å unngå forurensning etter rensing, ble det tatt i bruk lateks-hansker.

Det er forventet at spolen vil sentrere arbeidsstykket i spolen av seg selv ved starten av forsøket. Dette skjer på grunn av det sterke magnetfeltet som retter opp arbeidsstykket. Ved tilfeller hvor arbeidsstykket er godt festet kan det hende at spolen senterer seg selv rundt arbeidsstykket.

Samtlige forsøk ble filmet for å få muligheten til å analysere sveiseprosessen nøyere i ettertid.

Eksperiment	I	II	III	IV
Geometri	Type 1	Type 2	Type 2	Type 2
Effekt (kW)	18.5 (30%)	18.5 (30%)	18.5 (30%)	18.5 (30%)
Start Trykk (mbar)		0.049	0.051	0.066 (<i>0.0425 Torr</i>)
Slutt Trykk (mbar)		0.08	0.071	0.099 (<i>0.06 Torr</i>)
TC-avstand (mm)		2	3	5
Tid (s)	11	16	20.2	32
Frekvens	11	12	12	12
Maks Temperatur (°C)	1000	1350	1350	1350
Ring	Nei	Nei	Nei	Ring 1
Fjærkraft	Ja	Ja	Ja	Ja
Rensing	Ja	Ja	Ja	Ja
He-tett sveis	Nei	Nei	Nei	Ja
Topp-spole avstand (L_s) (mm)	Sentrert	Sentrert	14.2	15.1

Tabell 5.1: Testparametre for forsøksrigg I. Eksperiment I til IV

Eksperiment	V	VI (Del 3)	VII	VIII
Geometri	Type 2	Type 2	Type 2	Type 2
Effekt (kW)	18.5 (30%)	18.5 (30%)	18.5 (30%)	18.5 (30%)
Start Trykk (mbar)	0.086	0.021	0.021	0.032
Slutt Trykk (mbar)	0.13	0.098	0.08	0.09
TC-avstand (mm)	5	5	5	3
Tid (s)	30	34	25	22
Frekvens	12	12	12	12
Maks Temperatur (°C)	1350	1350	1350	1350
Ring	Ring 2	Nei	Ring 3	Nei
Fjærkraft	Ja	Ja	Nei	Nei
Rensing	Ja	Ja	Ja	Ja
He-tett sveis	Ja	Ja	Ja	Ja
Topp-spole avstand (L_s) (mm)	15.1	14.2	15.1	14.2

Tabell 5.2: Testparametere for forsøksrigg I. Eksperiment V til VIII

Følgende eksperimenter ble utført:

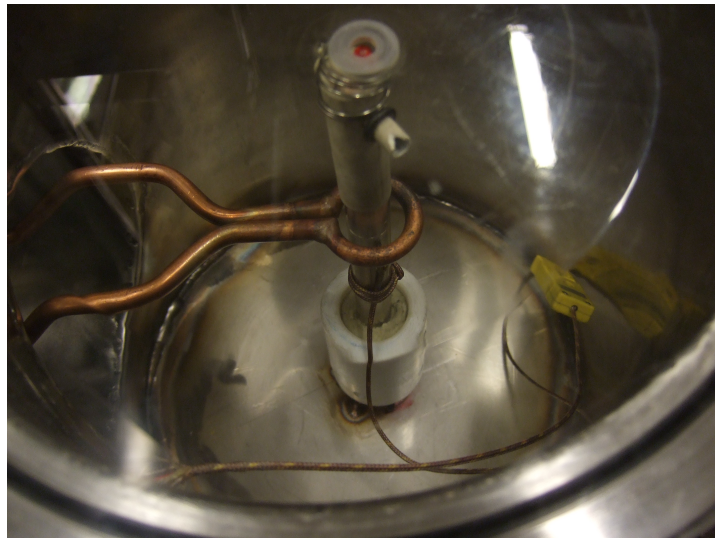
5.4.1. Eksperiment I

Hensikten med det første eksperimentet var å undersøke at utstyret var i orden og fungerte som det skulle. For sikkerhet skyld ble maks temperaturen satt til $T_{maks} = 1000^\circ\text{C}$, geometrien var av type 1, og effekten ble satt til $P_{eff} = 30\%$ av den totale effekten. Valget av effekt kom som følge av anbefaling fra eier av generatoren.

Det viste seg at 1000°C ikke var varmt nok til å føre til noen form for deformasjon på arbeidsstykket, men det ble oppdaget en del røyk som følge av varmeutvikling ved spoleinngangen på trykkbeholderen. Det ble antatt at denne varmen kom som en følge av spolens utforming (se figur 5.2), som fikk en unødvendig motstand pga. nærheten til trykkbeholderen. Under oppvarmingen ble det også observert at røret ble varmet opp mye raskere enn toppen på arbeidsstykket. Det ble antatt at dette kom som følge av den store forskjellen i masse per overflateareal på de to delene. Siden maksimaltemperaturen var lav, ble det ikke påført nok effekt til å gi noen antydning til sveising. Figur 5.3 viser temperaturutviklingen til arbeidsstykket over tid.

5.4.2. Eksperiment II

Ved dette eksperimentet ble det valgt å endre på arbeidsstykkets toppgeometri. Dette ble gjort for å redusere forskjellen i masse per eksponert areal på de to delene, som ble



Figur 5.2: Forsøksoppsettet til eksperiment I. Her vises spolen som kommer inn i trykkbeholderen og går rundt arbeidsstykket. På toppen kan en se fjæra og den keramiske toppen som hjelper med å holde arbeidsstykket på plass. Legg merke til lederne til spolen som går veldig nært veggen.

oppdaget under eksperiment I. Det ble videre valgt å øke T_{maks} slik at den kom nærmere smeltepunktstemperaturen til nikkell på $T = 1435\text{-}1446^\circ\text{C}$ [18].

Pga. TC avstanden fra spolens senterhøyde og at målingene ved Eksperiment I viste 23 grader over T_{maks} ble den nye temperaturen satt til 1350°C som er ca 100°C under nikkels smeltepunkt. Under oppvarmingen ble det også denne gangen observert en ujevnhet mellom oppvarmingen av de to delene, noe som førte til at TC falt av og stoppet forsøket. Pga. menneskelig feil så finnes det ingen målingsdata fra dette eksperimentet.

Det ble utført en trykktest på prøven ved å senke den oppvarmede enden i vann for så å blåse luft inn i rørets ende. Det ble observert luftbobler som kom ut av røret og vi kunne dermed konkludere med at prøven ikke var tett.

Sveisen var så svak at toppen kunne brekkes av røret.

5.4.3. Eksperiment III

For å kompensere for den ujevne varmedannelsen mellom de to delene ble det bestemt at hele arbeidsstykket ble flyttet ned i forhold til spolen. Dette skulle sørge for at toppen fikk en større eksponering til magnetfeltet som skulle jevne ut varmedelingen. Avstanden L_s til senter ble da satt til 14.2 mm. Videre ble det også valgt å plassere TC lengre nede på røret. Dette vil sørge for en mye høyere maksimal temperatur på selve arbeidsstykket, men også skåne TC slik at det ikke skulle falle av. TC festet holdt til en temperatur på

$T = 1238^{\circ}\text{C}$ før det løsnet, noe som vises i figur 5.3. At TC løsner fra arbeidsstykket kan enkelt sees på figuren ved en plutselig økning i temperaturen. Resterende generert måledata må derfor forkastes. Det ble registrert en trykkøkning ved oppvarming. Det ble sett nærmere på dette i del 5.6.5.

Det ble utført en trykktest på samme måte som ved forrige eksperiment. Også her ble det observert luftbobler. Sveisen var denne gangen mye sterkere, og toppen måtte fjernes ved å dreie bort 3 mm av røret.

5.4.4. Eksperiment IV

Basert på eksperiment III ble det valgt å øke avstanden til TC fra 3 mm til 4mm, og å legge en ring av nikkell mellom de to delene. Ved å inkludere ringen ble det også valgt å legge til 0.9 mm (ringens tykkelse) til $L_s = 15.1$ mm, dette for å kompensere for toppens nye høyde. Det ble lagt stor nøyaktighet i sentrering av lokkfjæren, for å hindre at arbeidsstykket kom i kontakt med spolen.

Induksjonsprosessen viste seg å ta lenger tid enn i de tidligere forsøkene, ca 32 s, og det ble observert at den nedre flensen på toppen smeltet. Ved å studere filmopptaket av forsøket ble det lagt merke til at fjærkraften (fra lokkfjæren) presset toppen ned i røret, og kan ha bidratt til å øke kvaliteten på sveisen. Under nedtrykningen ble det også observert at toppen ble forskjøvet i rørets radielle retning, dette er en kraft som bør studeres nærmere ettersom den kan føre til at toppen blir presset slik at den kommer i kontakt med spolen.

Etter nedkjøling av prøven ble den trykktestet ved bruk av helium, se avsnitt 5.4.9 for beskrivelse av denne prosedyre. Resultatet var en trykktett sveis.

5.4.5. Eksperiment V

Hensikten ved dette eksperimentet var å kunne reprodusere resultatene fra eksperiment IV. Det ble derfor lagt vekt på å holde de forskjellige parameterne ved en så lik verdi som mulig. Det ble benyttet ett punktsveisapparat til festing av TC for å hindre at den skulle løsne fra røret.

Sveisingen viste seg å gi en sammenlignbar sveis som i eksperiment IV. For en oversikt over parameter forskjellene se tabell 5.1 og 5.2. Figur 5.4 viser temperaturutviklingen ved sveisingen.

Etter en helium-trykktest kunne vi konkludere med at også denne prøven var trykktett.

5.4.6. Eksperiment VI

Hensikten ved forsøket var å undersøke om en mangel på fjærkraft ville føre til at toppen hoppet av røret, og for å undersøke om det er mulig å oppnå en like god sveis som i eksperiment IV og V uten bruk av en ring. Det ble foretatt tre delforsøk som var så identiske som mulig til eksperiment IV og V foruten de parameterne det var ønsket å undersøke.

- **Del 1:** Eksperimentet ble utført uten fjærkraft, men med ring. Siden spolen drives av en vekselstrøm vil det kun være nødvendig å undersøke et kort tidsintervall så lenge $t > \frac{1}{f} \cdot T_{maks}$ ble derfor satt til 100°C.

Toppen viste ingen antydning til å bli presset av, og det kan dermed konkluderes med at fjærkraften ikke har en betydning i denne forstand.

- **Del 2:** Eksperimentet ble utført som en nøyaktig kopi som i del 1, bare denne gangen uten ring, og dermed med en avstand $L_s = 14.2$ mm. Heller ikke ved dette forsøket ble det observert noen behov for en fjærkraft.
- **Del 3:** Hensikten ved del 3 var å se om ringen som ble tatt i bruk i eksperiment IV og V hadde en betydning for en trykktett sveis. Dermed ble nok et identisk forsøk utført, men denne gangen uten en ring mellom røret og toppen. Avstanden, L_s , ble satt til 14.2 mm.

Utfallet var en sveiseprosess lik de forgående eksperimentene, se figur 5.5. Ved fjerning av prøven fra trykkbeholderen ble det oppdaget at en del av arbeidsstykket hadde smeltet og runnet ned på innsiden av røret. En heliums test av denne prøven viste at også denne var trykktett.

5.4.7. Eksperiment VII

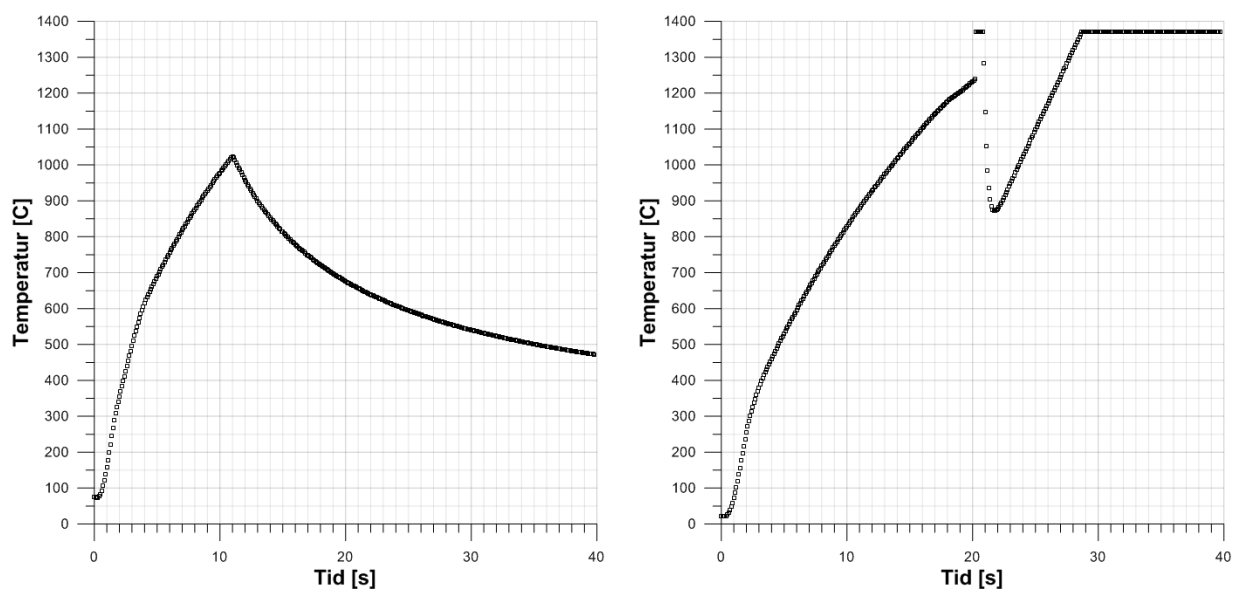
Hensikten ved dette eksperimentet var å undersøke betydningen av fjærkraften som en del av sammenføyningsprosessen. Dette var en interessant parameter å undersøke fordi det var i filmene til IV og V observert at fjæren kunne ha en betydning for sveisens kvalitet. Til dette forsøket ble kun fjærkraften tatt bort.

Under oppvarming ble det observert en veldig ujevn varmefordeling, hvor røret ble raskere varmet opp enn resten av arbeidsstykket. Dette kan være grunnen til den ugunstige sveisen. Den ujevne oppvarmingen tyder mye på at arbeidsstykket ble dårlig plassert i spolen. Bilde av arbeidsstykket vises i figur D.2 i appendiks D.

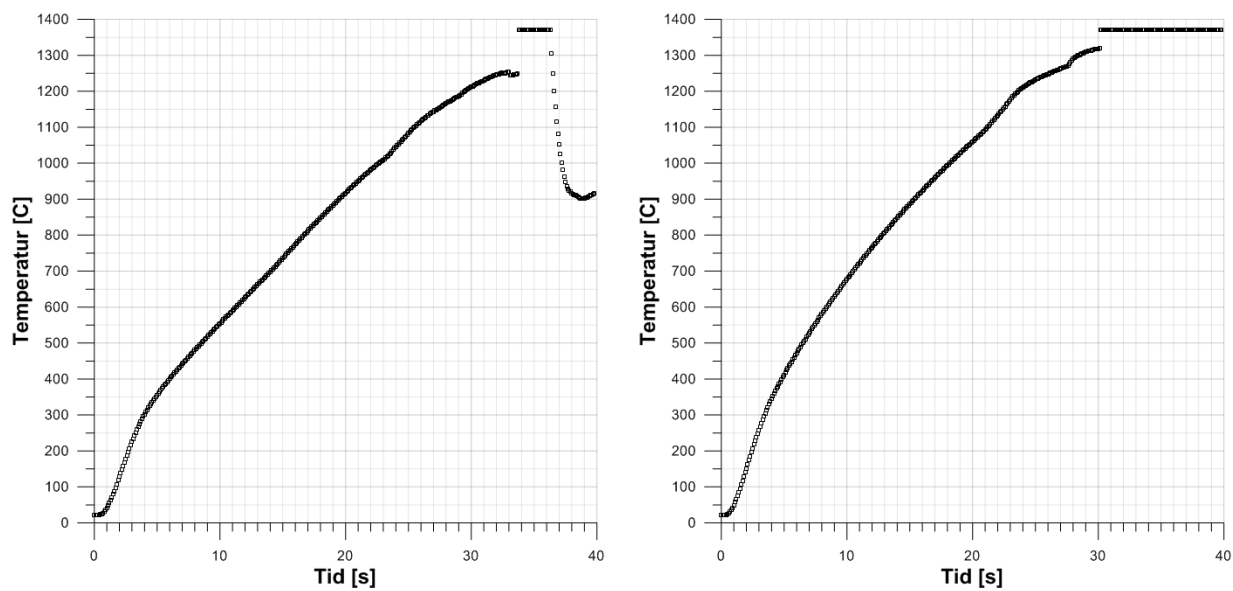
5.4.8. Eksperiment VIII

Nok en gang var hensikten å undersøke betydningen av fjærkraften, men denne gangen også uten ring. Her ble det observert tendenser til at smeltet nikkel holdt på å renne ut av sveisesonen og ned på utsiden av røret (se figur D.3). Dette er ikke gunstig fordi dette tyder på en større oppvarming enn nødvendig, og at det er mulig at noe nikkel har smeltet også på innsiden og endt opp inne i røret (som ble observert i eksperiment VI).

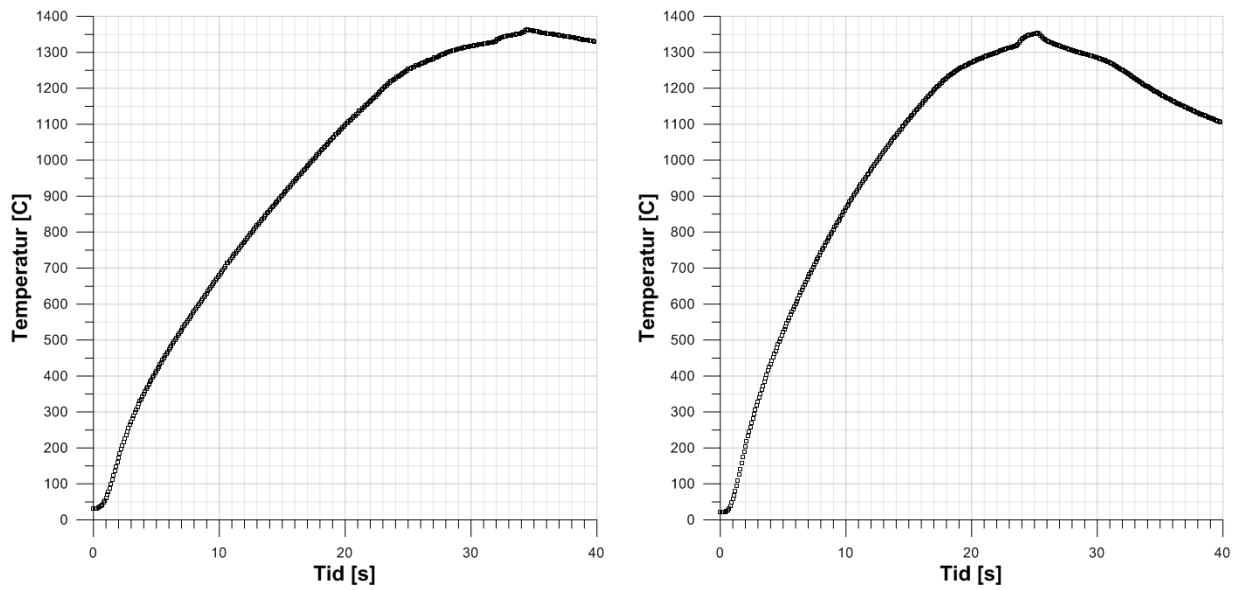
Resultatet var en trykkett sveis.



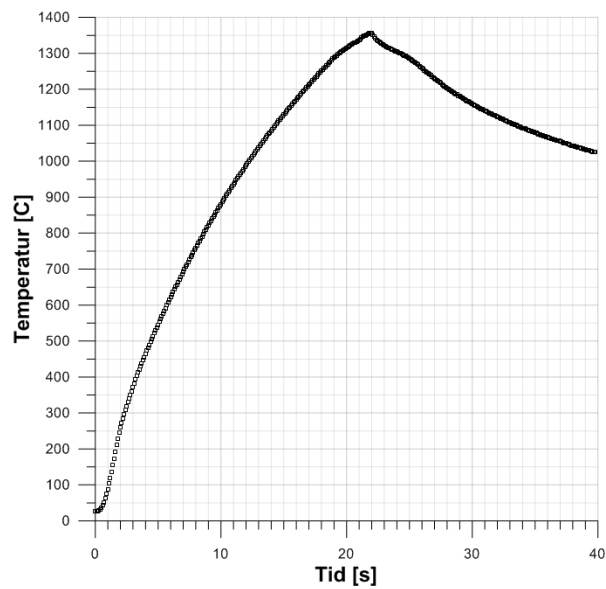
Figur 5.3: Temperatur/Tid Eksperiment I (Venstre) og III (Høyre)



Figur 5.4: Temperatur/Tid Eksperiment IV (Venstre) og V (Høyre)



Figur 5.5: Temperatur/Tid Eksperiment VI (Venstre) og VII (Høyre)



Figur 5.6: Temperatur/Tid Eksperiment VIII

5.4.9. Heliumstesting

Å undersøke tettheten av prøvene ved hjelp av helium er en meget gunstig metode siden heliumet består av veldig små atomer. Derfor vil en heliumstett sveis være en tilfredsstillende tett sveis. Testingen ble utført ved varmeteknisk avd. ved hjelp av en VARIAN 936-40 heliums lekkasje detektor som har en sensitivitet på 10^{-10} atm cc/s, [19]. Den fungerer ved at prøven monteres til et innløp i detektoren, det blir deretter pumpet et vakuu inne i detektoren. Ved å blåse helium på prøven skal heliumet trenge seg inn i åpninger i prøven. Hvis det registreres helium inne i detektoren går en alarm som indikerer at prøven ikke er tett.

Siden detektoren er såpass følsom så var det nødvendig å pusse ned overflaten på de prøvene som hadde for stor ruhet på overflaten, ettersom dette kunne forårsake at helium kom inn i detektoren utenom sveiseområdet.

5.4.10. Måling av fjærkraft

Flere av eksperimentene gav indikasjoner på at fjæren som var beregnet til å holde arbeidsstykket på plass også hadde en innvirkning på sveiseprosessen. Det ble observert at fjæren presset toppen ned i røret når de to delene var varme nok. På grunn av dette ble det bestemt å undersøke kraften til fjæra og betydningen av den. Fjærkraften ble undersøkt ved å presse fjæren ned mot en vekt ved forskjellige kompresjonslengder av fjæren, resultatene finnes i tabell 5.3 og blir illustrert i figur 5.7.

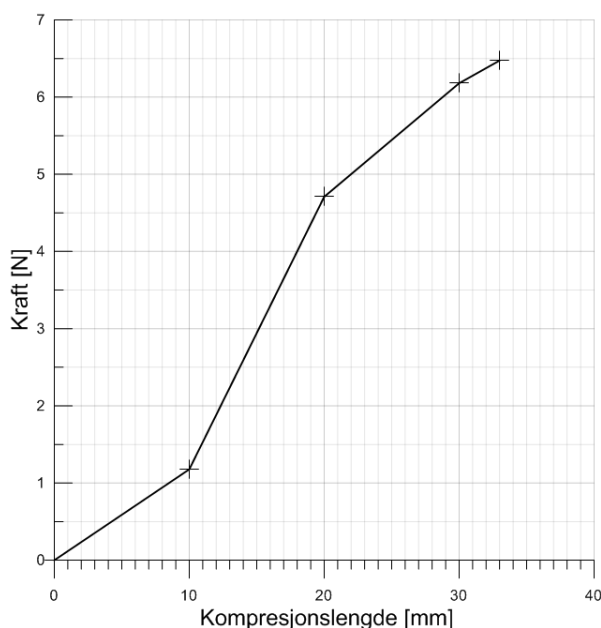
Kompresjonslengde	Vekt
36.5 mm	0 g
26.5 mm	120 g
16.5 mm	480 g
6.5 mm	630 g
3.5 mm	Helt sammenpresset, 660 g

Tabell 5.3: Måling av fjærkraft

Eksperiment VII og VIII ble utført for å undersøke fjærkraftens innvirkning på sveisen, og resultatet blir diskutert i del 5.6.3.

5.5. Usikkerheter

Det finnes usikkerheter relatert til eksperimentene, hvor de mest utslagsgivende trolig er:



Figur 5.7: Fjærkraft ved kompresjon.

1. **Termoelement:** Plasseringen av TC viser seg å ha en stor betydning på induksjonsprosessen. Siden generatoren styres ved at den påfører effekten helt til TC når den angitte T_{maks} temperaturen, så vil dette føre til at desto lenger bort i fra spolen TC plasseres desto lengre tid tar det før TC når makstemperaturen. Derfor er plasseringen av TC helt sentral i induksjonsprosessen, og må plasseres med stor nøyaktighet. Termoelementet var av type k, som var beregnet til en makstemperatur på 1350°C , det er uvisst hvordan elementet vil oppføre seg over denne temperaturen, et tilfelle som oppsto ved flere av eksperimentene. Det stilles også en usikkerhet i hvordan termoelementet selv blir påvirket av induksjonsfeltet. Dette er en effekt som det ikke har blitt tatt noen særlig hensyn til under eksperimentene.
2. **Festemekanisme for arbeidsstykket:** Under eksperimentene ble det brukt en teflonsylinder fylt med et isolerende materiale som festeinnretning. Denne innretningen kan i sammenheng med fjærkraften ha ført til at arbeidsstykket ble presset lengre ned enn først antatt, noe som vil føre til en mye lenger induksjonsprosess fordi TC også endrer posisjon i forhold til spolen.

5.6. Resultat

Basisen for hvordan eksperiment I ble utført kom som utgangspunkt i teorien samt anbefalinger fra eier av induksjonsutstyret. Eksperimentene som fulgte ble deretter satt

som følger av resultatet av de foregående eksperimentene. Sveiseprosessen ble på denne måten optimalisert.

5.6.1. Termoelement

Termoelementene ble festet til arbeidsstykket for å kunne avgjøre når loggemodulen skulle avslutte sveiseprosessen. Det viste seg at selv en liten forskjell (1-2 mm) i hvor høyt termoelementet ble festet hadde en stor betydning på hvor lenge prosessen pågikk. Som det ble observert ut i fra eksperiment III og VI, så gav en forskjell på 2 mm en sveisetid på nesten 14 sekund lenger.

Metoden for å feste termoelementet ble utslagsgivende for dataloggingen. Under flere forsøk løsnet termoelementet, noe som førte til at prosessen stoppet, og nedkjølingsdataen gikk tapt. Bruken av et punktsveisapparat viste seg å gi et godt feste, men også dette løsnet til tider pga. at røret nærmet seg smeltepunktet.

5.6.2. Loddering

Eksperiment IV var det første forsøket som ble utført med en loddering i sveiseområdet, dette var også det første eksperimentet som resulterte i en trykktett sveis. Hensikten med eksperiment IV var å kopiere eksperiment III, men denne gangen med en ring i sveisesonen. Det kan allikevel ikke konkluderes med at ringen var essensiell for å oppnå dette resultatet, selv om eksperiment III ikke resulterte i en trykktett sveis. Dette kommer av at TC-avstanden i eksperiment IV ble satt til 5 mm, mens avstanden var bare 3 mm i eksperiment III. Dette resulterte i at termoelementet ble plassert nærmere sveisesonen, og dermed at loggemodulen stanser oppvarmingen tidligere. Resultatet av dette kan sees ut i fra tabell 5.1 og 5.2., hvor eksperiment III har en sveisetid på 20.2 sekund, mens eksperiment IV har en sveisetid på hele 32 sekund. At forskjellen i sveisetid er den mest åpenbare årsaken til at eksperiment III ikke ble trykktett, ble bekreftet under eksperiment VI del 3. Her ble forsøket satt opp så identisk som mulig for igjen å undersøke betydningen av ringen. Resultatet var en trykktett sveis, og en kan dermed ikke konkludere med at ringen er en avgjørende faktor for en vellykket sveis.

5.6.3. Fjærkraft

Fjærkraften ble inkludert i eksperimentene med den hensikt at den skulle hindre toppen på arbeidsstykket i å hoppe av. Dette på grunn av at frekvensendringene som ble påsatt arbeidsstykket kunne indusere vibrasjoner i toppen. Det ble i eksperiment VII og VIII

undersøkt virkningen av fjærkraften på sveisen med og uten ring. Resultatet var to trykktette sveiser, men med noen uønskede effekter. Arbeidsstykket i eksperiment VII fikk en veldig smal diameter i sveisesonen, det er derfor uvisst hvor dyp og sterk denne sveisen er. I eksperiment VIII kan en observere tendenser til at nikkelet har begynt å renne ned på utsiden av arbeidsstykket. Bilder av de forskjellige arbeidsstykkene som ble omtalt her finnes i appendiks D.

En viktig effekt av å inkludere fjærkraften blir observert i filmene til eksperiment IV og V. Her ble det observert at fjærkraften presset toppen ned mot røret. Dette kan være en avgjørende faktor for tykkelsen til sveisen. Kompresjonslengden av fjæren var vanskelig å måle når arbeidsstykket og lokket til trykkbeholderen var på plass. Men med utgangspunkt i målingen av fjærkraften kan vi konkludere med at denne kraften var mellom 0 og 6.5 N.

5.6.4. Geometri

Ved starten av eksperimentene var det ikke planlagt å endre på arbeidsstykkets geometri. Dette på grunn av at det var en begrenset mengde av tilgjengelig nikkel, og for å redusere tiden mellom forsøkene var de fleste delene ferdigproduserte før eksperiment I ble satt i gang. Toppen ble laget lik på begge sider, slik at det var mulig å bruke den andre enden i neste eksperiment. Dette ble gjort for å redusere bruken av nikkel.

Ut i fra den ujevne varmfordelingen ble det derfor valgt å redusere massen på toppen så mye som mulig. Den nye geometrien (type 2) var slik at den hadde minst mulig masse men fortsatt samme diameter som røret ved sveisepunktet. Denne geometrien viste seg i eksperiment IV og senere veldig gunstig for vår hensikt. Under sveisingen ble det observert at flensen på toppen smeltet og la seg over sveisepunktet. Dette kombinert med fjærkraften sørget for en sveis hvor det i ettertid ble observert fra innsiden av røret at noe nikkel hadde smeltet slik at det hadde lagt seg på innsiden av røret mellom toppen. Så lenge nikkelet ikke renner ned i røret er dette gunstig for kvaliteten på sveisen.

5.6.5. Trykkendring i beholder

Ved utførelse av eksperimentene ble det oppdaget at trykket økte under induksjonsprosessen. Det ble antatt at dette skyldtes at den lave andelen luft fikk en tilsvarende temperaturøkning til trykkendringen. Det ble foretatt en enkel beregning ut i fra antagelsen om luft som idealgass og kun endringer i trykk og temperatur, som gav følgende uttrykk:

$$T_2 = \frac{P_2}{P_1} \times T_1 = \frac{0.06}{0.0425} \times 293^\circ K = 140^\circ C \quad (5.1)$$

Tallene kommer fra eksperiment IV, se skråstilt tall i Tabell 5.1. Resultatet viser en temperatur på luften som ikke er usannsynlig for de gitte omstendighetene.

5.6.6. Sotdannelse på spolen

Etter eksperiment IV, V og VI ble det oppdaget at det hadde oppstått et lag med sot på spolen, men ingen merkbar sotmengde på arbeidsstykket. Det ble raskt antatt at sotlaget oppsto på grunn av den høye temperaturen som følger av induksjonsprosessen. Dette samsvarer med induksjonstiden, altså var det de eksperimentene som hadde den lengste induserte tiden som resulterte i et sotlag på spolen. I tabell 5.1 og 5.2 kan en se at det nettopp var eksperiment IV, V og VI som hadde de lengste tidene. Det ble antatt at sotet kom som en følge av oppvarming av kobberspolen som ved de høye temperaturene gav fra seg urenheter.

5.7. Konklusjon

Resultatene fra eksperiment IV gav en trykktett sveis som lot seg reproducere i eksperiment V. Videre viste det seg at de parameterne som det ble valgt å endre på, gav et dårligere resultat. Eksperiment I til III var ikke trykktette, eksperiment VI resulterte i smelte som rant ned og ut av røret, eksperiment VII resulterte i en sveis med veldig liten diameter, mens eksperiment VIII viste tendenser til at toppflensen ville renne ut på utsiden av røret. Det vil derfor være naturlig å gjenskape parameterne fra eksperiment IV og V ved ønske om å oppnå en ny trykktett sveis.

Sotdannelsen og effekten av fjærkraften var to uforutsette hendelser. Fjærkraften gav en heldig erfaring over hvor lite kraft som skal til for å forbedre sveisen. Sotdannelsen derimot var en uønsket effekt, men som allikevel var en verdifull erfaring med tanke på at en slik utsoting fra metallet kan ødelegge for trykket i høyvakuumsriggen (forsøksrigg 2), og dette er nå et kjent problem.

Eksperimentene utført ved forsøksrigg 1 gav mye nyttig informasjon relatert til induksjons-sveising i vakuum. På grunn av tid og material begrensninger ble det ikke mulig å undersøke alle parameterne grundig nok. Det er derfor meget mulig at det finnes en parameterkombinasjon som vil resultere i en bedre sveis en det som ble oppnådd her. Men siden hensikten ved disse eksperimentene var å oppnå en trykktett sveis og å kunne

reprodusere resultatet, så kan det konkluderes med at eksperimentene ved forsøksrigg 1 var vellykket.

6. Numeriske Beregninger

For å oppnå en bedre forståelse av selve sveise prosessen og de forskjellige parameterne sin effekt på sveisens kvalitet, ble det foretatt en rekke numeriske beregninger. Disse beregningene ble gjort ved hjelp av FEM-verktøyet Comsol Multiphysics, hvor hovedfokus var på temperaturfeltene og varmegenerering i sveisesonen. Comsol tar i bruk en rekke matematiske modeller for å kunne utføre beregningene nødvendig for induksjonsmodellen. Ett eksempel på dette er Maxwell likningene som er gitt på differensialform i likning 6.1 til 6.4.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{Fra Amperes lov}) \quad (6.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Fra Faradays lov}) \quad (6.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{Fra Gauss lov}) \quad (6.3)$$

$$\nabla \cdot \phi = q \quad (\text{Fra Gauss lov}) \quad (6.4)$$

Disse ble brukt i beregningene av tidsvarierende elektromagnetiskefelt, og tilsvarende likninger finnes for termiske- og strømnings-forhold. Det ble derfor nødvendig å ha en grunnleggende kjennskap til disse relasjonene for å sikre seg realistiske simuleringer.

Følgende referanser ble brukt i forståelsen og oppbygningen av modellen: [20, 21, 22, 23, 24], samt Comsol's egen brukerguide og læreprogram.

6.1. Oppsettet

Modellen som ble laget var en så god som mulig kopi av oppsettet fra eksperiment IV og V utført i del 5. For å redusere kompleksiteten, og dermed behovet for datakraft, av modellen ble den modellert i 2D-aksesyrrisk koordinatsystem. Her ble r-aksen i modellen den samme som for arbeidsstykket, hvor $r = 0$ var senter på arbeidsstykket. z-aksen ble lengden på arbeidsstykket, og ϕ ble vinkelen inn i modellen. Fordelen å ta i bruk et 2D-aksesyrrisk koordinatsystem, i stedet for et normal 2D-system, er at

Cmsol automatisk utfører beregninger som om modellen roterer rundt r-aksen, med en vinkel $\phi = 2\pi$. Initialverdiene som ble satt i modellen er gitt i tabell 6.1.

Temperatur til spole og vann	10°C
Temperatur resterende	20°C
Frekvens	12 kHz
Spolens avstand fra arbeidsstykket	16.425 mm
Spolens høydeplassing	$z = 67.7\text{mm}$
Strøm	1837 A
Varmekapasiteten til vann	4.2 kJ/kg K \times 100
Trykk	0.0067 mbar [25]

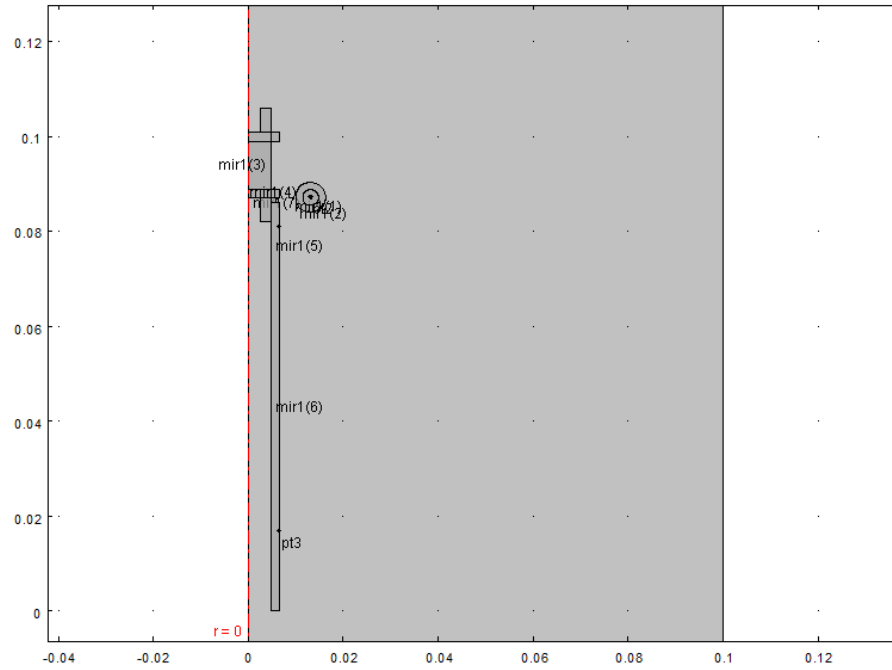
Tabell 6.1: Initialverdier ved simuleringen. Legg merke til at spolens høydeplassing er i forhold til aksene vist i figur 6.1

Under utførelsen av forsøkene ble spolen kjølt ned av en vannstrøm som gikk gjennom spolen. Det ble derfor nødvendig å ta hensyn til dette i simuleringen. Utfordringen med å implementere denne nedkjølingen var at innstrømningshastigheten ikke var kjent, og det var ingen tilgjengelige måledata som kunne brukes til å beregne denne. Løsningen ble å endre på vannets c_p -verdi. Denne ble satt til å være 100 ganger større enn normalt. Dette førte til at spolen fikk en redusert oppvarming. Siden Cmsol ikke godtok et absolutt vakuum (ingen modellerte medium mellom spole og arbeidsstykke), ble det satt inn luft med et trykk på 0.0067 mbar. Dette vil i teorien gi et mer realistisk resultat, ettersom det er dette trykket som er gitt i designet av forsøksrigg 2, [25]. Alle simuleringene tar hensyn til strålingstap, konveksjon ut til luften (det lille som er) og konduksjon i arbeidsstykket.

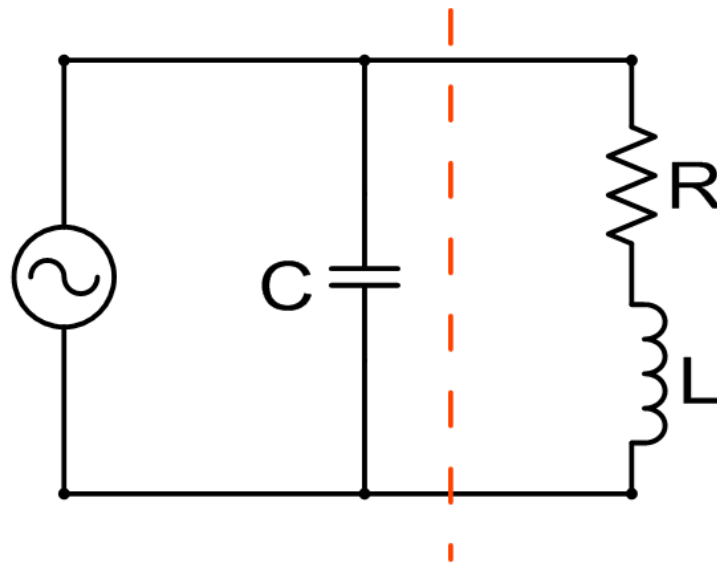
6.2. Valg av riktig strømverdi

Å bruke strømverdien som ble gitt av generatoren under forsøket $I_0 = 162$ [A] viste seg å gi altfor lave simulerte verdier. Det var derfor uvisst hvordan en skulle beregne denne verdien, og det var dermed nødvendig å foreta en grundig teoretisk gjennomgang av systemet.

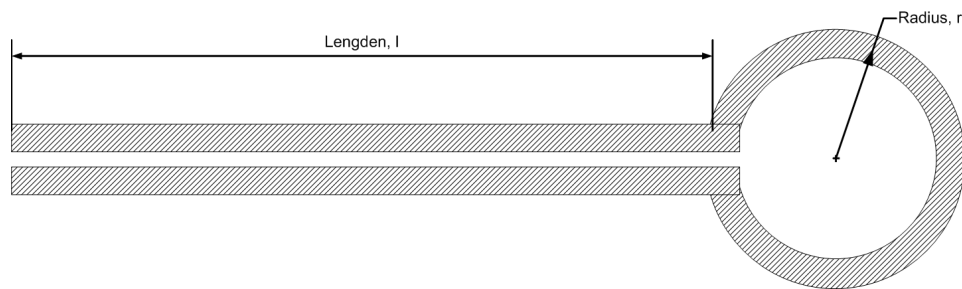
Figur 6.2 illustrerer RLC kretsen brukt i denne oppgaven. Her representerer C Kondensatoren, L Induksjonsspolen og R ledningsmotstanden i kretsen. Resistansen som oppstår i spolen kan enkelt regnes ut ved hjelp av resistiviteten til kobber, $\sigma = 16.78 \times 10^{-8} [\Omega m]$, og lengden på spolen $l = 2\pi \times r +$ (lengden på lederene) hvor r , er radiusen på spolen (se figur 6.3). Da blir det totale effektetappet gitt ved Ohms lov (likning 2.12).



Figur 6.1: Figuren viser det geometriske oppsettet til modellen brukt i simuleringen. En større figur kan finnes i appendiks A.



Figur 6.2: RLC krets. Området til venstre av den røde linjen viser kretsen som er en del av selve generatoren. Fra generatoren vil lederne og selve spolen bli påvirket av en resistans R , og en induktans L . Kondensatoren C , er en del av generatoren.



Figur 6.3: Spolens geometri

Når en skal gjøre effektberegninger i systemer hvor det må tas hensyn til induksjon og magnetfelt kan en ikke lenger forholde seg til Ohms lov alene. Som tidligere nevnt (i del 2.2) så vet vi at spolen vil indusere en strøm på arbeidsstykket, den induserte strømmen vil da fungere som en ekstra motstand på spolen. Denne motstanden er bedre kjent som impedansen, Z [H]. Impedansen, er gitt av likning 6.5, hvor U er spenningen og I er strømmen. Likning 6.5 kan minne om Ohms's lov, forskjellen er at her tas det i tillegg hensyn til effekten av en induksjonsspole.

$$U = Z \times I \quad (6.5)$$

Impedansen kan i tilfeller ved ren induksjon gis ved likning 6.6, hvor induktansen L er gitt ved likning 6.7.

$$Z = j\omega LI \quad (6.6)$$

6.2.1. Induktans og kapasitans

En elektrisk komponent som motsetter seg enhver endring i en elektrisk strøm, kan kalles en induktor. Eller i dette tilfellet en induksjonsspole. Oppførselen til spolen vil være relatert til et magnetfelt. Kilden til dette feltet er en ladning i bevegelse, som i dette tilfelle er strømmen i ledere. Hvis strømmen endrer seg med tiden, vil dette medføre at magnetfeltet også endrer seg med tiden. Et magnetfelt som endres over tid induserer en spenning på samtlige ledere i dens felt. Induktansen, L , er relatert til den induserte spenningen på strømmen som følger av et slikt endrende magnetfelt.

$$L = \frac{\mu_0 K N^2 A}{l} \quad (6.7)$$

Her er μ_0 , vakuumpermeabiliteten [H/m], $K \approx 0.966$ Nagaoka koeffisienten [26], N er

antall spoler, A er tverrsnittsarealet på spolen, og l er lengden på spolen.

En kondensator er en elektrisk komponent som består av to separerte ledere. Oppførselen til kondensatoren er relatert til endringer i det elektriske feltet, hvor kilden til feltet er en separasjon av ladning, eller spenning. Hvis spenningen endrer seg over tid, så vil også det elektriske feltet endre seg over tid. Et elektrisk felt som endrer seg over tid skaper en forskyvning av strømmen innenfor feltet. Kapasitansen relaterer forskyvingsstrømmen til spenningen, hvor forskyvningsstrømmen er lik innføringsstrømmen ved kondensatoren. Kapasitansen er gitt ved likning 6.8

$$C = 2\pi fU \quad (6.8)$$

Her er f , frekvensen og U , spenningen over kondensatoren. Som følge av å ha en RLC-krets vil det oppstå en forskyvning av spenningen i forhold til strømmen. Denne forskyvningsvinkelen kalles Faseforskyvningsvinkel. Denne forskyvningen er illustrert i figur 6.4, hvor forskyvningsvinkelen er gitt ved ϕ . Faseforskyvningsvinkelen blir ofte gitt ved effektfaktoren, $\cos(\phi)$.

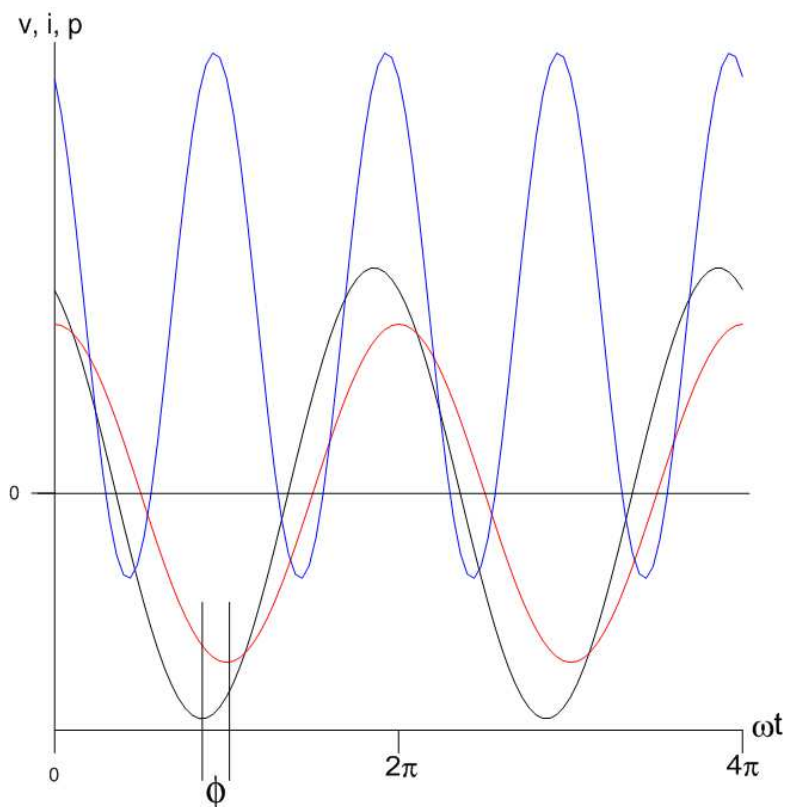
6.2.2. Momentan-, Gjennomsnitts-, Reaktiv- og Kompleks-effekt

Når en regner ut effekten ved hjelp av $p = ui$ finner en momentaneffekten. Denne effekten kan brytes ned videre for å få en bedre forståelse av de ulike fysikkens betydning. Momentaneffekten er gitt ved likning 6.9, som kan deles opp i Gjennomsnittseffekten P og den Reaktive-effekten Q .

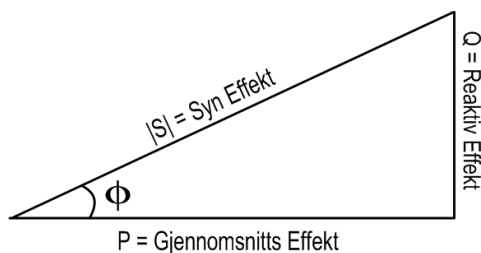
$$p = P + P\cos(2\omega t) - Q\sin(2\omega t) \quad (6.9)$$

Gjennomsnittseffekten blir ofte referert til som den "egentlige" effekten, fordi det er denne effekten som blir transformert fra elektrisk energi til ikke elektrisk energi (som oftest varme). Denne effekten er gitt ved likning 6.10. Hvis $\phi = 0^\circ$ (Strøm og spenning er i fase) vil dette si at momentaneffekten er lik gjennomsnittseffekten. Hvis $\phi = \pm 90^\circ$ vil det si at kretsen er rent induktiv ($\phi = +90^\circ$), eller rent kapasitiv ($\phi = -90^\circ$). Den reaktive effekten er gitt ved likning 6.11. Denne effekten blir lagret i enten det magnetiske eller elektriske feltet, og er den delen av p -kurven i figur 6.4 som er negativ.

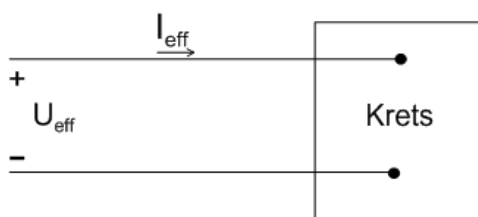
$$P = \frac{UI}{2} \cos(\phi) \quad (6.10)$$



Figur 6.4: Utvikling av momentaneffekt (blå), spenning (sort) og strøm (rød). Legg merke til spenningen som er ute av fase med ϕ radianer, og at effekten har dobbelt så stor frekvens som strømmen og spenningen (som en konsekvens av likning 6.9), og at den kan ha en negativ verdi. Figuren er laget i sammenheng med teorien fra [27].



Figur 6.5: Effekttrekanten



Figur 6.6: Strøm og spenningen nødvendig til simuleringen.

$$Q = \frac{UI}{2} \sin(\phi) \quad (6.11)$$

For å kunne oppnå en måte å beregne strømverdien (I_{eff}) som var nødvendig i simuleringen, så må en ta hensyn til alle disse ulike effekttypene. Dette kan bli gjort ved hjelp av den komplekse-effekten, S som er gitt i likning 6.12. Figur 6.5 viser effekttrekanten som illustrerer relasjonen mellom de ulike effektene og forskyvningsvinkelen. Denne relasjonen og likningene 6.13 og 6.14 muliggjør dette.[27, 1, 10].

$$S = P + jQ \quad (6.12)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.13)$$

$$S = U_{eff}I_{eff} \quad (6.14)$$

6.2.3. Valg av input-strøm i simuleringen

For å kunne finne strømmen I_{eff} var det nødvendig å oppdrive kapasitansen C for mellomfrekvensgeneratoren. Siden kondensatoren er en del av generatoren, er det ikke mulig å beregne denne. Derfor måtte produsenten, EFD Induction, kontaktes, [28]. I

dialog med produsenten ble det informert at denne konstanten var ikke loggført, men det fantes et omsetningsforhold som kunne tas i bruk til strømberegningen. Forholdet, $F = 2 \times 9 \times N$ skulle multipliseres med den observerte strømmen, $I_0 = 162[\text{A}]$ (N er antall vindinger på spolen). Dette resulterte i en strøm på: $I_{eff} = 2915[\text{A}]$. En mulig feilkilde i simuleringen kan være at siden den observerte strømmen, I_0 , som ble brukt som utgangspunkt i alle simuleringene, ble observert i slutten av eksperiment VIII. Strømmen ble under de resterende eksperimentene ikke registrert. Dette skyldes at det var ingen under utførelsen som var klar over at denne verdien ble gitt av mellomfrekvensgeneratoren, og at den eneste loggførte verdien av I_0 , ble oppdaget ved en tilfeldighet.

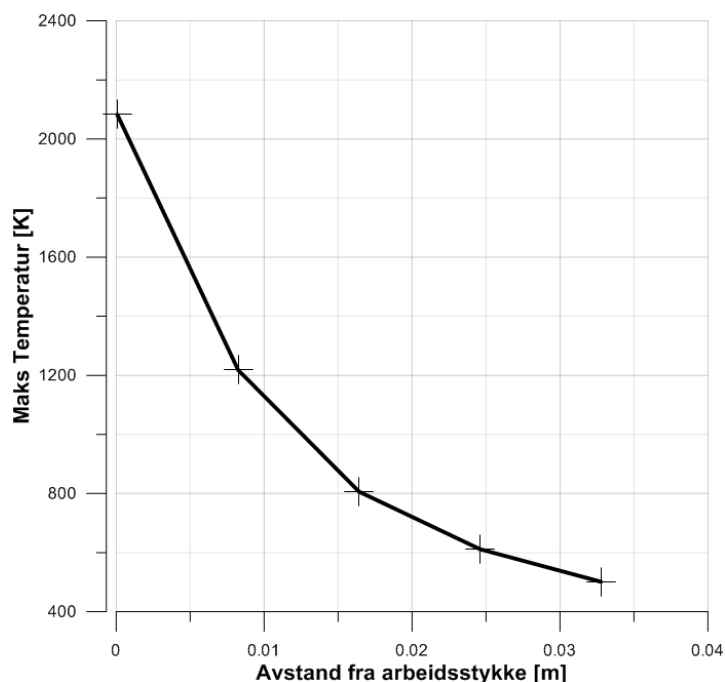
Det viste seg at en strømverdi på 2915 A resulterte i en større effekt enn forventet. Strømmen var 37% større enn det simuleringen gav. Ved å evaluere systemet på nytt ble det oppdaget to mulige grunner til den høyere effekten:

1. **Tap i kondensatoren:** Etter nok en konsultasjon med EFD Induksjon ble det oppklart at forholdet, F, gav strømmen før kondensatoren. Dermed vil det si at den påsatte effekten i simuleringen er uten kondensatortapet, og at det må tas hensyn til dette i simuleringene. Noen eksakt størrelse på dette tapet kunne EFD-representanten ikke anslå.
2. **Tap som følger av induktans i lederne:** Lederne vil ha et tap som følger av at de plasseres i nærheten av hverandre sine magnetfelt, men også på grunn av tap som oppstår ved at det finnes metaller i magnetfeltet. Dette feltet vil påføre metallet en strøm som igjen vil føre til en motstand i lederne.

Den endelige strømverdien ble derfor satt til 1837 A (63% av strømmen før kondensatoren), en verdi som resulterte i en simulering som var lik det som ble observert under forsøkene.

6.3. Endringen av parameterne

I denne delen vil det fokuseres på de forskjellige parameterne ved induksjonssveiseprosessen, og effekten av å endre på disse i håp om å få en bedre forståelse av deres betydning. De parameterne som det har blitt fokusert på er: spolens plassering (både i z- og r-retning), strømmen (og dermed effekten), frekvensen og spolens geometri. Parameterne ble funnet i Comsol ved å kjøre en "Parametric Sweep". Det betyr at Comsol kjører den samme simuleringen gjentatte ganger, hvor kun en gitt parameter endres mellom hver simulering. Antall simuleringer i en slik sweep blir referert til som antall steg, og vil føre til punktvis endringer.



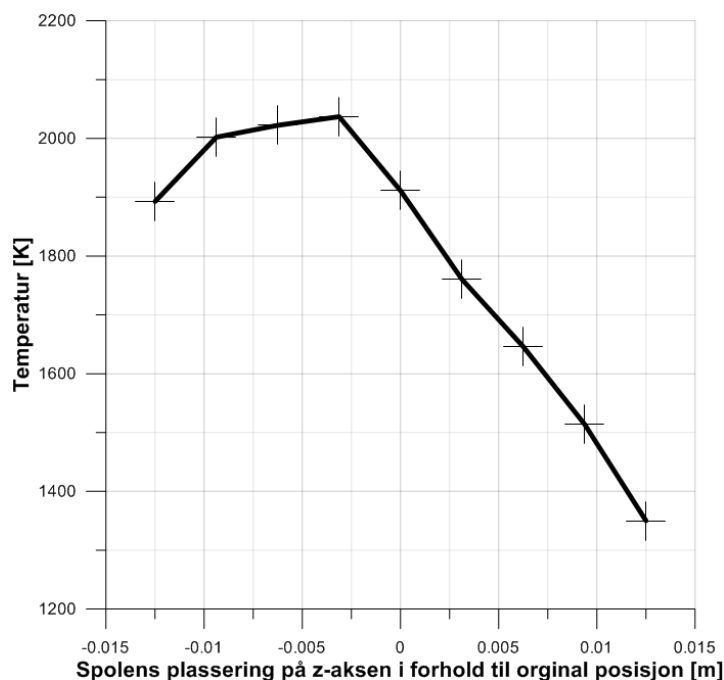
Figur 6.7: Makstemperaturen ved $t = 32$ s, som følger av en variasjon av spolens plassering langs r-aksen. Initial avstanden var på 3.2 mm.

6.3.1. Plassering av spolen

Riktig plassering av spolen er viktig fordi det er avgjørende for hvordan arbeidsstykket blir eksponert for magnetfeltet. Det ble derfor undersøkt virkningen av å variere spolens plassering langs z- og r-aksen.

Figur 6.7 viser resultatet av å endre spolens plassering langs r-aksen. Resultatet er fra fem forskjellige avstander fra arbeidsstykket, hvor det nærmeste punktet er 0.1 mm fra og det lengst borte er 32 mm i fra. Som det blir vist i figur 6.7 kan en se at makstemperaturen etter 32 sekund reduseres betraktelig etter som avstanden øker. Dette skjer på grunn av at arbeidsstykket plasseres lengre ut i magnetfeltet, og blir dermed mindre eksponert for den magnetiske fluksen. Samtidig vil den økte avstanden fordele magnetfeltet over større områder av arbeidsstykket, noe som vil føre til en jevnere oppvarming. Å øke avstanden mellom spolen og arbeidsstykket i r-retning vil altså føre til en dårligere lokal oppvarming, samtidig som det vil ta vesentlig lenger tid å nå ønsket temperatur.

Figur 6.8 viser resultatet av å endre på spolens posisjon langs z-aksen. Legg merke til at figuren viser gjennomsnittstemperaturen til ringen, og ikke maksimaltemperaturen. Den horisontale aksene viser endringen i posisjon ut i fra initial posisjonen (aksens nullpunkt). Siden det optimale er best mulig varmeoverføring til ringen (høyest mulig temperatur

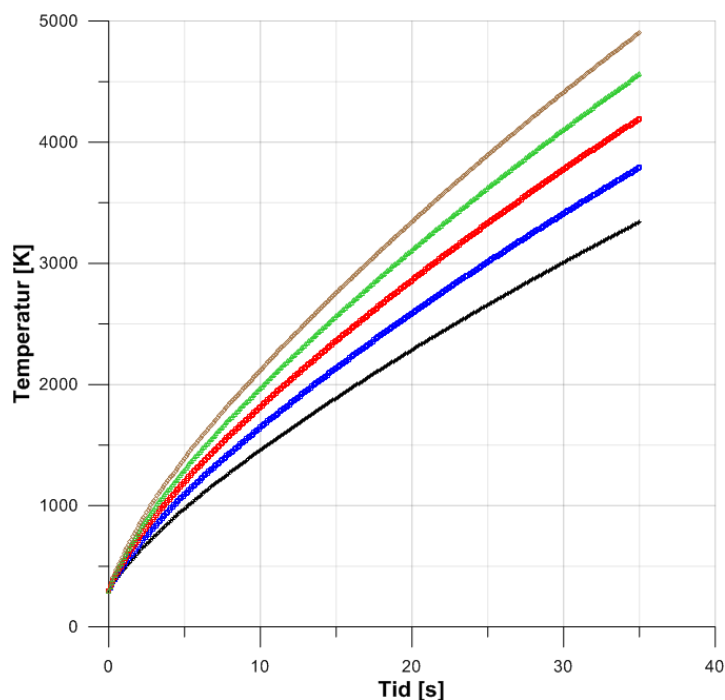


Figur 6.8: Gjennomsnittstemperaturen på ringen ved $t = 32\text{s}$, som følger av en variasjon av spolens plassering langs z-aksen.

på figuren), så ser det ut til at det kan lønne seg å flytte spolen ned opptil 10 mm. Men det som figuren ikke viser er at ved å senke spolen ned, vil det føre til at nedre del av arbeidsstykket (røret) vil bli utsatt for en større oppvarming enn den øvre delen av arbeidsstykket (toppen). Dette vil resultere i en ujevn sveis, noe som gjør det vanskeligere å oppnå en gasstett sveis. Figur 6.14 illustrerer sveisesonen ved $t = 27.3$ sekund, her kan en se at senteret på sveisesonen er noe høyere enn ønsket. Det kan derfor med bakgrunn i dette konkluderes med at å flytte spolen ned 1 til 2 mm vil kunne sentrere sveisesonen på et bedre punkt.

6.3.2. Frekvens

En endringen i frekvens kan, som nevnt tidligere, påvirke inntrengningsdybden i arbeidsstykket (del 3.1.1) og effekten (del 6.2). Figur 6.9 viser hvordan ulike frekvensene påvirker temperaturutviklingen over tid. Verdiene til denne figuren tar utgangspunkt i et punkt nær senteret på toppdelen av arbeidsstykket (se figur A.2). Dette punktet ble valgt for å undersøke betydningen av skin-effekten. En økende frekvens vil føre til en høyere påført effekt, men også en grunnere oppvarming. Fra figur 6.9 ser vi at selv om den økende frekvensen vil resultere i en grunnere oppvarming, så vil fortsatt den høyere påførte



Figur 6.9: Tid-Temperatur graf som viser temperaturutviklingen i senter av øvre del til arbeidsstykket, ved forskjellige frekvenser. Rød: $f = 8$ kHz, Grønn: $f = 10$ kHz, Brun: $f = 12$ kHz, Blå: $f = 14$ kHz, Sort: $f = 16$ kHz.

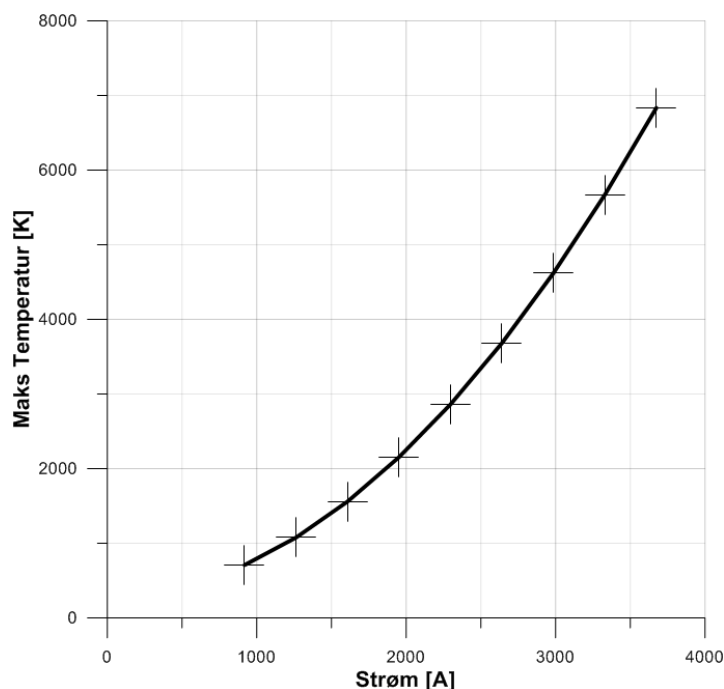
effekten føre til en hurtigere oppvarming. Ut i fra dette ser vi at selve skin-effekten vil ha lite å si på oppvarmingen av det tynne arbeidsstykket. Dette kan skyldes den høyere påførte effekten, samt den høye konduktiviteten til nikkel (90.9 W/m K) som gir en hurtig varmeoverføring gjennom arbeidsstykket.

6.3.3. Strøm

Fra tidligere vet vi at effekten er gitt av $P = UI = ZI^2$. Denne relasjonen vises i figur 6.10. Figuren gjengir ikke en helt eksponentiell graf, dette kan forklares ved at det er temperaturen og ikke effekten som vises, og ved at impedansen Z (og dermed også resistansen) er temperaturavhengige. Til tross for dette kan det konkluderes med at en økning av den påsatte strømmen vil føre til en enda større temperaturutvikling på arbeidsstykket.

6.3.4. Spolens geometri

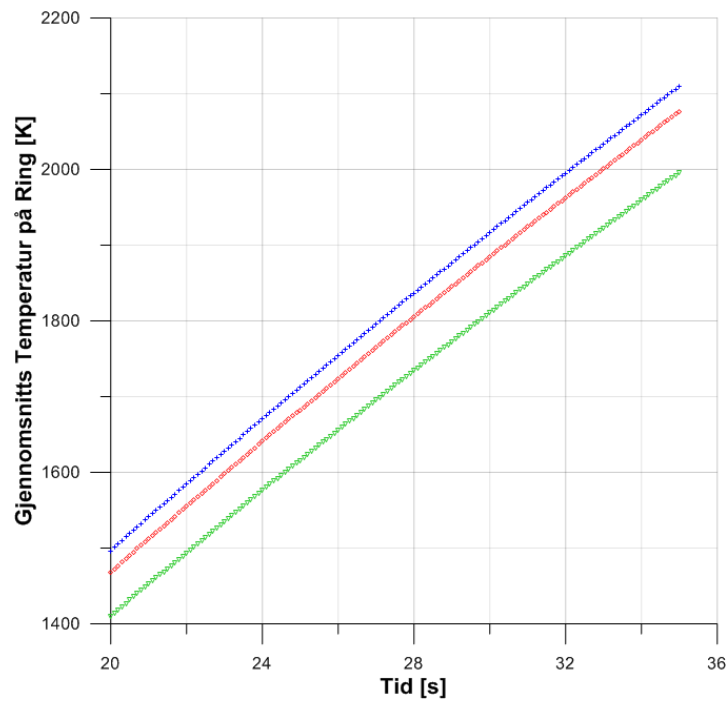
For å øke den lokale oppvarmingen av sveisesonen kan en løsning være å endre på spolens geometri. Det ble derfor sett på effekten av å endre spolens tverrsnittsgeometri.



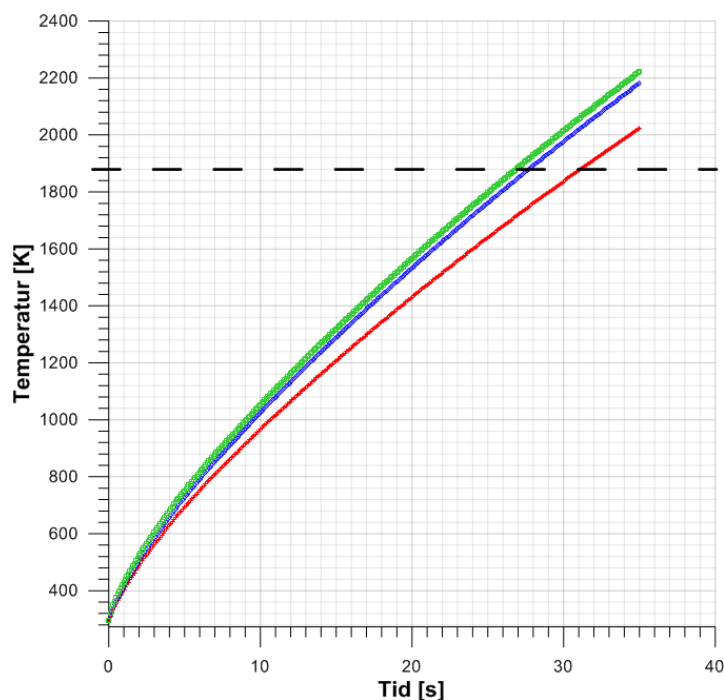
Figur 6.10: Figuren viser makstemperaturen som en funksjon av varierende strøm ved tidspunktet $t = 32s$.

Det sirkulære røret ble byttet ut med et firkantrør med bredde og høye lik diameteren til spolen (firkantrøret er også rotert 45° slik at ett av hjørnene peker inn mot sveisesonen). Figur 6.11 viser gjennomsnittstemperaturen over tid til ringen for både rør- og firkantrørgeometrien.

Ut i fra simuleringens dataene og figuren kan det se ut som om et firkantrør vil føre til en noe bedre varmeoverføring enn for et sylinderrør (ca 40°C ved $t = 32s$). Men denne økte varmeovergangen kan også skyldes at firkantrøret har en mindre avstand fra arbeidsstykket. Den reduserte avstanden kommer av firkantrørets diagonallengde ble lenger enn sylinderrørets diameter. Det ble derfor utført en ny simulering, hvor firkantrøret fikk en diagonallengde like rørdiameteren. Som vist i figuren så ser vi nå at den nye firkantede rørgeometrien førte til en redusert varmeoverføring til ringen. Selv om disse resultatene gir antydninger til at bruken av firkantgeometrien kan gi et bedre resultat, vil det ikke være mulig å si noe spesifikt om påvirkningen av å endre spolens geometri. For å avgjøre virkningene av å endre på spolens geometri må en ta hensyn til flere parametere: Vinkelen på firkantrøret i forhold til arbeidsstykket, tykkelsen på røret og hvor spiss den innvendige firkantgeometrien er. En forklaring av de forskjellige geometriene finnes i appendiks A. [13].



Figur 6.11: Tid temperatur graf for to forskjellige spolegeometrier. Temperaturen er gitt ved gjennomsnittstemperaturen til ringen. Blå: Firkanttrør med bredde lik rørdiameteren, Grønn: Firkanttrør med diagonal lik rørdiameteren, Rød: sirkulært rør. Tids-aksen viser kun tidene fra 20 til 36 sekund, dette pga. liten til ingen forskjell ved tidligere verdier.



Figur 6.12: Figuren viser gjennomsnittstemperaturen til ringen over tid. Rød: Ring med tykkelse lik rørtykkelsen, Blå: Original geometri, Grønn: Original tykkelse, men med radius slik at ringen ligger plant med arbeidsstykkets overflate. Den sorte stiplede linjen viser her smeltepunktet til nikkel.

6.3.5. Endring av lodderingens geometri

Geometrien på ringen er viktig for hvordan sveisen vil utvikle seg, og ble inkludert i forsøkene med den hensikten at ringen skulle smelte og legge seg som ekstra tetningsmaterieell mellom rørets innside og toppens bunn. Det ble her sett på utfallet av å endre på ringens geometri. Det ble gjort simuleringer hvor ringen hadde samme indre diameter, men en dobbel veggtykkelse (Rød graf i figur F). Dette førte til at ringen lå plant med arbeidsstykkets ytre areal. Den andre simuleringen ble utført hvor ringen fikk en økt radius (Grønn graf) slik at den også her lå plant med arbeidsstykkets ytre areal. Resultatet er vist i figur 6.12, og måltegninger av de forskjellige ringgeometriene finnes i appendiks F.

Med utgangspunkt i resultatet fra figuren, så ser det ut til at å øke ringens diameter vil føre til en økt varmeoverføring. Men det må også ta hensyn til hva ringens opprinnelige funksjon var. Ved å plassere ringen såpass langt ute på kanten av røret, kan dette føre til at ringen smelter og renner ned på utsiden av arbeidsstykket. Da vil ikke den tilsvarende mengden ende opp på innsiden av røret, slik som var den opprinnelige hensikten. Å øke

ringens tykkelse vil føre til at gjennomsnittstemperaturen ikke når smeltepunktet før 2 sekunder senere. Dette vil føre til at den resterende varmen får mer tid på å spre seg gjennom arbeidsstykket. For å kunne konkludere om hvilken geometrisk form som er optimal, så må en også ta hensyn til hvilken trykkraft som blir påført toppen på arbeidsstykket. Det er også viktig å ta hensyn til at ringen tillates såpass mye masse at denne vil smelte og renne ned forbi røret og inn i heatpipen.

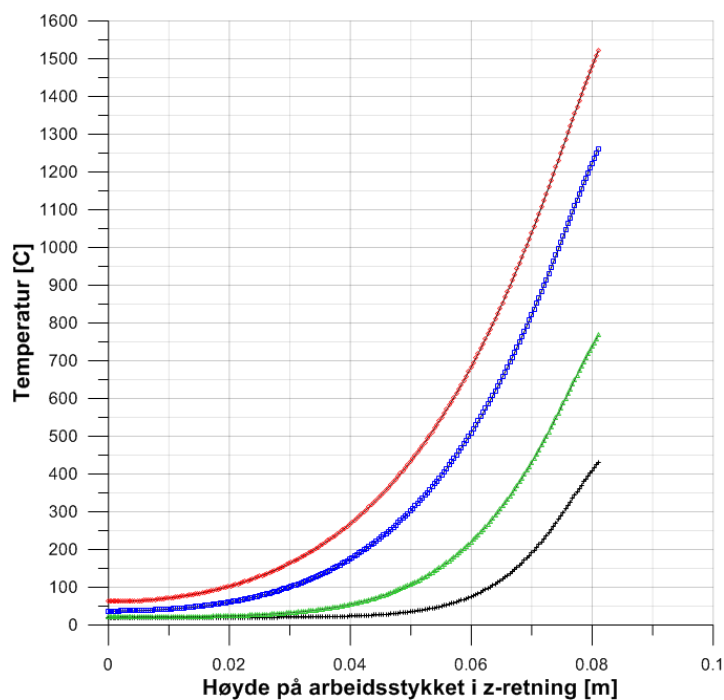
6.3.6. Endring av arbeidsstykkets toppgeometri

Arbeidsstykkets toppgeometri ved første eksperiment av testrigg 1 var av en enklere geometri. Toppen bestod av en hel sylinder av samme diameter som rørets ytterdiameter, samt med en liten tapp som passet inn i røret. Under eksperiment I ble det oppdaget at denne utformingen førte til en mye hurtigere oppvarming av røret enn toppen. Det ble derfor foretatt en endring i toppgeometrien for å jevne ut oppvarmingen. Dette ble gjort ved å fjerne en del av massen til toppen, noe som også resulterte i et større overflateareal (se figur 5.1). Resultatet fra simuleringen vises best i figur 6.14 og 6.15, som illustrerer sveisesonen ved et bestemt tidspunkt. Resultatet viser at sveisesonen er, som nevnt tidligere, noe høyere enn ønsket. Og en kan se at den enkle geometrien fører til en mye grunnere oppvarming enn den nyere geometrien.

6.3.7. Temperaturen ved innspenningspunktet

Under simuleringen av sveiseprosessen ble det også sett på hvordan temperaturen utviklet seg langs overflaten til rørdelen av arbeidsstykket. Dette ble gjort for å få kunnskap om temperaturutviklingen i røret, og for å en viss anelse om hvilken temperatur som kan oppstå ved oppspenningspunktet. Figur 6.13 viser temperaturen langs røret ved forskjellige tider.

Den horisontaleaksen på figuren tar utgangspunkt i simuleringens koordinatsystem hvor toppunktet på røret har en verdi på 86 mm. Hvis en ønsker å ha en mindre høyde på røret kan en trekke den nye verdien fra 86 mm, dette vil gi det nye nullpunktet. Innfestningstemperaturen på et rør med høyde på 66 mm vil dermed være temperaturen ved $(86-60) = 20$ mm. Denne temperaturen er, ut i fra figuren, rett over $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ved $t = 32$ s.

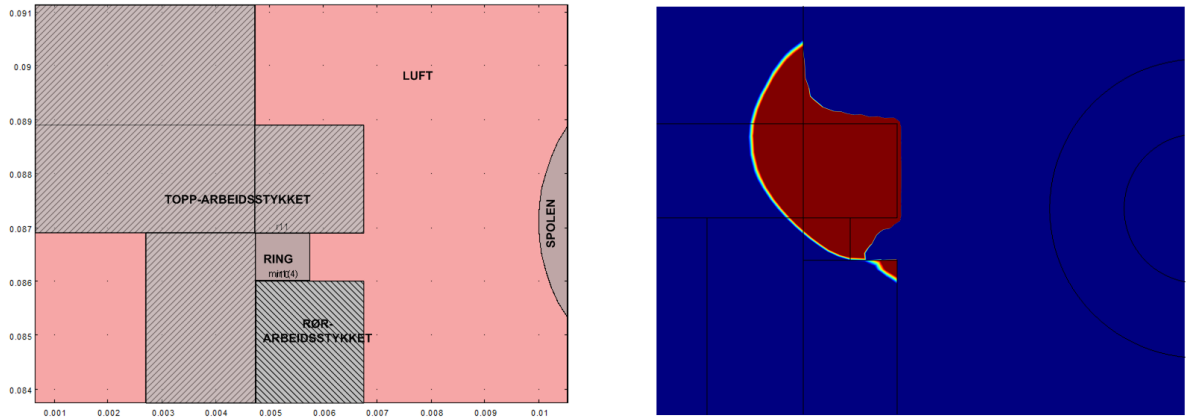


Figur 6.13: Figuren viser hvordan temperaturen utvikler seg langs overflaten til røret ved tidene: $t = 6$ (sort), 13 (Grønn), 25 (Blå) og 32 (Rød) sekund.

6.4. Mulige feilkilder i modellen

Som alle numeriske beregninger så vil simuleringen kun være en forenklet modell av det reelle tilfellet. Mulige feilkilder kan derfor være:

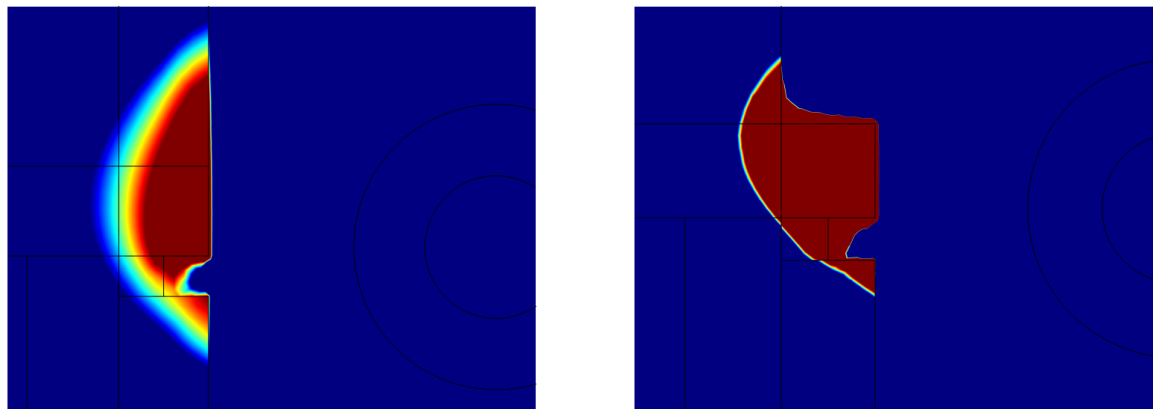
- **Materialet:** Materialet i Comsol er av nikkell, med like verdier som er angitt for Nikkel 201. Noen verdier var ikke oppgitt til noen av disse to, slik som magnetisk permittivitet og permeabilitet. Dette kan føre til at disse ble angitt med noe feil i verdiene i forhold til det som var tilfellet ved forsøkene. En annen feilkilde relatert til materialet er at simuleringene antar en ren isentropisk oppbygning uten sprekker eller urenheter. Dette kan som det ble vist i litteraturstudiet føre til endringer i c_p -verdien rundt curie-punktet.
- **Kjøling av spolen:** Kjølingen av spolen ble simulert ved bruk av en veldig høy c_p -verdi for vannet i spolen. Dette fører til at kjølingen i spolen ikke kan brukes foruten å se på hvordan trenden på varmedannelsen endrer på seg i løpet av sveiseprosessen.
- **På satt strøm:** Siden det ikke var mulig å beregne den påsatte strømmen på spolen (pga. kondensatoren, se del 6.2), så ble det valgt å sette ned strømmen



Figur 6.14: Figuren til venstre viser det geometriske oppsettet ved sveisesonen. Figuren til høyre viser sveisesonen etter 27.3 sekund. Det blå feltet indikerer området som er under smeltetemperaturen, mens det røde feltet er det området som er over smeltetemperaturen.

i simuleringen med 37%. Denne reduksjonen ble satt med en antagelse om at modellen var riktig.

- Termisk resistivitet ved kontaktflatene:** De første simuleringene ble gjort uten å ta hensyn til at det fantes en termisk resistivitet mellom kontaktflatene på modellen. De aktuelle flatene her var øvre og nedre flate på ringen, samt de korresponderende flatene til toppen og røret. I disse simuleringene ble det antatt at det var en perfekt kontaktflate mellom de tre delene og derfor at det ikke var nødvendig å ta hensyn til dette. Effekten av å inkludere en kontaktflatemotstand er diskutert i nedenfor.



Figur 6.15: Figuren til venstre viser sveisesonen for en enkel toppgeometri ved tidspunkt $t = 27.3s$. Figuren til høyre viser sveisesonen med kontaktflatebetingelser, $t = 27.3s$.

6.4.1. Termisk motstand ved kontaktflatene

Den termiske konduktiviteten ble beregnet ved hjelp av korrelasjoner gitt i [29] del 2.4.6. Verdiene som ble brukt i beregningene er gitt i tabell 6.2 og vist i Maple-regnearket i appendiks C.

Beregningen resulterte i en konduktivitet på $k = 0.000001739$ W/m K. Denne verdien ble så brukt i sammenheng med Comsol sin *Thin thermally resistant layer* funksjon, hvor det kreves en konduktivitet (k) og en lengde mellom flatene (l). Det viste seg at simuleringen gav et noe uventet svar. Resultatet gav inntrykk av at denne begrensningen av varmeoverføringen (pga. en lav konduktivitet) resulterte i en mye hurtigere varmeoverføring fra toppen til ringen. Dette var et veldig uventet resultat, så det ble derfor bestemt at det skulle undersøkes ved å sammenlikne denne funksjonen med en modell hvor funksjonen blir byttet ut med en geometri som har samme lengde, tykkelse og konduktivitet som blir oppgitt i thin-layer funksjonen.

Meyer Hardness	2×10^3 MPa
Lengden på gapet mellom flatene (l)	0.04 mm
Konduktiviteten til luft	0.02 W/m K
Indre diameter på ring	9.5 mm
Ytre diameter på ring	13.5 mm
Massen til toppen	10 g

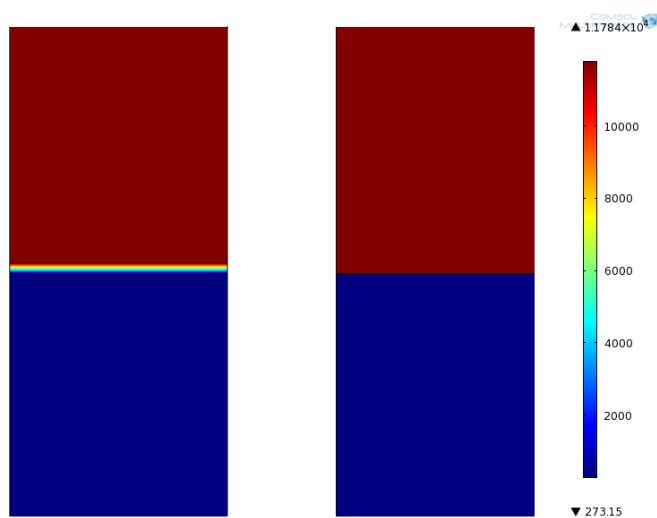
Tabell 6.2: Verdier brukt i beregning av kontaktmotstanden

Figur 6.16 viser resultatet av sammenlikningen. Begge modellene her har blitt påsatt den samme varmeffluksen, q , på toppen og har en konstant temperatur i bunnen. Resultatet viser at denne funksjonen fungerer godt ved store geometrier, hvor lengden l er mye mindre enn geometrien rundt. Dette er ikke tilfellet ved modellen brukt i oppgaven, hvor høyden på ringen er 0.9 mm. Dette kan derfor muligens være en del av forklaringen på hvorfor thin-layer funksjonen ikke ser til å fungere som ventet og gir en mye bråere overgang mellom overflatene.

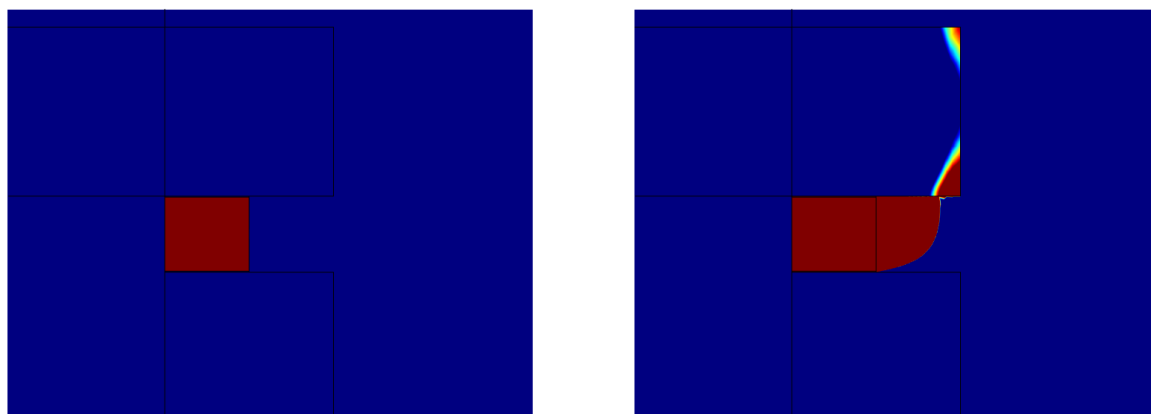
For videre å undersøke om kontaktflatene fikk noen betydning for oppvarmingen ble modellen modifisert ved at det ble lagt til et lag over og under ringen. Lagene bestod av samme materiale som ringen (nikkel), men med en konduktivitet lik den beregnet her (k). Det ble også satt inn en termisk isolasjon mellom overflaten til toppen som er i kontakt med innsiden av røret. Dette ble gjort siden det er antatt at disse flatene har en så dårlig kontaktflate at den kan antas isolert. Det viste seg at å bruke nikkel som materiale til lagene var lite gunstig siden disse da ble magnetisk ledende. Dette førte til at de fikk en unaturlig rask oppvarming som ikke samsvarte med eksperimentene. Det ble derfor valgt å bytte materiale fra nikkel til luft, noe som gav mer realistiske resultater.

Denne endringen gav en mer synlig forandring i varmeutviklingen. Figur 6.17 viser et 2D snitt av temperaturprofilen rundt ringen ved $t = 12.3$ sekund, her kan en se at ringen får en mye større oppvarming som følger av stor eksponering for magnetfeltet, lavt masse/overflateareal-forhold samt den nå inkluderte kontaktmotstanden. (Figur 6.14 viser hvordan varmeutviklingen var uten kontaktflatebetingelser). At ringen skulle varmes opp først var hensikten med å inkludere ringen. Filmen som ble tatt under eksperiment IV viser en varmedannelse mellom toppen og røret før det vises noen annen indikasjon på varmedannelse. Filmen forsterker derfor konklusjonen med at ringen vil smelte før de resterende delene. Figur 6.17 viser sveisesonen på arbeidsstykket ved tidene $t = 12.3$ s, og $t = 28,5$ sekund. Her kan en konkludere med at en inkludering av kontaktflatebetingelsene har en betydning for varmedannelsen, og at ringen vil mest sannsynlig ha den funksjonen den var påtenkt.

Betingelsene for kontaktflatene (Geometrisk basert, ikke thin-layer) ble dermed inkludert i resterende simuleringer som ble utført i del 6, for å kontrollere om de ville endres ettersom den var en endring i varmefordeling. Det viste seg at en inkludering av disse betingelsene ikke hadde noen særlig innvirkning på resultatene gitt i del 6, (endringene var noen få grader). Derfor kan det konkluderes med at en usikkerhet fra denne delen ikke var av særlig betydning.



Figur 6.16: Comsol modell for kontroll av thin-layer funksjon. Figuren til venstre viser modellen hvor det er lagt til en ekstra geometri. Figuren til høyre viser modellen som bruker thin-layer funksjonen.



Figur 6.17: Figuren til venstre viser sveisesonen ved $t = 12.3$ s. Figuren til høyre viser sveisesonen ved $t = 28.5$ s.

7. Induksjonsspole i høyvakuumkammer

Under siste designfase av forsøksrigg 2, ble det oppdaget tre nye problemstillinger. Dette var problemer som er relatert til implementeringen av induksjonsspolen i vakuumkammeret. Det vil derfor her bli sett nærmere på disse problemstillingene og eventuelle løsninger.

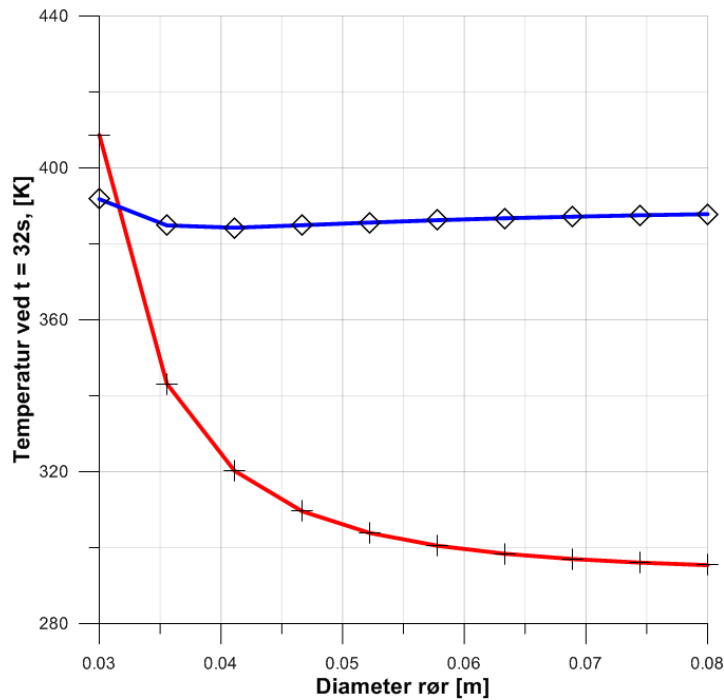
Også i denne modellen ble den påsatte kjølingen gjennom spolen simulert i Comsol ved å øke c_p -verdien til vannet. Dett førte til en kjøling av lederne, men det er ikke mulig å vite hva den egentlige temperaturen var ut i fra de tilgjengelige måledataene. Temperaturutviklingen til lederne ved varierende parametere som illustreres i denne delen vil derfor være ufullstendige. Men det vil fortsatt være mulig å trekke konklusjoner ut i fra hvordan temperaturen endrer seg ved de varierende parametere. Figur A.3 viser geometrien som ble brukt i simuleringene.

7.1. Diameteren på røret

Diameteren på røret rundt spolene er essensiell når det skal tas hensyn til effekttap fra generatoren til spolen, dette på grunn av at induktansen i systemet øker etter hvor mye av magnetfeltet til spolen/lederne blir forstyrret. Rør med liten indre diameter vil derfor forstyrre mer av magnetfeltet enn et rør med større indre diameter. Et effekttap kan ikke nødvendigvis løses ved å øke generatorens output effekt, siden dette kan føre til en endring i frekvens og økt oppvarming av røret (som har en maks temperatur for hva det kan tåle). Figur 7.1 viser hva temperaturen på røret vil være (ved $t = 32s$) ved forskjellige diametere. Ut i fra denne 2D analysen kan det se ut som om en diameter større enn 40 mm vil være nok til å holde temperaturen under 320 Kelvin. Dette ansees som en liten temperaturøkning.

7.2. Avstanden mellom lederne

Avstanden mellom spolene vil også kunne påvirke graden av oppvarming av både røret og lederne. Kommer lederne for nært hverandre vil det føre til at de blir utsatt for en større magnetisk fluks og dermed en større oppvarming. Dette gjelder også hvis lederne kommer for nært røret, da vil det induseres strøm i røret som vil virke som en motstand og dermed generere varme. Dette kan observeres i figur 7.2, hvor en kan se at røret blir varmere desto større avstanden mellom lederne blir, og at lederne blir varme i nærheten av hverandre og røret. Det vi ser da er at en avstand i området mellom 15 og 20 mm vil



Figur 7.1: Rør- og spole-temperatur ved varierende ytre diameter. $t = 32s$. Blå: Maks-temperaturen på lederne², Rød: makstemperaturen på røret.

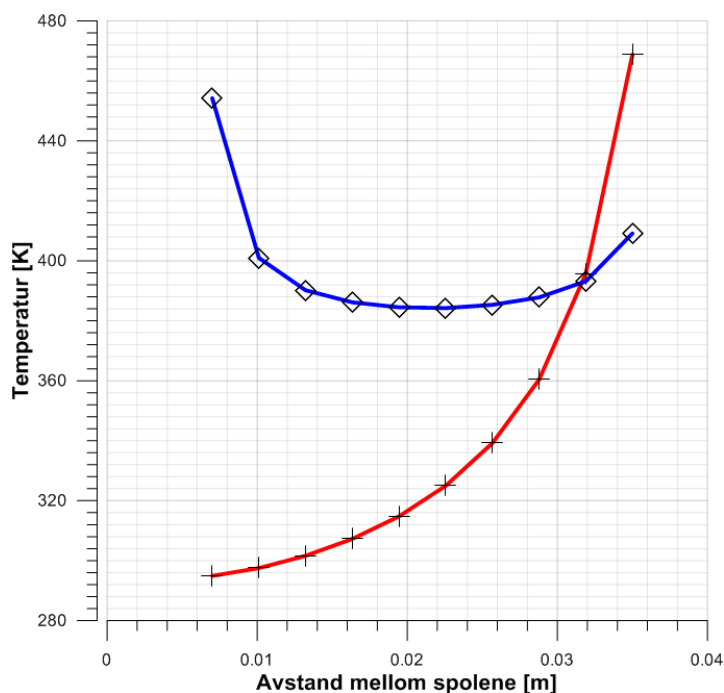
føre til en liten oppvarming av røret ($T < 50^{\circ}C$), samt en lavest mulig oppvarming av lederne.

7.3. Endring av frekvens

Som nevnt tidligere er frekvensen essensiell når det er snakk om strømmen som blir overført til spolen, effekttap og oppvarming gjennom induksjon. Et av problemene her var hvordan frekvensen ville endre seg ved at mengden av magnetisk ledende materiell i magnetfeltet endret seg fra rigg 1 til rigg 2. Dette betyr at diameteren på røret og spoleplasseringen også vil ha en innvirkning på frekvensen. Reduseres diameteren på røret, reduseres frekvensen gitt av generatoren, fordi en større del av magnetfeltet blir forstyrret. Det må også tas hensyn til avstanden mellom lederne, en for stor avstand vil føre til at røret kommer for nært lederne, mens en for liten avstand fører til at lederne forstyrrer hverandres magnetfelt. Ved små diameterer slik som på røret, vil avstanden mellom spolene ha en liten frekvensendring i forhold til endringen i diameteren på røret.

Under eksperimentene utført i forsøksrigg 1, ble frekvensen satt automatisk av gene-

²Temperaturen til lederne som ble simulert i Comsol baserer seg på en annen nedkjøling enn den brukt under forsøkene.



Figur 7.2: Makstemperaturene til røret og spolene, ved varierende avstand mellom lederne. Rød: Makstemperaturen til røret. Blå: Makstemperaturen til lederne².

ratoren til 12 kHz. Ved en større motstand på lederne, slik som vi så i eksperiment I, ble frekvensen registrert med en verdi på 11 kHz (nært generatorens minstefrekvens, 10 kHz). I dialog med EFD-Induction ble det gjort oppmerksomt på at generatoren ikke vil ha mulighet til å gå lenger ned enn generatorens minstefrekvens, og at den ved en økning i motstand dermed vil redusere strømmen i spolen. Det var ikke mulig å kompensere for dette ved å øke generatorens effekt.

Det vil altså si at hvis forsøksrigg 2 blir dimensjonert slik at generatoren får en for lav frekvens, så vil det ikke være mulig å utføre nye eksperimenter ved ønsket effekt. Dette vil føre til at sveiseprosessen vil ta lenger tid og dermed føre til en jevnere varmfordeling utover arbeidsstykket.

Løsningen på frekvensproblemet var å bruke en RF-Feedthrough gjennomgang fra Caburn (se appendiks F) kombinert med en reduksjon av den metalliske motstanden. Gjennomgangen er designet for blant annet induksjon i vakuum. Den har to hule kobber-rør, som kan lede avkjølingsvæske gjennom lederne og til spolen, som igjen er omkranset av en flens. Flensen består av et materiale med høy termiskkonduktivitet men med lav magnetisk ledningsevne. Den metalliske motstanden ble redusert ved at røret, som går fra gjennomgangen til selve vakuumkammeret, ble redusert i lengde samt at diameteren

ble økt.

8. Forsøksrigg 2

I denne delen presenteres de parameterne som det antas å passe best til forsøksrigg 2. Anbefalingene baserer seg både på resultatene som er oppnådd gjennom eksperimentene utført i forsøksrigg 1, samt de numeriske analysene. Valget av parameterne ble gjort med fokus på å utføre sveisingen så lik som eksperiment IV i forsøksrigg 1 som mulig. Det har derfor ikke blitt eksperimentert med parametere som avviker stort fra dette eksperimentet.

8.1. Generator innstillinger

En av de største forskjellene mellom forsøk 1 og 2 er at det ved forsøk 2 ikke vil være mulig å styre effekten ved hjelp av loggemodulen. Modulen kan ikke brukes fordi den krever en gjennomgang til et termoelement i trykkbeholderen, som igjen vil gjøre det vanskeligere å oppnå et høy-vakuum. Derfor må effekten i forsøksrigg 2 styres manuelt, som gjøres ved å skru av og på generatoren. Sveiseprosessen vil da bli styrt av tiden og ikke lenger temperaturen. Dette vil fjerne usikkerheten relatert til plasseringen av TC (som usikkerheten observert mellom eksperiment III og IV), og dermed vil to parametere (Plassering av TC og makstemperatur) blir redusert til en parameter (tiden).

På grunn av måten generatoren er laget, vil det ikke være mulig å kunne endre på frekvensen manuelt, [28]. Den vil bli fastsatt ut i fra ønsket effekt og motstanden ut fra generatoren til spolen. Som nevnt i del 7, er det mulig at generatoren ikke kan oppnå ønsket frekvens til fastsatt effekt. En for lav frekvens kan løses på tre måter:

- **Endre på spoleinngangen på forsøksrigg 2:** Dette har det, som nevnt i del 7, blitt tatt hensyn til. Men siden forbedringene på riggen ikke har blitt testet, er det fortsatt en mulighet for at selv en liten endring i geometrien skal kunne forårsake en endring i frekvensen. Ved en for lav frekvens vil en løsning være å endre geometrien på ny. Dette vil mest sannsynlig kreve en endring av store deler av riggen, og er derfor en lite attraktiv løsning.
- **Endre på senteravstanden mellom lederne:** Ved modifikasjonen av forsøksrigg 1 (mellom eksperiment I og II) ble det observert en endring i frekvensen. Denne endringen ble forklart med utgangspunkt i den nye avstanden mellom lederne og

skroget til trykkbeholderen. Men en endring av ledernes plassering i forhold til hverandre vil også kunne påvirke frekvensen, men da med en mindre betydning enn ved å endre på avstanden til skroget. Derfor kan en endring av denne avstanden være et hjelpemiddel til å øke frekvensen.

- **Ny generator:** Et alternativ er også å bytte generator. En god erstatning vil da være en nyere versjon av Minac 50, som klarer frekvenser ned til 7kHz og er mindre, og dermed lettere å transportere. Å bytte generator vil mest sannsynlig føre til økte kostnader. Det må da også tas hensyn til at dette kan igjen føre til en forlenging av forsøket som følger av leveringstid og behovet for å stille inn sveiseoppsettet på nytt.

Grunnet usikkerhetene ved effekten av å endre avstanden, samt tids og kostnads konsekvenser ved de to andre alternativene, så anbefales det derfor å bruke en påsatt effekt lik den ved forsøksrigg 1. Det vil si, 30% av tilgjengelig effekt, som tilsvare 18500 W. Med utgangspunkt i denne effekten vil derfor en rimelig tid for selve sveiseprosessen være rundt $t = 30s$.

8.2. Utforming av spolen

Endring av spolegeometrien er også et alternativ. I følge litteraturen [10, 13] skal en firkantspole gi et mer sentrert magnetfelt, men med utgangspunkt i simuleringene var dette vanskelig å bekrefte. Dette kommer av at det er flere parametere som endres samtidig med en endring av geometrien. Dette er endringer som utformingen på rørveggen, orienteringen av hjørnene og lengdene på røret. Det er også viktig å ta hensyn til hvor nært spolen kan plasseres arbeidsstykket. Den mest gunstige plasseringen er så nært arbeidsstykket som mulig, men den kan ikke plasseres for nært. Dette fordi magnetfeltet kan føre til endringer i plasseringen av arbeidsstykket og spolen i forhold til hverandre, og dermed risikere at de kommer i kontakt. Toppolderen kan også ha noe å si for plasseringen av spolen siden denne kan i løpet av sveiseprosessen presse ned toppen slik at den dyttes i radiell retning. Dette ble observert under eksperimentene ved forsøksrigg 1, og kan ved en påsatt trykkraft føre til uønsket kontakt mellom spolen og arbeidsstykket. Siden det har blitt fokusert lite på en alternativ geometrisk utforming på spoletverrsnittet så anbefales det å velge sirkulærrør. Dette fordi det er en geometri som det er vist at fungerer og dermed er det ikke behov for å se på denne geometrien videre. Den optimale høyden vil være som i forsøksrigg 1, hvor L_s var 15.1 mm med ring og 14.2 mm uten ring. Denne plasseringen bør være god nok, men siden det i forøksrigg 2 vil

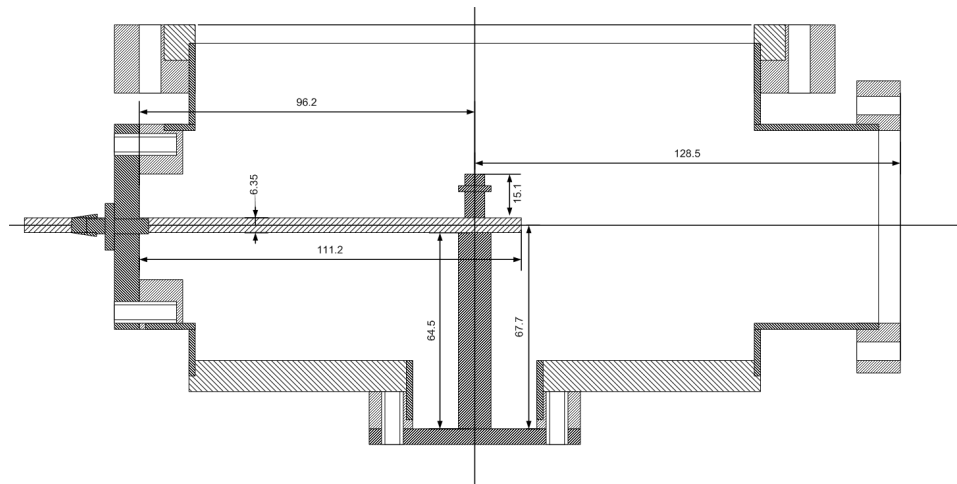
bli endret noe på rørlengden så kan det hende at L_s kan endres noe for å optimalisere oppvarmingen. Med bakgrunn i simuleringene vil dette mest sannsynlig oppnås ved å øke lengden på L_s .

I etterkant av sveiseprosessen ble det ved flere av eksperimentene observert sotdannelse på spolen. Siden det ikke ble observert sot på arbeidsstykket ble det antatt at soten oppsto som følger av en høy temperatur på spolen og at den dermed skilte ut urenheter. En slik utskilling krever en høy temperatur, noe som betyr at kjølevannet vil oppnå temperaturer over kokepunktet. Er dette tilfellet, så kan det hende at det oppstår kavitasjon i spolen, dermed må kjølesystemet revurderes ved gjentatt bruk av samme spole. Løsningen på dannelsen av urenheter er å ta i bruk et oksygenfritt kobberør, som vil hindre sotdannelsen, men vil ikke ha noen redusert effekt på temperaturen.

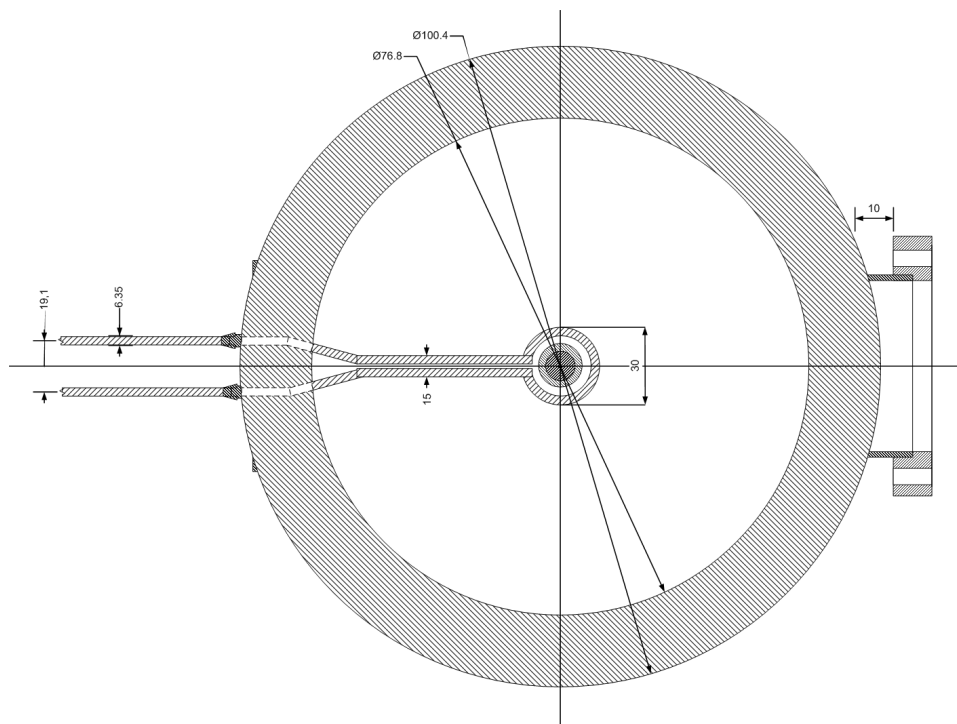
Det ble i simuleringen vist at det var optimalt å få lederne til spolen så nært hverandre som mulig på vei inn i trykkbeholderen. Dette for å redusere oppvarmingen av trykkbeholderen så mye som mulig. Ved å plassere to ledere nært hverandre så vil det oppstå en kraft mellom lederne som kan føre til vibrasjoner. Dette kan ved behov kontrolleres ved å plassere en plastbit eller ett ikke magnetisk-metall mellom lederne. Ved å bruke den ikke magnetisk-ledende overgangen (fra Caburn) inn i trykkbeholderen, vil denne redusere motstanden og dermed varmedannelsen.

Figur 8.1 og 8.2 viser spolen og arbeidsstykkets anbefalte plassering i trykkbeholderen. Her kan en se at lederne til spolen har en senteravstand på 19.1 mm fra generatoren og inn i trykkbeholderen. Inne i trykkbeholderen må senteravstanden reduseres for å kunne sikres at spolen dekker mest mulig rundt arbeidsstykket. Senteravstanden bør derfor reduseres til 8.7 mm (15mm - 1/4"). Som nevnt ovenfor kan denne avstanden påvirke frekvensen, og det kan derfor være nødvendig å endre på denne. Dette vil ikke påvirke noen andre faktorer ved forsøket, så lenge avstanden ikke økes mer enn 19.1 mm.

Hvis det viser seg at oppvarmingen er god ved den samme høyden (i forhold til arbeidsstykket) som ved forsøksrigg 1, og det er et begrenset antall forsøk som skal utføres ved forsøksrigg 2 så anbefales det å fokusere på effekt- og tidsinnstillinger.



Figur 8.1: Plassering av spole og arbeidsstykket i trykkbeholderen sett fra siden. En større og mer beskrivende versjon finnes i appendiks F.



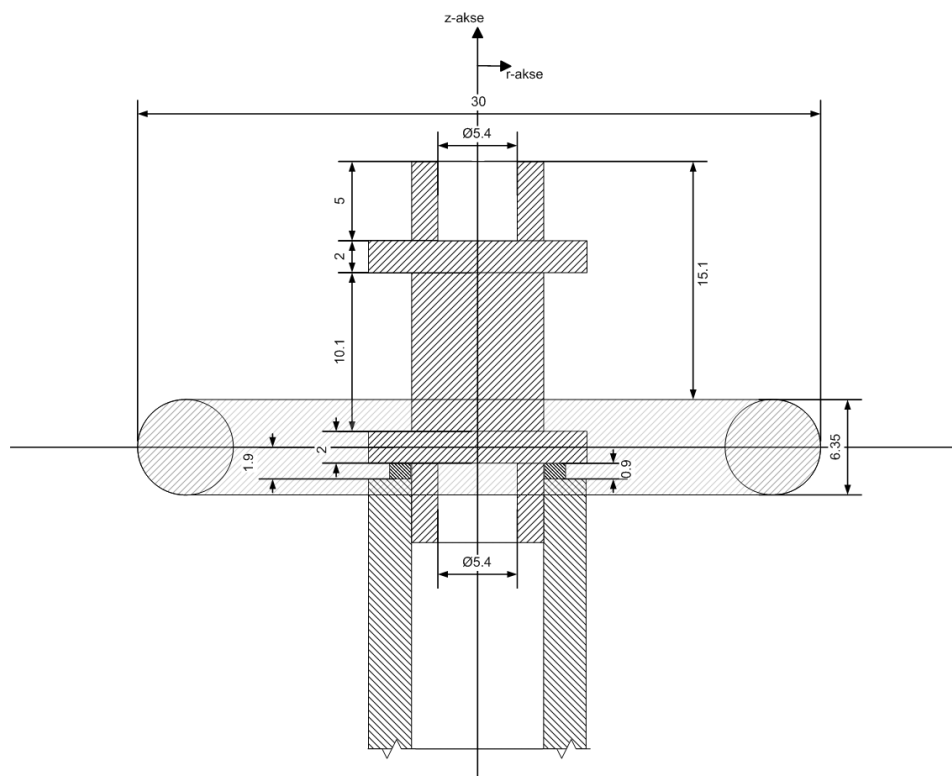
Figur 8.2: Plassering av spole og arbeidsstykket i trykkbeholder sett oven ifra. En større og mer beskrivende versjon finnes i appendiks F.

8.3. Arbeidsstykket

Før starten av eksperimentene ved forsøksrigg 1 var det, på grunn av begrensning på tilgjengelig nikkel, bestemt at det ikke skulle endres på arbeidsstykkets geometri. Men som nevnt tidligere ble den allikevel endret på grunn av den ujevne varmfordelingen. Det ble ikke utført noen beregninger på hvordan den optimale geometrien på toppen skulle være, den nye geometrien var et resultat av behovet til å fjerne så mye som mulig av massen uten at det skulle ødelegge for sveiseprosessen. Siden det ikke har blitt gjort noen videre eksperiment basert på en alternativ topp-geometri, så anbefales det å overføre denne kjente geometrien til forsøksrigg 2. Toppene har en geometri som gjør det mulig å bruke begge sider av toppen, og ble laget slik for å redusere nikkel behovet. Derfor kan det være mulig å redusere/forbedre geometrien enda mer for å få et bedre masse/overflateareal forhold enn tidligere. En slik endring vil kunne påvirke parametere som sveisetiden og varmfordelingen i både r- og z-retning. Det anbefales derfor ikke å endre denne geometrien for å redusere antall nødvendige innstillingsforsøk ved forsøksrigg 2. Et annet heldig utfall av å endre geometrien til toppen var betydningen av flensen på den nye geometrien. Denne ble varmet opp mye hurtigere enn resterende deler av toppen, og det ble i filmene fra forsøksrigg 1 observert at når flensen smeltet så dannet den ett jevnt lag av nikkel over sveisesonen. Dette vil ikke være mulig ved den første geometrien, som mest sannsynlig ville føre til at smeltet nikkel ville renne ned langs arbeidsstykket.

Arbeidsstykket i forsøksrigg 2 vil ha en annen festeutforming enn ved forsøksrigg 1. I den nye riggen kommer arbeidsstykket til å ha en flens som festes direkte inn i trykkbeholderen (se figur 8.1). Dette fører til at det ikke vil være mulig å stille inn høyden på arbeidsstykket, og siden spolen også vil ha et ikke justerbart festepunkt, vil det være liten eller ingen mulighet til å endre på spolens plassering i forhold til arbeidsstykket. Det kreves derfor stor nøyaktighet i plassering av spolen og lengden til røret på arbeidsstykket. Det må også tas hensyn til at det må bestilles et likt antall flenser som arbeidsstykker, ettersom arbeidsstykket må sveises fast til flensen før forsøket.

Med utgangspunkt i eksperimentene, kan en konkludere med at det var de forsøkene som ble utført med ring som gav det beste resultatet. Dette samsvarer også med simuleringsresultatene vist i del 6, hvor en kan se en mer lokalisert oppvarming. Bruk av ringen kan ved høy effekt eller for lang sveisetid føre til at ringen smelter til den grad at den renner ned gjennom røret, noe som ikke skal forekomme. Geometrien på ringen bør med bakgrunn i dette også ha den samme geometrien, slik at den ikke fører til at for mye av nikkelet smelter og fører til dette.



Figur 8.3: Figuren viser en mål for plassering av spolen i forhold til arbeidsstykket. Det hvite skraverte området er spolen.

Figur 8.3 viser hvordan plasseringen av arbeidsstykket (rør, topp og ring) bør være. Legg merke til at rør-delen av arbeidsstykket ikke går helt opp til senterlinjen (sort horisontal linje). Denne linjen er satt som senter på spolen. Derfor, som vist i figuren, vil ikke røret ha den fulle lengden opp til senterlinjen (67.7 mm). Røret vil ha en lengde på 65.8 mm fra flensen. For en mer detaljerte tegninger se appendiks F.

8.4. Annet

Fra eksperimentene ble det observert at nedtrykkskraften kunne ha en betydning for kvaliteten på sveisen. Det vil derfor være gunstig om toppholderen til forsøksrigg 2 utfører den samme trykkraften som fjærkraften ved forsøksrigg 1. En for stor nedtrykkskraft kan føre til at det blir presset smeltet nikkell ned i røret, eventuelt at toppen blir presset bort fra arbeidsstykket og inn på spolen. En for liten nedtrykkskraft vil i følge resultatene fra eksperiment VII og VIII gi en gasstett sveis, men som vist i figur D.2 og D.3 så fikk disse antydninger til svakere geometri, og smelte på utsiden av arbeidsstykket.

Utformingen av trykkbeholderen bør holdes så lik som i forsøksrigg 1 som mulig. Selv

om denne har en god avstand til spolen, så vil det fortsatt være mulig for denne å påvirke frekvensen. Maskintegningen til trykkbeholderen er gitt i appendiks F.

8.5. Oppsummering

Verdiene som blir oppgitt her er gitt som en anbefaling til startverdiene til forsøksrigg 2. Det antas at det vil bli utført flere sveiseforsøk ved forsøksrigg 2, med den hensikt å kunne justere de angitte parameterne til den grad at resultatet blir en gasstett sveis.

Effekten bør holdes ved 18.5 kW. Dette fordi en økning vil kreve en lavere frekvens. Hvis det er mulig, så kan effekten økes til minste frekvens er oppnådd ($f = 10\text{kHz}$). Hvis effekten reduseres så vil frekvensen øke, men sveiseprosessen vil da ta lengre tid, og det vil oppstå en jevnere varmefordeling utover arbeidsstykket, [28, 30].

Tiden er avhengig av effekten og hvor nært spolen er plassert arbeidsstykket. Tar sveiseprosessen for lang tid kan det føre til dannelse av smelte som kan forurense heat-pipen, eller svekke selve sveisen. Får prosessen for kort tid kan det hende at sveisen ikke blir fullstendig slik at en gasstett sveis ikke blir oppnådd. Den anbefalte tiden er i intervallet 28 - 32 sekund. Tiden er sammen med effekten de to enkleste parameterne som kan endres.

For å minimere antall nødvendige forsøk anbefales det å holde den samme geometrien som tidligere. Dette fordi det er en geometri som vi vet fungerer og fordi en forandring kan føre til at resterende parametere må justeres på nytt, noe som vil kreve flere forsøk. Selv om det er mulig at det finnes en bedre geometri for vårt formål, vil det altså ikke være fordelmessig å endre på denne.

Fra eksperimentene i forsøksrigg 1 vet vi at en fjærkraft mellom 0 - 6.5 N er det ønsket. Det er viktig at kraften ikke blir for stor siden dette kan føre til en kontakt med spolen eventuelt at smelte kommer ned i røret.

Dette er på ingen måte en garanti for at forsøket vil fungere under disse gitte parameterne. Det forutsettes derfor at det må tas tid til å teste utstyret under de nye forholdene. Den numeriske analysen samt tidligere eksperiment kan brukes for å forstå virkningen av å endre en gitt parameter og til hvilken grad den bør endres for å oppnå ønsket resultat.

8.6. Forsøksplan

Forsøksplanen her omhandler kun induksjonssveisedelen av forsøksrigg 2. Derfor blir det her antatt at riggen er ferdig sammensatt og fungerer slik innenfor de nødvendige

Parameter	Anbefalt verdi	Kommentar
Effekt	18.5 kW (30%)	Avhengig av frekvens og tid.
Tid	28 - 32 sekund	Økt effekt reduserer tiden, og omvendt.
Geometri på Arbeidsstykket	Geometri Type 2	Bør ikke endres med mindre det oppstår veldig ujevn varmfordeling.
Ring	Bruk ring	Ringtykkelse 0.9 mm. Se appendiks F
Fjærkraft	0 - 6.5 N	En høyere fjærkraft kan føre til kontakt med spole eller smelte i rør.
Topp-spole avstand	$L_s = 15.1$ mm	14.2 mm uten bruk av ring.
Arbeidsstykkets rørlengde	65.8 mm	Se appendiks F

Tabell 8.1: Anbefalte parametere

rammene beskrevet i [25].

Del	Oppgave	Mål	Kommentar
1	Maskinere Arbeidsstykke	Se figurer i appendiks F	
2	Feste Arbeidsstykket til flens	Lengde rørtopp til flens = 65.8 mm	Pass på at lengden er så nøyaktig som mulig.
3	Rense Arbeidsstykke	Vann og aceton	Rens først med vann, deretter med aceton. Unngå videre forurensning ved å bruke hansker.
4	Kontroller spolehøyden	64.5 mm	Måles fra flens og opp til bunnen av spolen.
5	Kontroller topphøyde med spole	15.1 mm (med ring)	Lodderingen og topp-arbeidsstykket plasseres på rør-arbeidsstykket. Hvis mulig, plassert toppholder/fjærkraft på toppen av arbeidsstykket.
6	Plassering av fjærkraft	3 til 5 N	Ved påfylling må denne kunne settes på under vakuu. For testing av sveiseprosessen vil dette kunne gjøres før vakuumering.
7	Vakuumering	0.0067mbar (0.1 mbar)	Nødvendig trykk ved påfylling av kalium er 0.0076 mbar, men ved kun testing av sveiseprosessen, så trengs det ikke mindre trykk enn 0.1 mbar.
8	Kontroll av generator		Gå gjennom Minac 50 sjekklister.
9	Kjør forsøk	Bruk parametere satt i tabell 8.1	Pass på at det endres kun en parameter per eksperiment.
10	Skru av generator		Generatoren skrues av etter tiltenkt tid.
11	Kjøling	1 time	La arbeidsstykket kjøles under vakuu, for å unngå oksidering av nikkel.
12	He-Test		Kontroller om sveisen er gasstett.
13	Vurder resultatet		Vurder hvilken parameter som må endres for å oppnå et bedre resultat. Gå tilbake til pkt. 1 og utfør et nytt eksperiment med en endret verdi av valgt parameter.

Tabell 8.2: Forsøksplan

9. Forslag til videre arbeid

Det vil i denne delen bli foreslått en rekke muligheter for videre arbeid, som kan deles inn i tre ulike deler. Viderearbeid med forsøksrigg 1, utvikling av en ny rigg og videreutvikling av Comsol modellen.

9.1. Videre arbeid med forsøksrigg 1

Eksperimentene ved forsøksrigg 1 ble begrenset på grunn av tidsbruk og tilgjengeligheten av nikkel. Det kan derfor være gunstig for en forbedring av sveiseprosessen å undersøke betydningen av parametere som ikke ble undersøkt i løpet av eksperimentene. Det foreslås derfor følgende forsøk som kan utføres ved forsøksrigg 1:

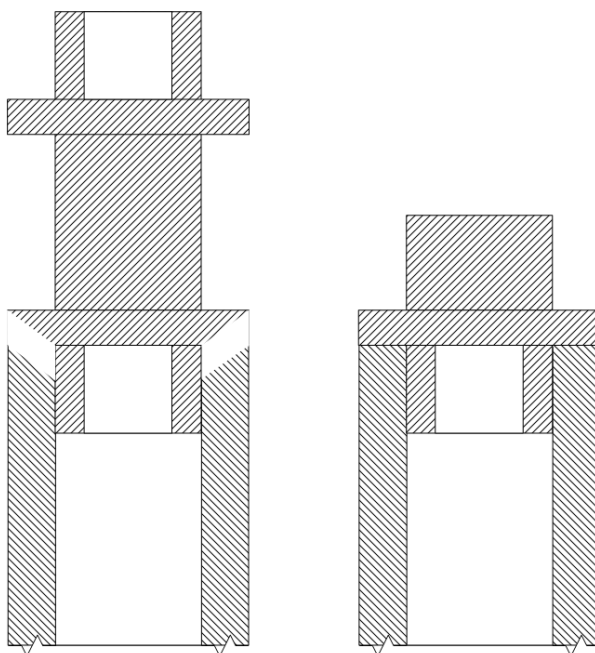
- **Endre arbeidsstykkets geometri:** Som det ble observert underforsøkene ved forsøksrigg 1, hadde geometrien en betydelig effekt på både varmfordelingen og generatorens frekvensvalg. Derfor vil det være naturlig å undersøke om en endring kan føre til en bedre sveiseprosess. Det finnes utallige mulige måter å endre geometrien på. Dette kan gjøres i kombinasjon med eller uten ringen. I figur 9.1 vises to eksempler på hvordan arbeidsstykket kan endres, ringen har ikke blitt inkludert i disse eksemplene. Den ene geometrien har en konisk kobling mellom toppen og røret, hvor hensikten er å øke kontaktflatene slik at et større område blir sveiset sammen. Et større område kan bidra til en bedre sveis ved at sveisen blir breiere. Problemet med denne løsningen er at det vil øke faren for at det smeltede nikkelet vil renne ned i røret. Dette kan trolig løses ved en finjustering av effekten og induksjonstiden på en slik måte at det ikke smeltes mer nikkel enn nødvendig, og dermed hindre at det renner over.

Det andre eksempelet er enkelt forklart en halvering av toppen. Toppen hadde denne geometrien kun for å ha muligheten til å brukes på ny ved et nytt eksperiment, og derfor kan det undersøkes hva effekten blir ved å halvere massen. Dette vil mest sannsynlig føre til en endring i varmfordelingen, og det vil derfor være nødvendig å endre på spolens plassering langs z-aksen i forhold til arbeidsstykket. Derfor kan en forvente at en endring av geometrien vil føre til at det blir nødvendig å stille inn de fleste parameterne på nytt (spesielt spolens plassering, men også effekten, frekvensen og tiden kan bli påvirket av dette).

- **Spolediameteren:** Spolediameteren er avgjørende for hvor sentrert oppvarmingen blir. Som nevnt tidligere vil det være optimalt å ha spolen så nært arbeidsstykket

som mulig uten at det er fare for at det oppstår kontakt. Det må ved et slikt eksperiment tas hensyn til at både spolen og arbeidsstykket kan flytte på seg som følger av de induerte kreftene. Derfor kan det være gunstig å se på en alternativ festemetode til arbeidsstykket. I sammenheng med disse eksperimentene kan det være gunstig å kontakte EFD-induction for å undersøke konsekvensene av kontakt mellom spolen og arbeidsstykket. Det vil også være interessant å se om denne avstanden har en betydning på frekvensvalget til generatoren.

- **Endring av spolens geometri:** Under eksperimentene utført i denne oppgaven ble det kun tatt i bruk en rørgemetri til spolen. Fra litteraturen vet vi at en firkantspole vil kunne generere en mer lokal oppvarming som følger av en større eksponering av spolens overflate, og en bedre rettet magnetisk fluks. Denne eksponeringen er avhengig av faktorer som spolens orientering (rotering), hvordan arbeidsstykkets geometri er designet, avstand til arbeidsstykket og spolens bredde. Det kan også endres på spolens indre areal, for å undersøke hvordan dette vil endre massestrømmen av kjølevann og dermed kjølingen av spolen.
- **Betydningen av kjølevannet:** Under flere av eksperimentene ved forsøksrigg 1 ble det observert sotdannelse på spolen. Det er uvisst hva som forårsaket dette. En forklaring kan være at spolen ble utsatt for en høyere temperatur enn først antatt. Derfor vil en undersøkelse av betydningen til kjølevannet være interessant. Dette kan gjøres ved å måle strømningshastigheten gjennom spolen, initialtemperaturen på vannet, samt å måle temperaturen på spolen under ett av forsøkene. Utfordringen ved dette er å finne et termoelement som kan måle temperaturen uten at det selv påvirker eller blir påvirket av induksjonsprosessen. En av de mest brukte termoelementene for måling av spoletemperatur er termoelement av typen B, R og S, som består av platinum eller platinum-rhodium legeringer. Ved bruk av termoelement er det viktig at disse er isolert i fra hverandre under induksjonsprosessen. Alternativt kan muligheten for å ta i bruk et IR-kamera undersøkes. Det er da viktig å finne et kamera som kan måle gjennom plexiglass, eller en metode for å kompensere for dette.
- **Effekt:** Det var i forkant av eksperimentene ønsket å undersøke betydningene av forskjellige effektmengder. Dette ble ikke mulig på grunn av material mangel, og det ble dermed kun brukt en effekt gjennom hele forsøksoppsettet. Som nevnt tidligere vil en endring i effekten kunne føre til en hurtigere sveiseprosess, samt en mer lokal varmfordeling over arbeidsstykket, men det er også en fare for at



Figur 9.1: To eksempler på ny arbeidsstykke geometrier. Til venstre er en geometri hvor sammenføyningsarealet øker som følger av en konisk utforming. Til høyre er toppen kappet i to for å redusere massen, og dermed oppvarmingsbehovet.

frekvensen blir for lav. Det kan derfor hende at det finnes en effekt som vil gi en bedre sveis. Ved utførelsen av eksperimentet må det stilles strenge krav til nøyaktigheten av plasseringen av TC . Denne avstanden må ikke endres samtidig som effekten endres. Det vil lett kunne føre til feiltolkning av resultatene.

9.2. Utvikle en ny rigg

Som følger av at generatoren har en minstefrekvens som den kan levere effekten på, så kan det være fordelmessig i å vite virkningen av induktansen som oppstår ved en endring av geometrien rundt lederne inn og ut fra spolen. Derfor kan det bygges en ny forsøksrigg som baseres på å undersøke virkningen av å variere rørgeometrien i nærheten av spolen. Resultatene fra denne riggen kan sammenliknes med simuleringsresultatene fra del 7. Dette inkluderer også en endring av avstanden mellom spolene, hvor hovedfokuset er på innvirkningen på frekvensen.

Ved design av en slik rigg kan det også inkluderes en metode for å variere kraften som settes på toppen av arbeidsstykket. En slik variasjon må sees i sammenheng med en variasjon av arbeidsstykkegeometrien. Målet vil da være en kraft som er stor nok til å

presse flatene sammen, samtidig som det ikke presses noe nikkel ned i røret på innsiden av arbeidsstykket.

9.3. Videre utvikling av Comsol modell

Comsol er et multifysikk-verktøy. Det vil si at det kan ta i bruk en rekke ulike fysikker i en simulering alene. Dette åpner for en god del interessante forsøk relatert til denne oppgaven. Blant de ulike fysikkene som kan tas i bruk nevnes smelting og størkning av nikkelet (heat transfer- og fluid-modulene), selve induksjonsprosessen (Heat transfer og AC/DC- modulene) og effekten av fjærkraften (Structural Mechanics-modulen). En kombinasjon av alle disse funksjonene vil kreve en mye kraftigere maskinvare enn det som er normalt for en ordinær hjemme/skole maskin. Derfor må det tas i bruk en mye kraftigere maskin eller et kluster av flere maskiner.

Ved en ny simulering kan det brukes tid på å implementere flere av disse fysikkene i en og samme modell, f.eks. oppvarming ved induksjon og deretter nedkjøling. En slik modell vil kreve at den påførte strømmen stanser og at nedkjølingen begynner, uten at selve simuleringen stanser. En modell som inkluderer nikkelet som først smelter og deretter størkner ville øke forståelsen av hvordan sveisen utvikler seg, og hvordan de ulike parameterne bidrar til en bedre sveis. Ulempen ved en slik modell er at den vil ha høye krav til datakraft, og stor kjennskap til programvaren. Det er også viktig å tenke på at for en mer komplisert modell er det mye mer som kan være programmert feil.

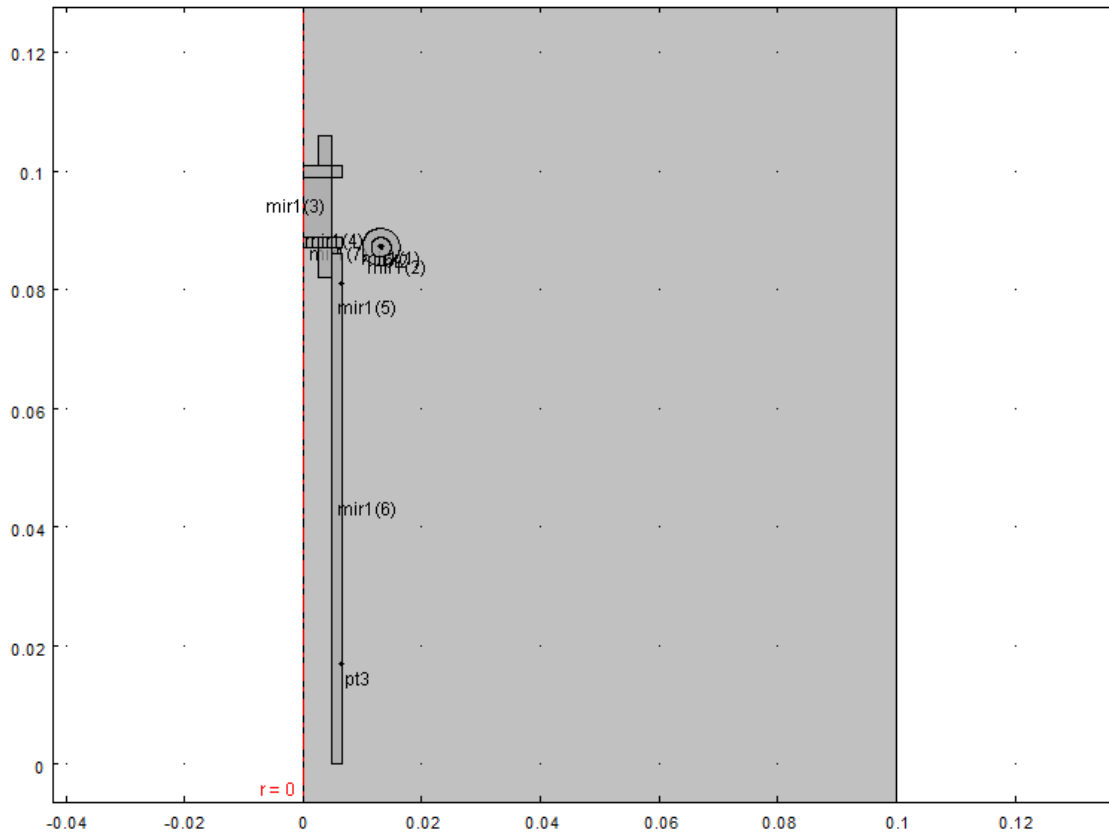
I den numeriske delen av denne oppgaven ble det ikke tatt hensyn til at en 2D-modell vil ha en spole på hver side av arbeidsstykket som forsterker hverandre. Det er uvisst hvilken effekt dette har på simuleringen. Modellen kan enkelt lages ved å speile modellen som ble brukt i denne oppgaven, men en slik endring vil kreve mer av datamaskinen. Det er også viktig å huske på at ved en speiling av modellen så må vinkelen rundt arbeidsstykket (2D-aksesymerisk, rundt aksene) endres fra 360° til 180° . Hvis det er mulig så kan det også lages en 3D-modell. Dette gjøres enkelt ved å ekstrudere modellen rundt z-aksen.

Referanser

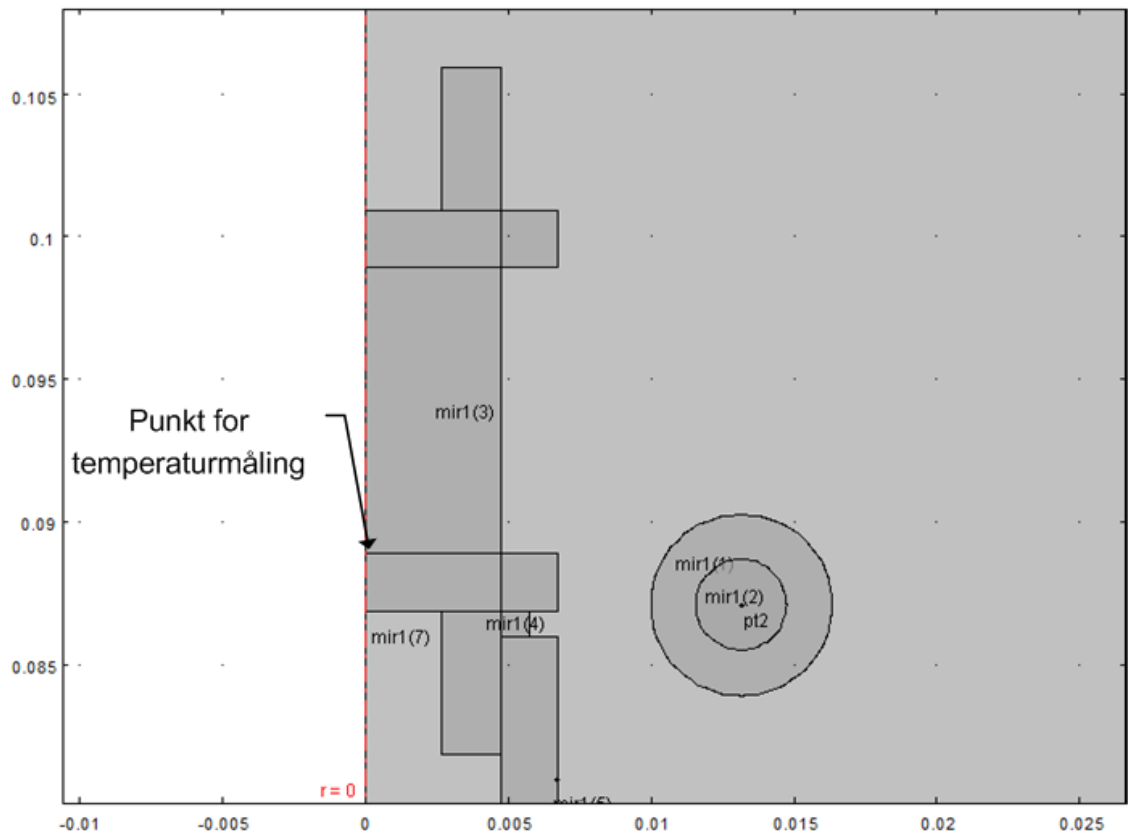
- [1] G.Mosca P.A. Tipler. *Physics, for scientists and engineers*. W.H.Freeman and Company, 2004.
- [2] Institute of physics, <http://www.iop.org/>.
- [3] Steven S. Zumdahl. *Chemical Principles*. Houghton Mifflin, 5 edition, 2003.
- [4] John H. Lienhard Chang L. Tien. *Statistical Thermodynamics*. Hemisphere Publishing Corporation., rev. print. edition, 1985.
- [5] Donald L. Turcotte John F. Lee, Francis W. Sears. *Statistical Thermodynamics*. Addison-Wesley publishing company, INC., 1963.
- [6] Van P. Carey. *Statistical Thermodynamics and Microscale Thermophysics*. Cambridge university press, 2004.
- [7] Høgskolen i vestfold. Magnetiske egenskaper. *Materialer og egenskaper*.
- [8] D.E. Mapother D.L. Connely, J.S. Loomis. Thermal conductivity of porous systems. *jgr*, 98(E2), 1966.
- [9] S.L. Semiatin S.Zinn. *Elements of Induction Heating*. Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- [10] Raymond Cook Micah Black Valery Rudnev, Don Loveless. *Handbook of Induction Heating*. Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [11] Einar Halmøy. *Sveiseteknikk*. 2007.
- [12] S.L. Semiatin Stanley Zinn. Coil design and fabrication: Basic design and modifications, part 1 and 2. *Heat Treating*, pages 32–41, 1988.
- [13] H. Wiche V. Wesling, A. Schram. Investigation of the process- and system-induced activation of material reactions during discontinuous high-frequency welding. *Advanced Materials Research*, 137(3):247–293, 2010.
- [14] E.J. Davies. *Conduction and Induction Heating*. Carnes Publication Services, Inc., 1987.
- [15] Theodore L. Bergman Adriennes S. Lavine Frank.P.Incropera, David P. Dewitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley and Sons, 6 edition, 2006.

- [16] Yunus A. Çengel. *Heat and Mass Transfer, a Practical Approach*. Mc Graw Hill, 3 edition, 2006.
- [17] www.matweb.com.
- [18] Special Metals. Nickel 200 & 201. www.specialmetals.com.
- [19] <http://www.sciquip.com/browses/AlphaBrowses/listingVarian.asp>.
- [20] D. Chaussende M. Pons Jean-Marc Dedulle, F. Mercier. Crystal growth set-up for microelectronic process. *COMSOL Users Conference 2007 Grenoble*, 2007.
- [21] Comsol Multiphysics. Electric shielding. 2010.
- [22] Jean-Marc Dedulle. Crystal growth set-up for microelectronic process. *COMSOL Conference 2010 Paris*, 1970.
- [23] Comsol Multiphysics. Rf-heated hot wall furnace for semiconductor. 2010.
- [24] Comsol Multiphysics. Cavity radiation. 2010.
- [25] Kolbeinn Jakob Kristjansson. Utvikling av et hybrid varmerør for høytemperatur anvendelser. Master's thesis, Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet, Institutt for energi- og prosessteknikk, 2010.
- [26] H. Nagaoka. The inductance coefficients of solenoids. *Journal of the College of Science, Imperial University, Tokyo, Japan*, 11(3).
- [27] Susan A. Reidel James W. Nilsson. *Electric Circuits*. Pearson, 9 edition, 2011.
- [28] Muntlig konsultasjon med EFD Induction, v/ Reidar Sletteveit .
- [29] G.F.Hewitt. *Heat Exchanger Design Handbook, Part 2*. Begell House, Inc, 2002.
- [30] P.G. Simpson. *Induction heating*. McGraw-Hill, 1960.
- [31] www.caburn.co.uk.

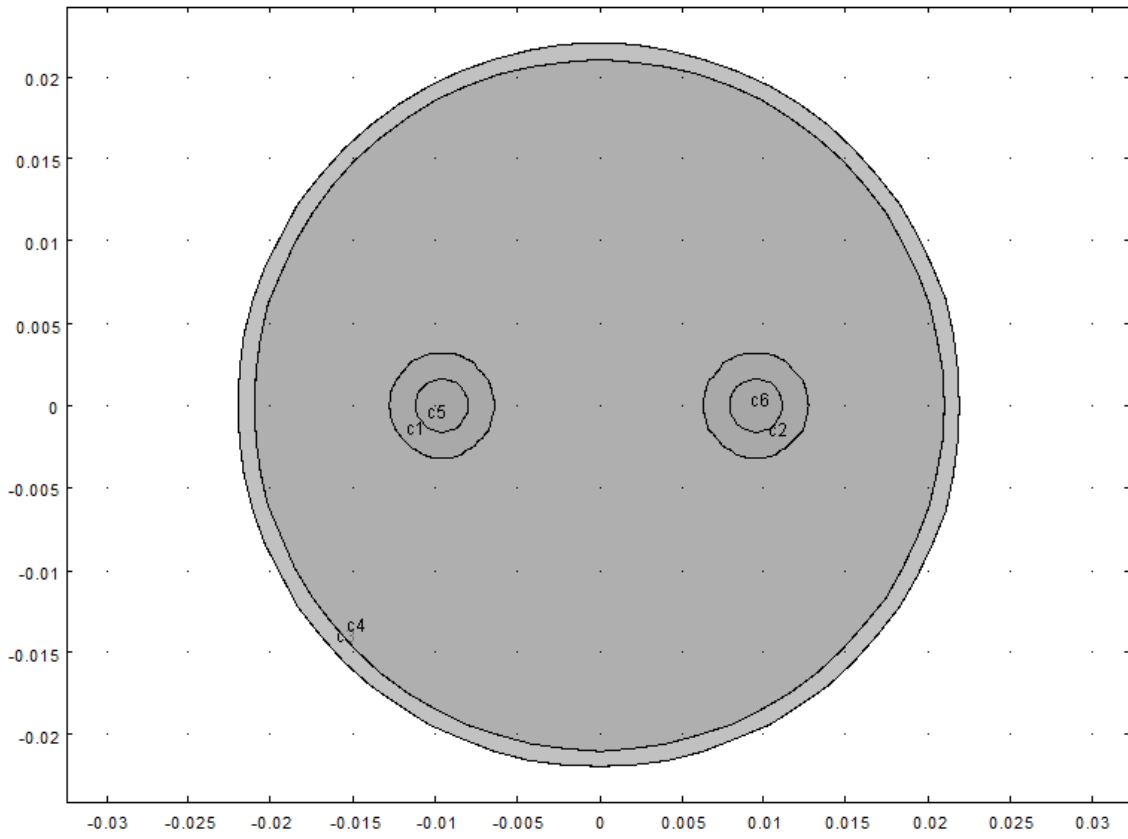
A. Geometrier brukt i oppgaven



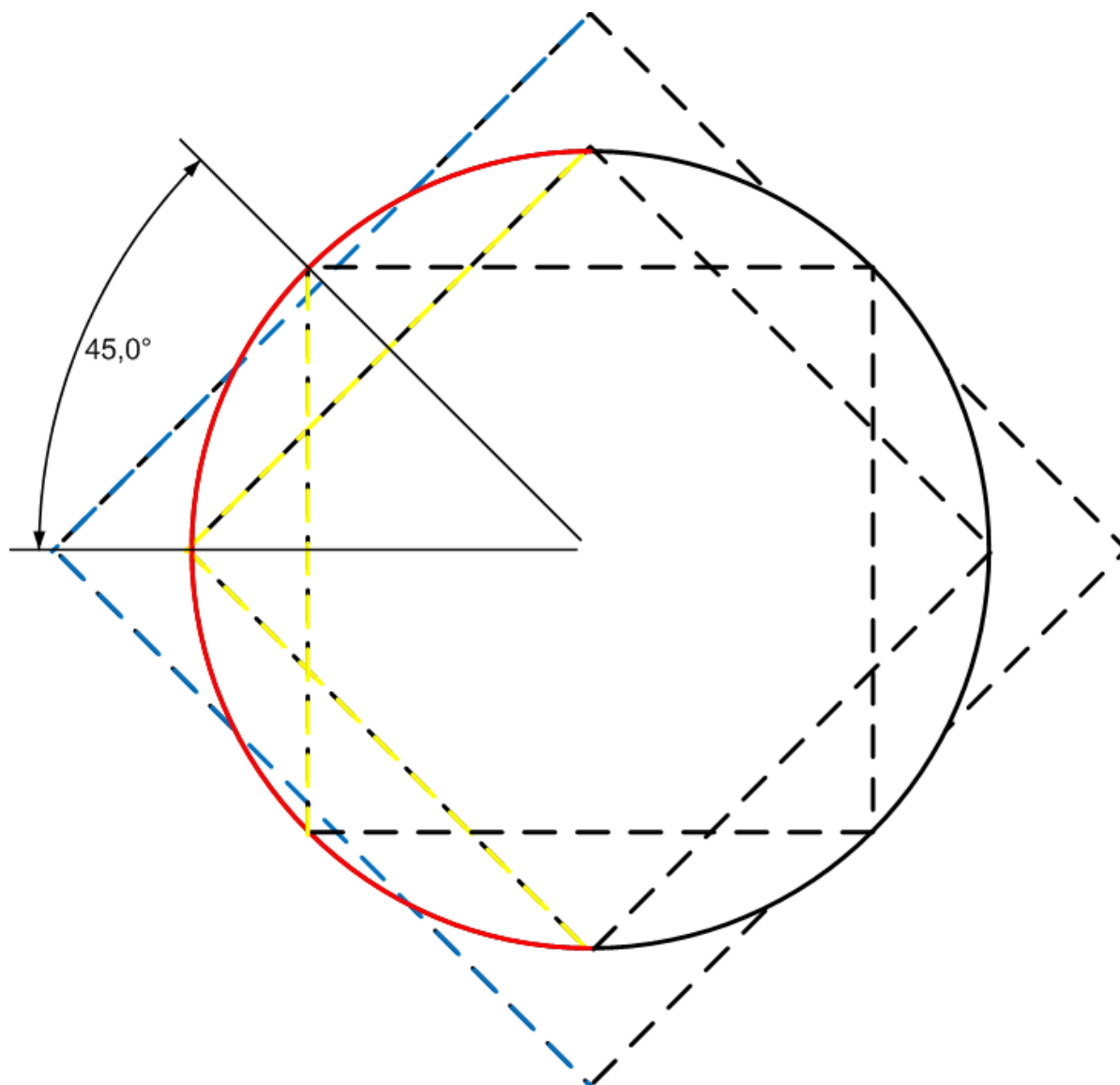
Figur A.1: Geometrien brukt i simuleringene til del 6



Figur A.2: Nærbilde av arbeidsstykkegeometrien. Figuren viser også hvilket punkt som ble brukt i sammenheng med evaluering av temperaturutviklingen ved forskjellige frekvenser.



Figur A.3: Geometrien brukt i simuleringene til del 7



Figur A.4: Figuren viser forskjellen mellom tverrsnitt geometriene diskutert i del 6. Den røde delen på sirkelen viser den delen av spolen som er rettet mot arbeidsstykket, og dermed også den magnetiske fluksen relatert til dette arealet. De to firkantene med gul farge viser forskjellen mellom det eksponerte arealet som oppstår ved å rotere spolen 45 grader. Firkanten med den blå fargen viser hvordan eksponeringsarealet øker når størrelsen på figuren øker. Det er viktig her å være klar over at en økning i arealet vil kun spre ut fluksen per areal.

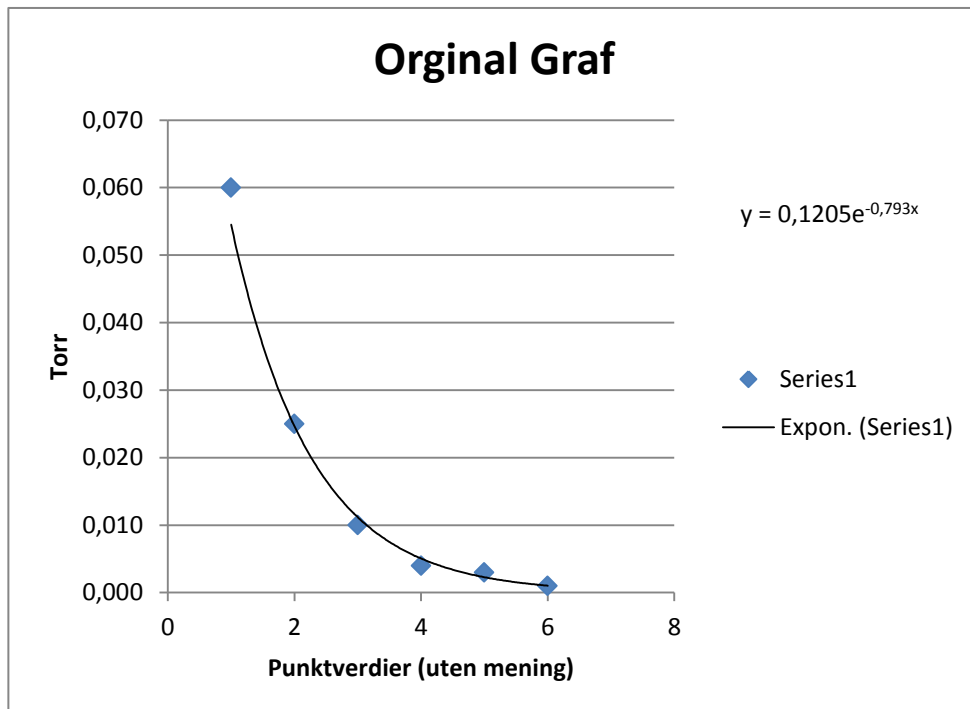
B. Trykkonverteringsgraf

Trykkmåleren, som ble tatt i bruk ved forsøksrigg 1, var en gammel *Pirani gauge head (M5C-2)* måler. Problemet med denne måleren var at den ikke var kalibrert ordentlig før forsøkene ble utført. Måleren ble derfor sjekket opp mot en annen kalibrert trykkmåler. Dette resultatet ble deretter plottet inn i en graf. Det ble i senere tid oppdaget at denne grafen var plottet feil, slik at den ikke kunne brukes direkte til omregning av trykket målt under eksperimentene. Derfor ble det med basis i punktene fra plottet laget en ny graf som kunne brukes direkte i omregningen. For å begrense usikkerheten ved å måle punktverdiene direkte fra grafen ble det valgt å kun ta i bruk de tre øverste (høyest trykk) punktene på grafen.

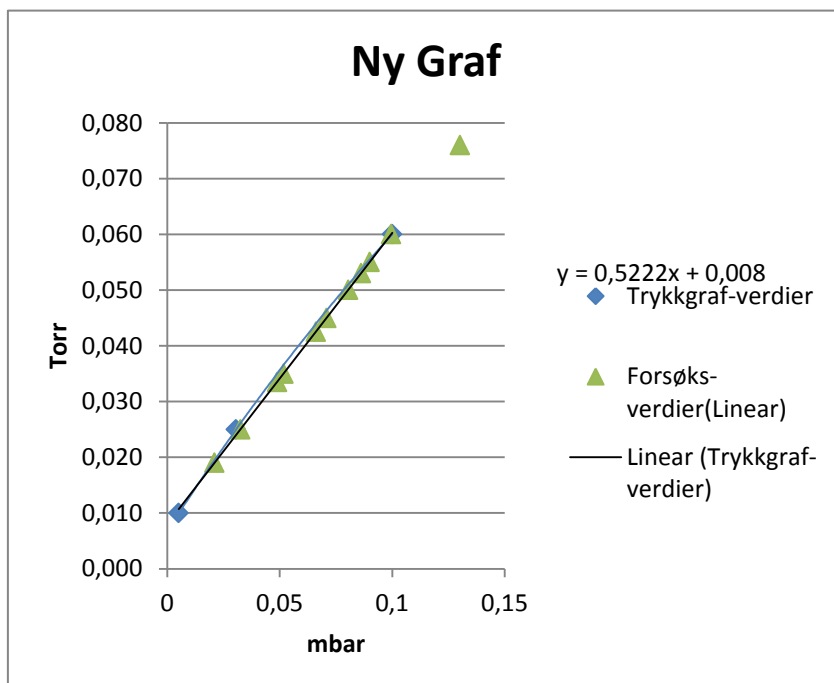
Det ble valgt å ta utgangspunkt i en lineær tilnærmingen som vist i den nederste grafen.

FRA TRYKKGRAF			NORMAL TRYKKOMREGNING	DIFFERANSE	
Torr	X-verdi	mbar	1Torr = 1,33 mbar		
0,060	1	0,1	mbar	PROSENT (%)	
0,025	2	0,0306		0,0798	20,20
0,010	3	0,00512		0,03325	8,66
0,004	4	0,00233		0,0133	159,77
0,003	5	0,00172		0,00532	128,33
0,001	6	0,00117		0,00399	131,98
				0,00133	13,68

Konklusjon1: Lavere trykk dårligere
overensstemmelse. (Basert på kun Torr vs Mbar
verdier fra orginal graf.)



MÅLTE TRYKK	
Torr	mbar (Linear)
0,019	0,021064726
0,025	0,032554577
0,0335	0,048831865
0,035	0,051704328
0,0425	0,066066641
0,045	0,070854079
0,05	0,080428954
0,053	0,08617388
0,055	0,09000383
0,06	0,099578705
0,076	0,130218307



C. Maple regneark for termisk resisivitet ved kontaktflatene

>	$Do := 0.0135 \llbracket m \rrbracket$	$Do := 0.0135 \llbracket m \rrbracket$	(1)
>	$Di := 0.0095 \llbracket m \rrbracket$	$Di := 0.0095 \llbracket m \rrbracket$	(2)
>	$A := \text{Pi} \cdot \left(\frac{Do}{2}\right)^2 - \text{Pi} \cdot \left(\frac{Di}{2}\right)^2$	$A := 0.00002300000000 \pi \llbracket m \rrbracket^2$	(3)
>	$\text{simplify}((3), 'symbolic')$	$0.00007225663104 \llbracket m^2 \rrbracket$	(4)
>	$m := 0.01 \llbracket kg \rrbracket$	$m := 0.01 \llbracket kg \rrbracket$	(5)
>	$P := \frac{m \cdot 9.81 \llbracket \frac{m}{s^2} \rrbracket}{A}$	$P := \frac{4265.217391 \llbracket kg \rrbracket \llbracket \frac{m}{s^2} \rrbracket}{\pi \llbracket m \rrbracket^2}$	(6)
>	$\text{simplify}((6), 'symbolic')$	$1357.660862 \llbracket Pa \rrbracket$	(7)
>	$M := 2 \cdot 10^3 \llbracket MPa \rrbracket$	$M := 2000 \llbracket MPa \rrbracket$	(8)
>	$C := \left(\frac{P}{M}\right)^{\frac{1}{2}}$	$C := 1.460345403 \sqrt{\frac{\llbracket kg \rrbracket \llbracket \frac{m}{s^2} \rrbracket}{\pi \llbracket m \rrbracket^2 \llbracket MPa \rrbracket}}$	(9)
>	$\text{simplify}((9), 'symbolic')$	0.0008239116647	(10)
>	$l := 4.6 \cdot (5 \cdot 10^{-6} \llbracket m \rrbracket + 5 \cdot 10^{-6} \llbracket m \rrbracket)$	$l := 0.00004600000000 \llbracket m \rrbracket$	(11)
>	$\text{lambda} := 0.02 \llbracket \frac{W}{m \cdot K} \rrbracket$	$\lambda := 0.02 \llbracket \frac{m \cdot kg}{s^3 \cdot K} \rrbracket$	(12)
>	$\text{solve}\left(U \cdot \frac{l}{\text{lambda}} = 10^{-6}, U\right)$	$\frac{0.0004347826087 \llbracket \frac{m \cdot kg}{s^3 \cdot K} \rrbracket}{\llbracket m \rrbracket}$	(13)

```
> combine((13), 'units')
```

$$0.0004347826087 \left[\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \text{K}} \right] \right] \quad (14)$$

```
> k := 0.0004347826087 \left[ \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \text{K}} \right] \right] \cdot (Do - Di)
```

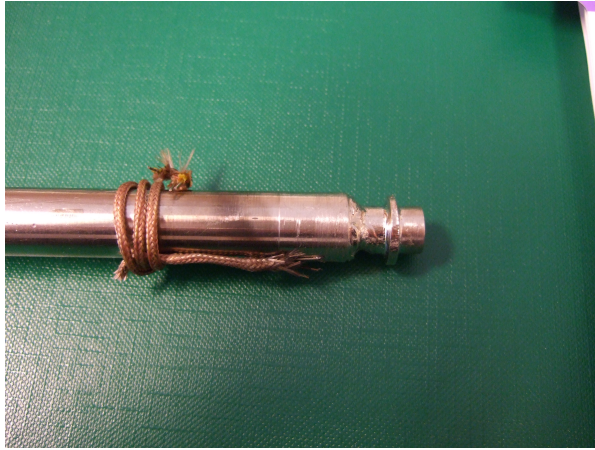
$$k := 0.000001739130435 \left[\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \text{K}} \right] \right] \left[[m] \right] \quad (15)$$

```
> simplify( (15), 'symbolic' )
```

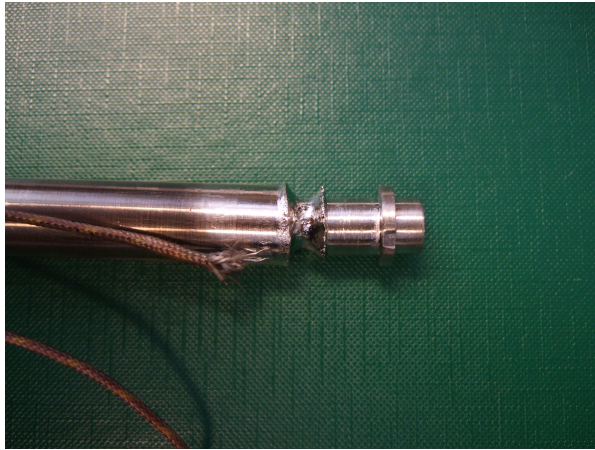
$$0.000001739130435 \left[\left[\frac{\text{m kg}}{\text{s}^3 \text{K}} \right] \right] \quad (16)$$

```
>
```

D. Arbeidsstykker etter sveising



Figur D.1: Arbeidsstykket fra eksperiment 4.

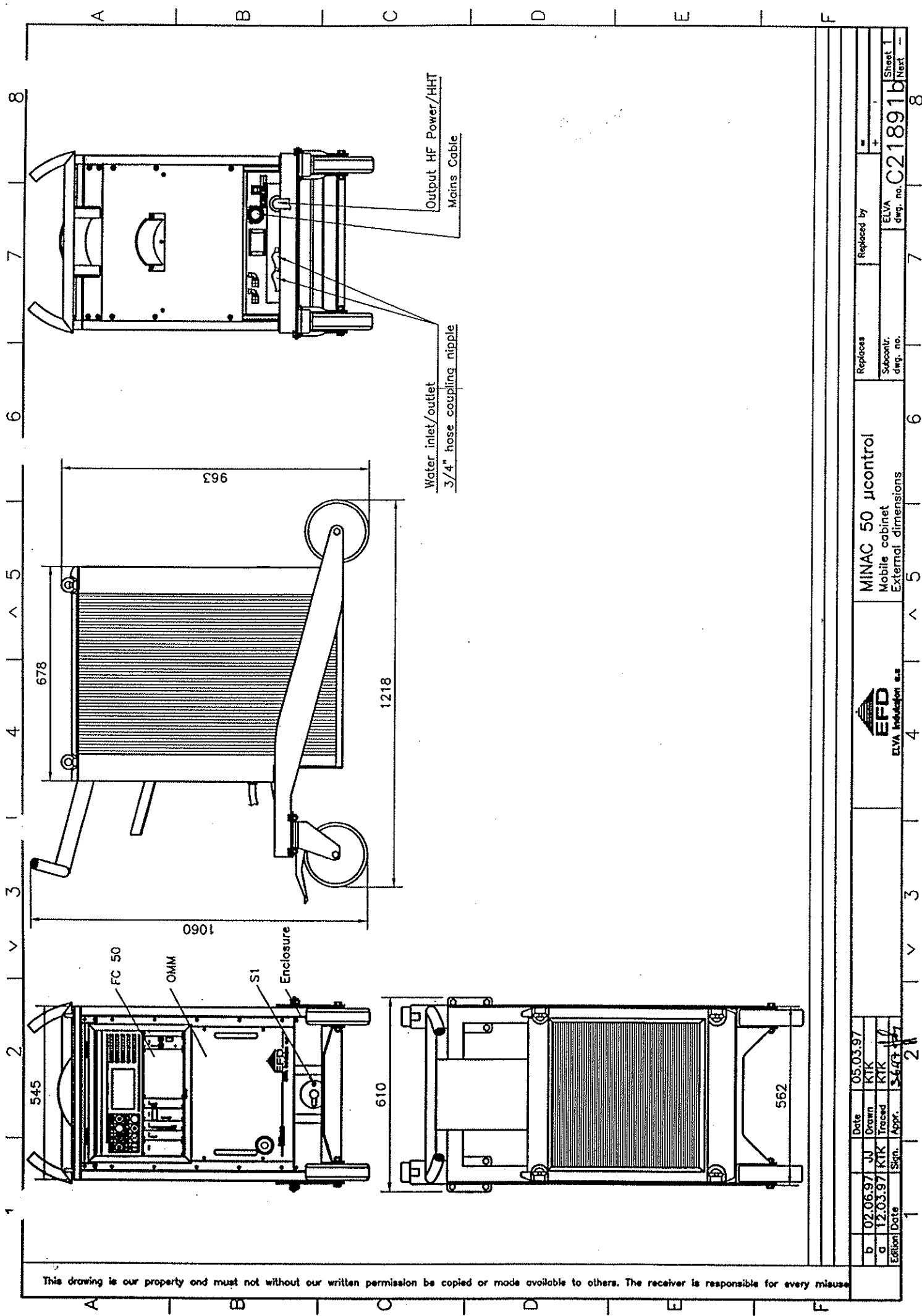


Figur D.2: Arbeidsstykket fra eksperiment 7.



Figur D.3: Arbeidsstykket fra eksperiment 8.

E. Tekniske spesifikasjoner, Minac 50



Date		05.03.97	
b	02.06.97	JJ	Drawn
c	12.03.97	KIK	Traced
Edition		Date	
		05.03.97	
Sign.		Appr.	
		21	
Replaces			
Subcontr. dwg. no.			
ELVA			
C21891b			
Sheet 1			
Next			

MINAC 50 μcontrol
Mobile cabinet
External dimensions



This drawing is our property and must not without our written permission be copied or made available to others. The receiver is responsible for every misuse

1 TECHNICAL SPECIFICATION

1.1 Minac 50 Induction Heating System

SUPPLY

Supply voltage range	: 400–480 V \pm 10 %
Frequency	: 50/60 Hz
Nominal line current (RMS)	: 91 A
Maximum line current (RMS)	: 142 A
Nominal apparent power	: 60 kVA
Maximum apparent power	: 93 kVA
Power factor (cos ϕ)	: 0.95
Recommended fuse	: 100 A
Mains cable length	: 5 m

OUTPUT

Nominal output power	: 50 kW
Output power, intermittent duty	: 80 kW at 400 VAC
Duty factor/Cycle time	: 0.5/10 min
Output power regulation range	: 10–100 %
Frequency range	: 10–25 kHz
Efficiency	: 0.93
Flexible HHT power cable length	: 5 m

COOLING

Cooling water consumption, min.	: 20 l/min
Cooling water inlet temperature, max.	: 35 °C
Cooling water pressure, min./max.	: 4/6 bar
Ambient operating temperature	: +5 °C - +50 °C

ENCLOSURE

Outer dimensions, mobile cabinet (WxDxH)	: 610 x 1218 x 1060 mm
Outer dimensions, stationary cabinet (WxDxH):	548 x 678 x 883 mm
Weight with mobile cabinet	: approx. 230 kg
Weight with stationary cabinet	: approx. 195 kg
Enclosure protection	: IP 54
Color	: RAL 7032 Gray
Outer dimensions HHT without handle (LxOD)	: 190 x 77 mm
Weight HHT without handle	: 7.5 kg

NOTE.

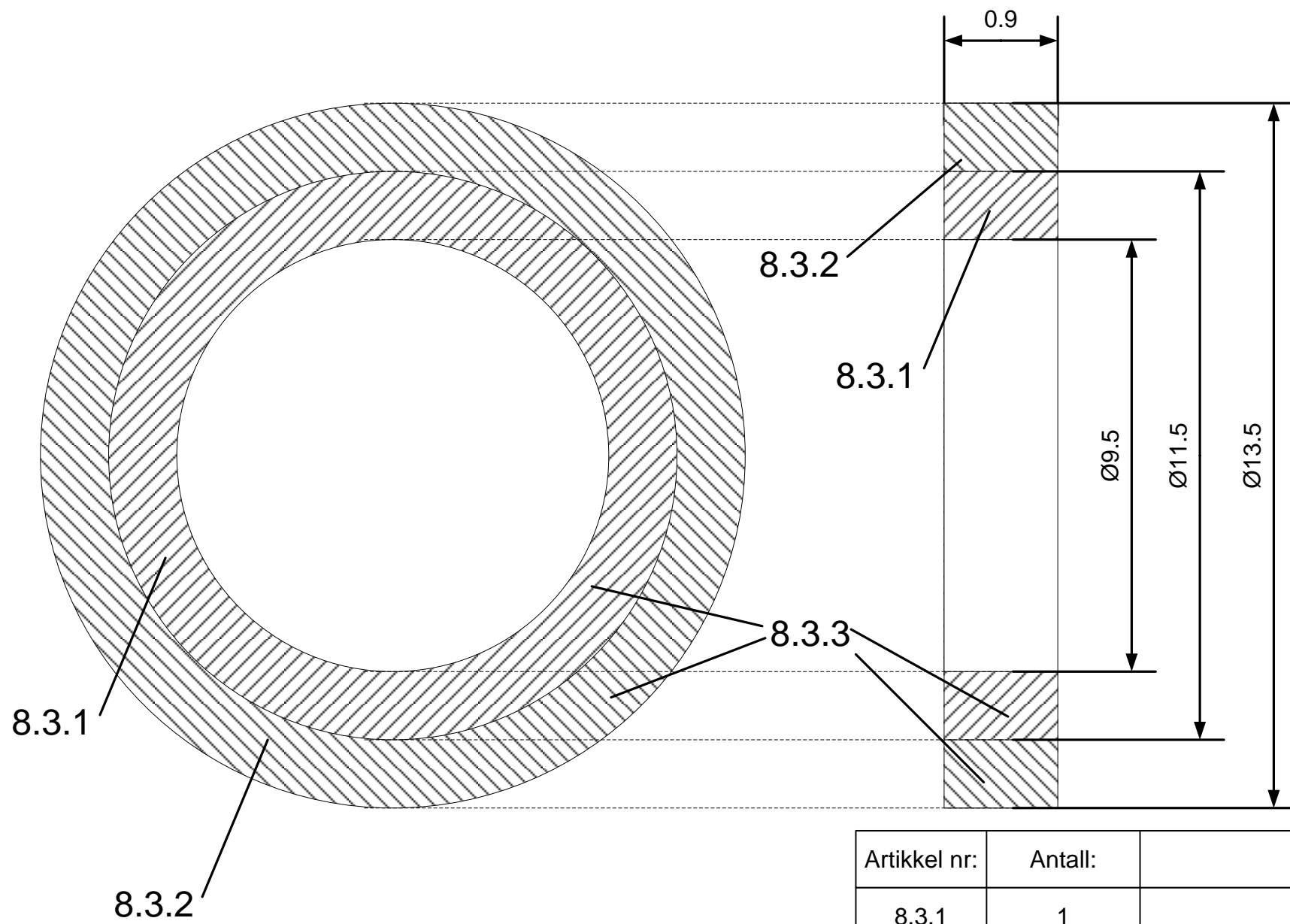
To obtain the given enclosure protection, IP 54, the glass cover over the operating panel and the electronics rack must be kept closed.

F. Maskintegning Forsøksrigg 2

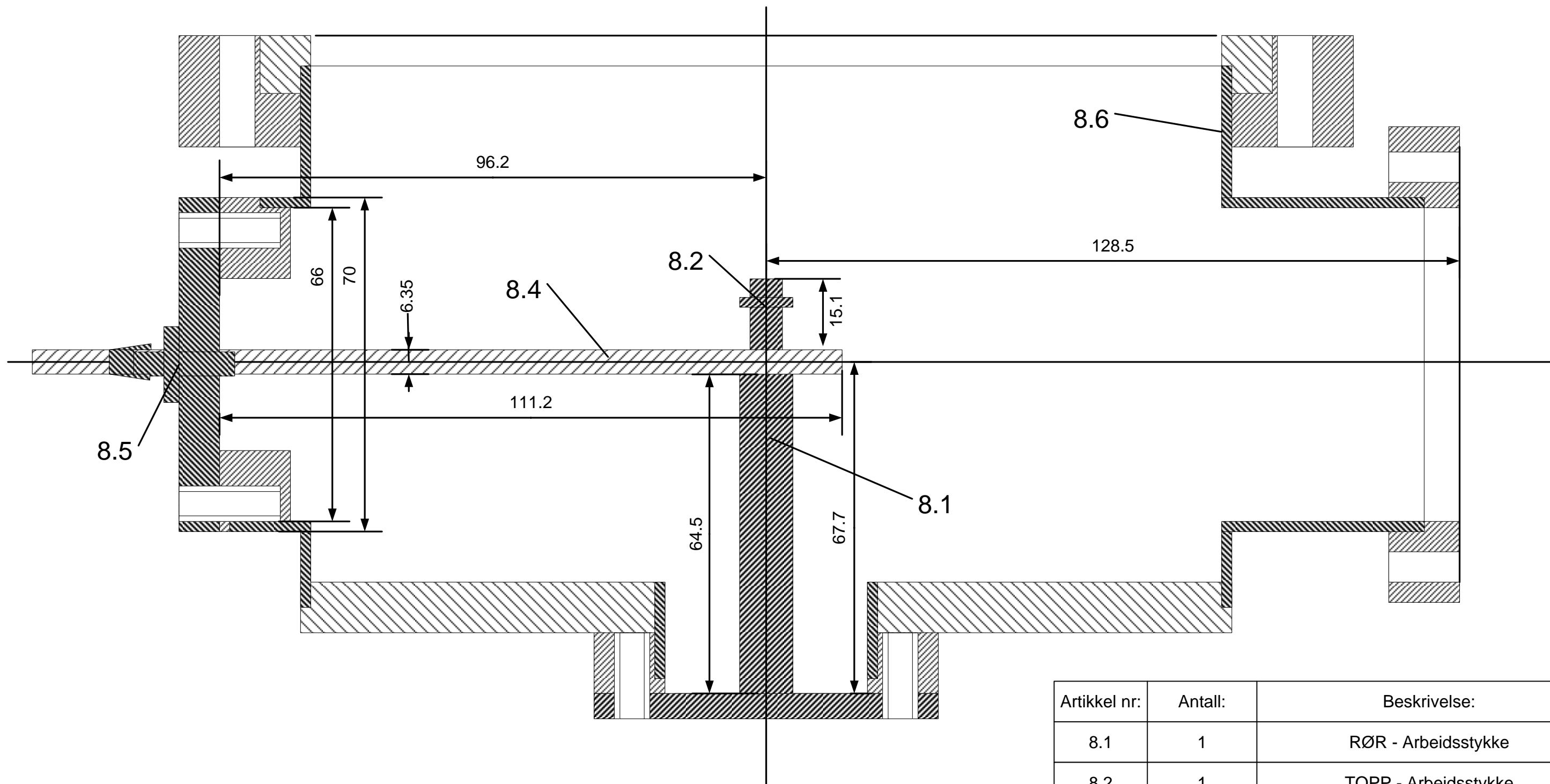
Figurbeskrivelse:

1. Måltegnning for forskjellige ringgeometrier brukt i den numeriskeanalysen.
2. Måltegnning for forsøksrigg 2, sett fra siden.
3. Måltegnning for forsøksrigg 2, sett oven i fra.
4. Måltegnning for plassering av arbeidsstykket i forhold til spolen.
5. Orginal Maksintegning av forsøksrigg 2 fra Caburn, sett fra siden.
6. Orginal Maksintegning av forsøksrigg 2 fra Caburn, sett oven i fra.
7. Maskintegning og beskrivelse av RF-feedthrough gjennomgang fra Caburn.

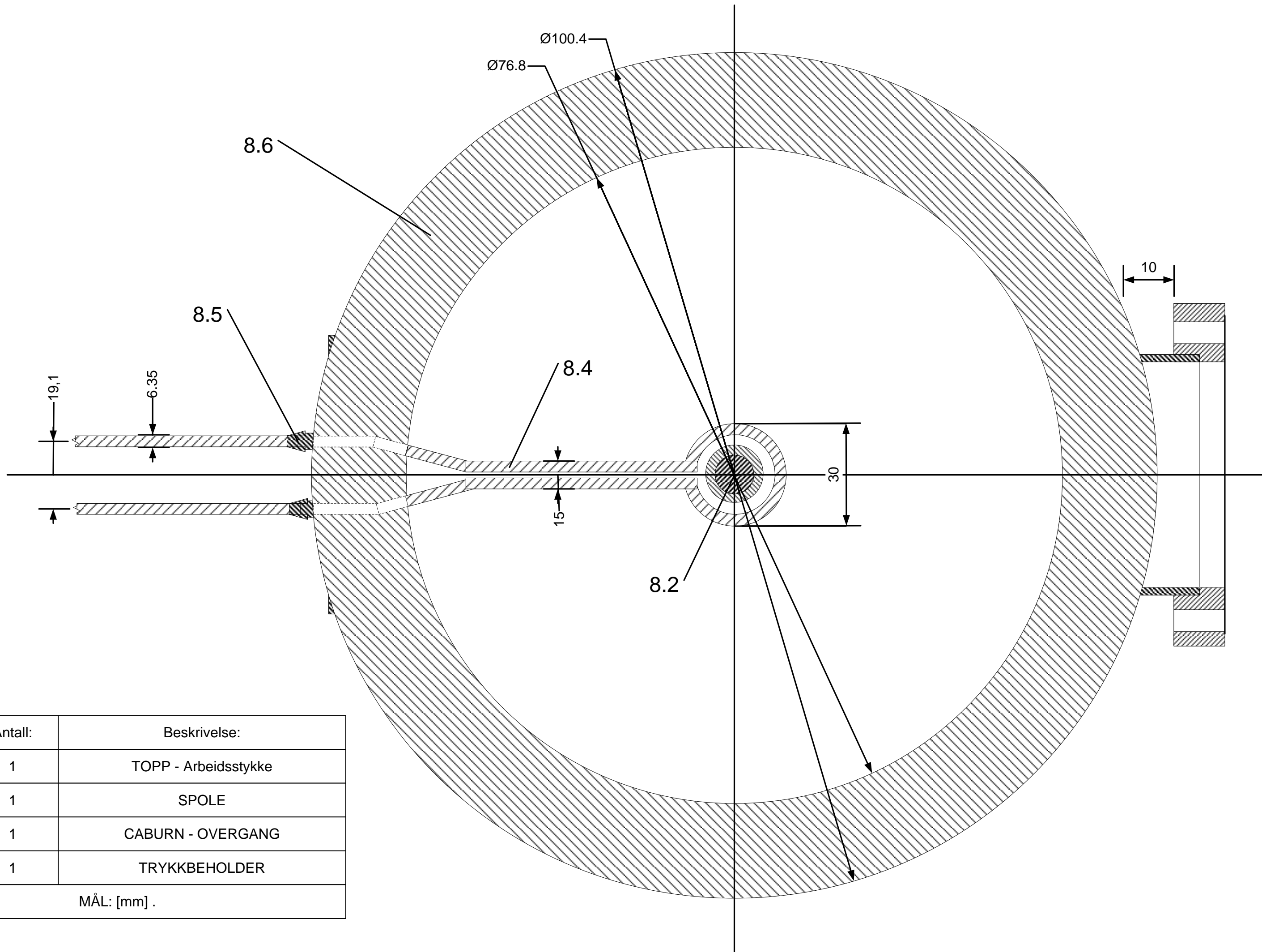
Senterlinjene gitt i figurene 2 til 5 skal stemme overens med hverandre. Tegningene til Rf-feedthrough gjennomgangen kan oppnås ved [31], Part number: 9512010.



Artikkel nr:	Antall:	Beskrivelse:
8.3.1	1	LODDERING 1
8.3.2	1	LODDERING 2
8.3.3	1	LODDERING 3 (Kombinasjon av 8.3.1 og 8.3.2)
MÅL: [mm] .		

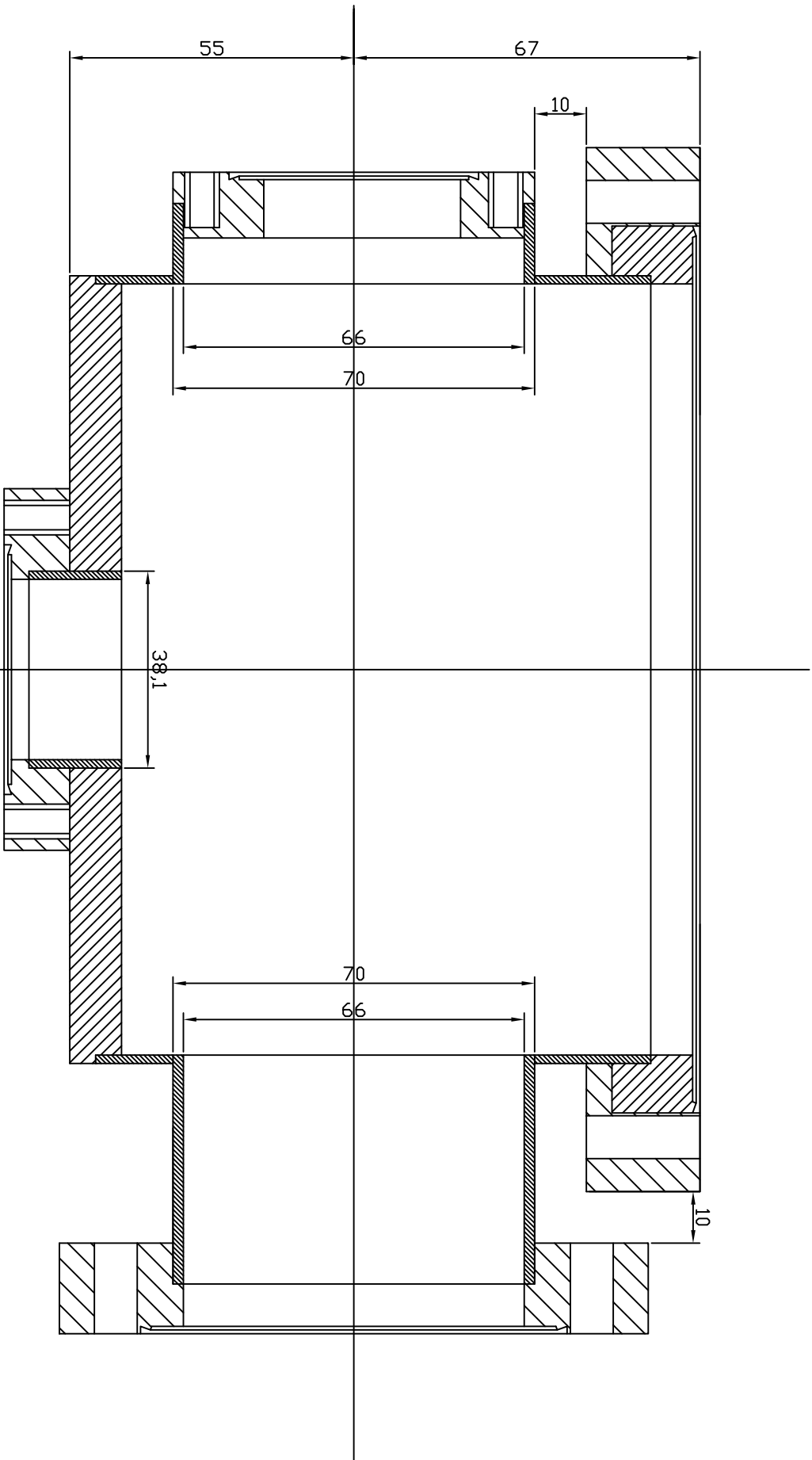


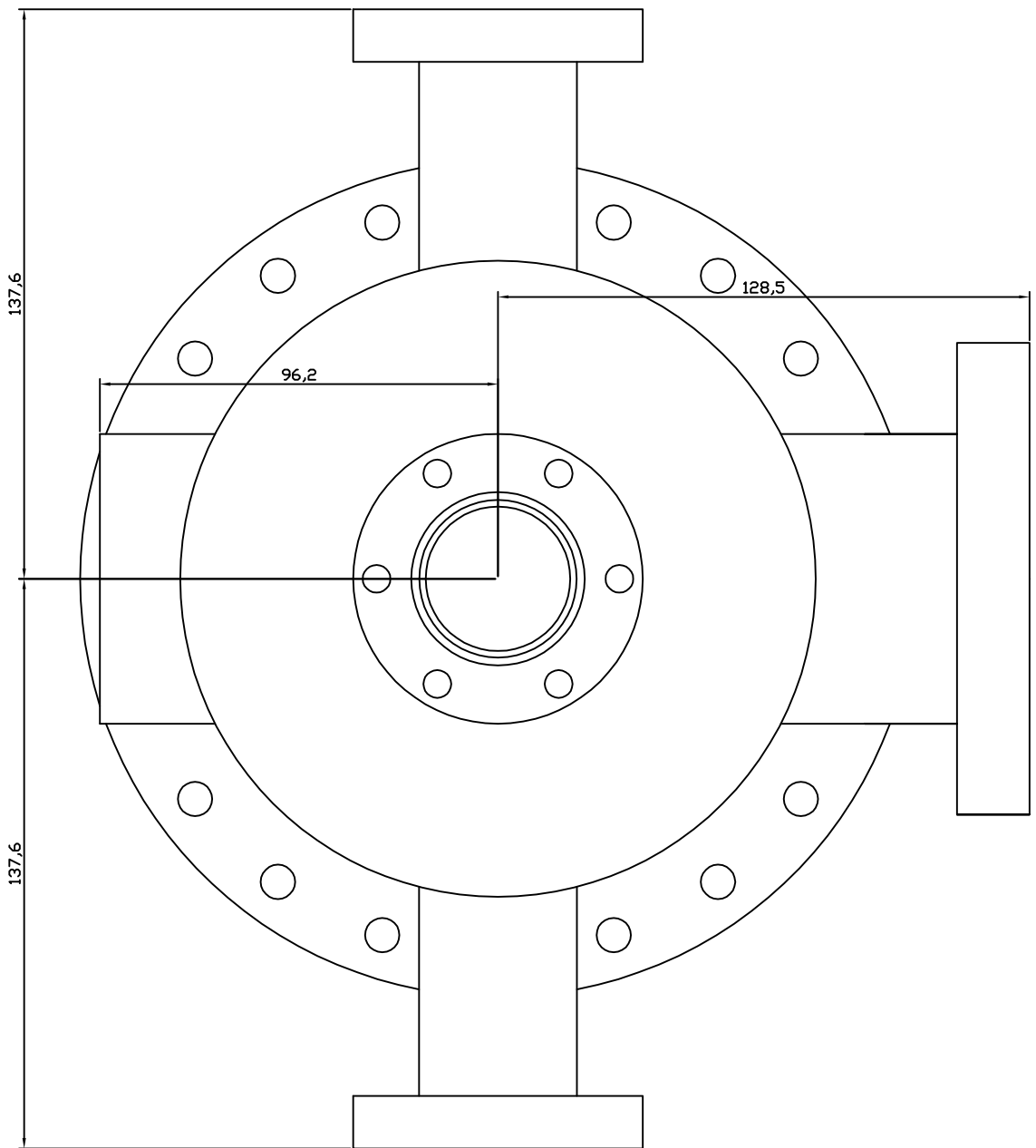
Artikkel nr:	Antall:	Beskrivelse:
8.1	1	RØR - Arbeidsstykke
8.2	1	TOPP - Arbeidsstykke
8.4	1	SPOLE
8.5	1	CABURN - OVERGANG
8.6	1	TRYKKBEHOLDER
MÅL: [mm] .		



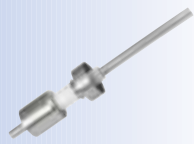
Artikkel nr:	Antall:	Beskrivelse:
8.2	1	TOPP - Arbeidsstykke
8.4	1	SPOLE
8.5	1	CABURN - OVERGANG
8.6	1	TRYKKBEHOLDER
MÅL: [mm] .		

CQ11-0439 MK3





CQ11-0439 MK3



Section 6.5 RF Power

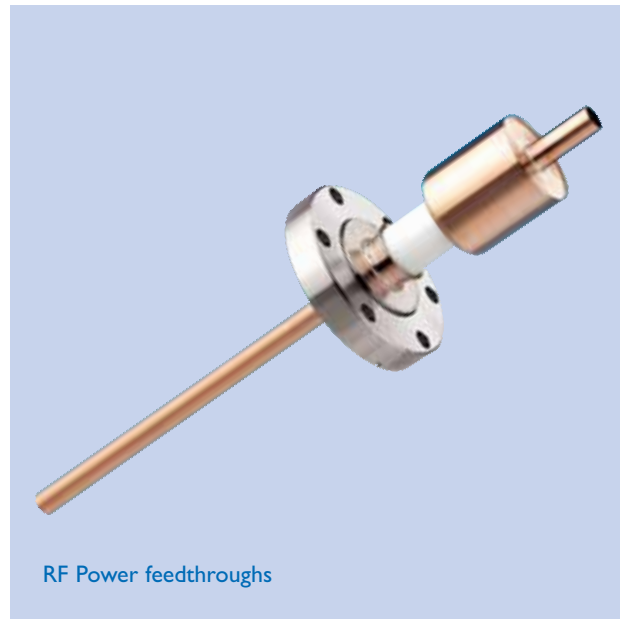
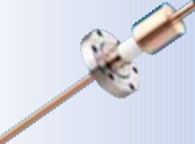
10,000V / 20 and 35kW / 13.56MHz

Feedthroughs – electrical and optical

Feedthroughs – electrical and optical

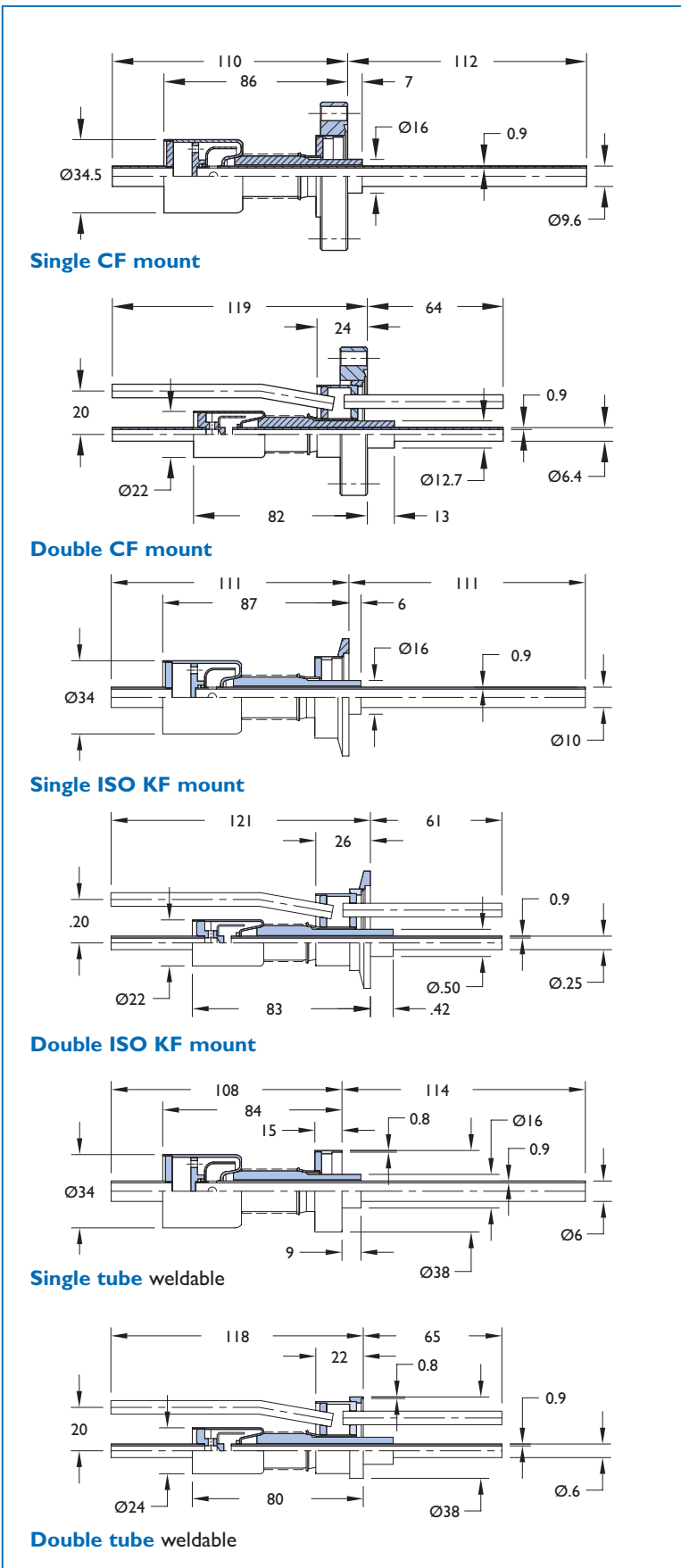
Section 6.5 RF Power

10,000V / 20 and 35kW / 13.56MHz



RF Power feedthroughs

UHV and HV series



Features

- 1 and 2 tube configuration
- High voltage
- High power
- 2 different conductor materials available
- In-vacuum accessories available
- Standard vacuum mounting styles
- Custom feedthrough configurations available upon request

Specifications

Voltage¹	10,000V DC
Current	20 and 35kW
Material	
Flanges	304ss
Adaptor	304ss
Conductor	Copper
Insulation	Alumina ceramic
Vacuum range UHV/HV	1x10 ⁻¹⁰ mbar/1x10 ⁻⁸ mbar
Temperature range²	
CF Flange mounted feedthrough	-100°C to 300°C
ISO KF Flange mounted feedthrough	-20°C to 150°C
Dimensions	Reference only, subject to change

¹ See intended operating parameters in introductory section.

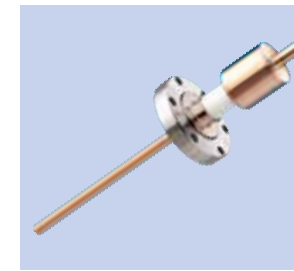
² Overall assembly ratings must be adjusted to that of the lowest rated component.

All dimensions are nominal in millimetres unless specified

Caburn-MDC Europe Limited Telephone +44 (0)870 428 7646 www.caburn.co.uk



CF

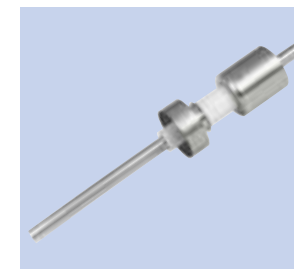


No. of tubes	Flange mount	Volts	kHz	Power	Reference	Part number	£	€	SFr.
1	DN40CF	10kV	13.56	35kW	RF35-C40	9512020	460	705	909
2	DN40CF	10kV	13.56	20kW	RF20-2-C40	9512010	446	683	880

ISO KF

No. of tubes	Volts	MHz	Power	Flange mount	Reference	Part number	£	€	SFr.
1	10	13.56	35kW	DN40CF	RF35-K40	9513011	460	705	909
2	10	13.56	20kW	DN40CF	RF20-2-K40	9513010	446	683	880

Weldable



No. of tubes	Volts	MHz	Power	Reference	Part number	£	€	SFr.
1	10	13.56	35kW	RF35	9511020	446	683	880
2	10	13.56	20kW	RF20-2	9511010	427	654	843

Accessories

RAPC



Accessory type	Material	Quantity per pack	Reference	Part number	£	€	SFr.
In-line clamp	Copper	1	IPLC	991536	19	28	37
Right angle clamp	Copper	1	RAPC	991537	19	28	37

IPLC



All dimensions are nominal in millimetres unless specified

Caburn-MDC Europe Limited Telephone +44 (0)870 428 7646 www.caburn.co.uk

